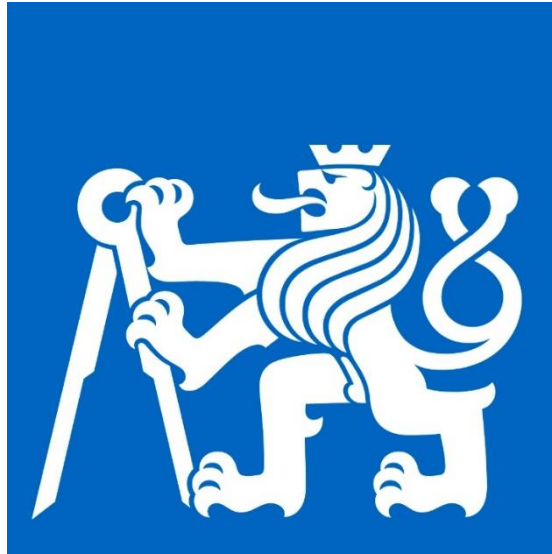


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



**Porovnání přesnosti snímacích systémů
využívaných pro měření obecných tvarových
ploch**

Bakalářská práce

Autor: Milan Kocáb

Vedoucí práce: Ing. Petr Mikeš, Ph.D.

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kocáb** Jméno: **Milan** Osobní číslo: **491159**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Porovnání přesnosti snímacích systémů využívaných pro měření obecných tvarových ploch

Název bakalářské práce anglicky:

Accuracy comparison of sensor systems used for inspection free form surfaces

Pokyny pro vypracování:

1. Základní rozdělení snímacích systémů
2. Kalibrace freeform artefaktu
3. Příprava měření pro dotykové a bezdotykové snímací systémy
4. Vyhodnocení přesnosti měření obecné tvarové plochy pro dotykový a bezdotykový snímací systém

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **21.03.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

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

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

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně a využil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu literatury.

V Praze dne

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Petru Mikešovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a vedení při práci a mé rodině za podporu studia.

Abstrakt

Bakalářská práce se zaměřuje na porovnání dotykových a bezdotykových snímacích systémů pro měření obecných tvarových ploch. Část práce se zaměřuje na základní dělení snímacích systémů a jejich charakteristiky. V další části je pomocí souřadnicového měřicího stroje provedena kalibrace dvou freeform artefaktů, s lesklým a matným povrchem. Výsledkem této kalibrace je CAD (Computer Aided Design) model, který slouží jako reference pro vyhodnocení měření na bezdotykovém snímacím systému, konkrétně pruhové projekci. Práce představuje ucelený postup pro určení přesnosti snímacích systémů za použití freeform artefaktu a vyhodnocení přesnosti měření obecné tvarové plochy pro zařízení Zeiss Comet.

Klíčová slova

Souřadnicové měřicí stroje, pruhová projekce, snímací systém, freeform artefakt, průmyslová metrologie, dotykové snímací systémy, bezdotykové snímací systémy

Abstract

The bachelor thesis focuses on the comparison of tactile and non-tactile sensors for measuring freeform surfaces. Part of the work focuses on the categorization of sensors and their characteristics. In the next part, the calibration of two freeform artefacts, one with glossy and one with matte surface, is performed using a coordinate measuring machine. Result of this calibration is a CAD (Computer Aided Design) model, which serves as a reference for evaluating measurements of non_tactile sensors, namely fringe projection scanner. The work represents a comprehensive procedure for determining the accuracy of sensing systems using a freeform artefact and accuracy evaluation for a specific measuring device Zeiss Comet.

Keywords

Coordinate measuring machines, fringe projection, sensors, freeform artefact, industrial metrology, tactile sensors, non-tactile sensors

Obsah

1	Úvod	7
2	Základní rozdělení snímacích systémů	7
2.1	Dotykové snímací systémy	7
2.1.1	Kartézské souřadnicové měřící přístroje	8
2.1.2	Nekartézsky uspořádané souřadnicové měřící přístroje	11
2.2	Dotyková sonda	12
2.2.1	Příklady dotykových snímacích systémů	14
2.3	Bezdotykové snímací systémy	16
2.3.1	Průmyslové CT	16
2.3.2	Fotogrammetrie	17
2.3.3	Laser skener	20
2.3.4	Pruhová projekce	21
2.3.5	Tepelná pruhová projekce	23
3	Kalibrace freeform artefaktu	25
3.1	Obecný postup kalibrace artefaktu	26
3.1.1	Příprava měření	26
3.1.2	Vytvoření strategie měření	27
3.1.3	Reverzní inženýrství obecné tvarové plochy	28
3.1.4	Kontrolní měření obecné tvarové plochy	30
3.2	Parametry pro kalibraci matného artefaktu	30
3.3	Parametry pro kalibraci lesklého artefaktu	32
4	Plán měření pro pruhovou projekci	33
4.1	Měření lesklého artefaktu	35
4.2	Měření matného artefaktu	39
5	Vyhodnocení měření obecné tvarové plochy	39
5.1	Dotykové měření	39
5.2	Bezdotykové měření	41
5.2.1	Výsledky bezdotykové měření matného artefaktu	41
5.2.2	Bezdotykové měření lesklého artefaktu	44
6	Závěr	48
7	Seznam použité literatury	49
8	Seznam obrázků	51
9	Seznam grafů	53

1 Úvod

S vývojem nové techniky, a hlavně nových informačních technologií dochází v současné době k velkým pokrokům ve výrobě. Zlepšené schopnosti strojů vedou ke zvýšení užitečných vlastností výrobků ve všech aspektech. Vysoké nároky jsou kladeny na konstrukční přesnost výrobků a tím také na kvalitu a přesnost měřících systémů. V oblasti strojírenství se tvorbou metod měření a zkoumáním vztahu mezi měřenou a skutečnou veličinou zabývá vědní a technický obor strojírenská metrologie. Za standart v oblasti strojírenské metrologie je považována souřadnicová měřící technika. Ovšem s rostoucími nároky na rychlost výroby a tím i rychlost prováděných měření jsou stále častěji aplikovány optické systémy měření, které mají výhodu v rychlosti měření a v počtu naměřených bodů, ale nedosahují takové přesnosti jako souřadnicové měřící stroje (dále jen CMM z anglického Coordinate Measuring Machine). Zatímco verifikací měření pomocí CMM se zabývá celá řada mezinárodních norem, většina optických zařízení mezinárodní standart nemá. Přesnost optických měřících systémů je závislá na mnoha faktorech a je tedy předmětem výzkumu. Možností, jak určit přesnost těchto systémů, je porovnat přesnější měření na CMM s daným optickým snímacím systémem. Toto porovnání můžeme provádět na konkrétních dílech, nebo na speciálně vytvořených artefaktech, a právě posledním zmíněným se zabývá tato práce.

Tato bakalářská práce si klade za jeden z cílů porovnat měření provedená dotykovými a bezdotykovými snímacími systémy na velmi přesném modelu, obě tyto metody vyhodnotit pomocí matematické statistiky a stanovit závěry, co do prostorové přesnosti měření, kvality a rychlosti poskytnutého kontrolního měření. Dalším cílem je představit hlavní měřící systémy používané ve strojírenství, provést jejich rozdělení a uvést základní charakteristiky.

2 Základní rozdělení snímacích systémů

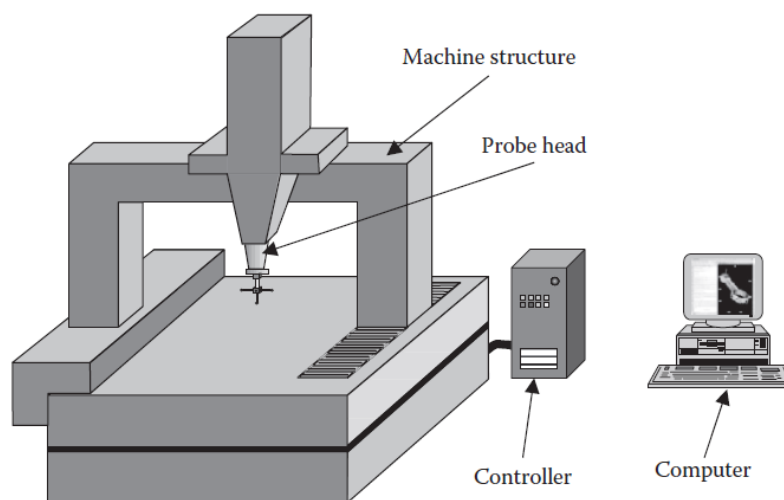
2.1 Dotykové snímací systémy

Dotykové snímací systémy jsou používány k přesnému měření a získávají informaci o tvaru pomocí fyzického kontaktu s měřenou součástí. V principu se jedná o jednoduchý a přesný způsob měření, který je v dnešní době prováděn souřadnicovými měřícími přístroji (CMM). Základní funkcí CMM je získat informace o poloze bodů na povrchu součásti pomocí snímacího systému. Dotykem se získají reálná data o poloze, rozměrech a orientaci měřeného dílu. Tato data se následně zpracují a porovnají s požadovanými rozměry. Konstrukce CMM, která nese snímací systém může mít několik provedení, která se dělí na kartézské a nekartézské.

2.1.1 Kartézské souřadnicové měřicí přístroje

Snímací systém těchto strojů se pohybuje právě ve třech osách kartézského souřadného systému, ve kterém jsou na sebe jednotlivé osy kolmé. Toto provedení umožňuje velice přesné a stabilní měření v řádech jednotek mikrometrů. Kartézské CMM jsou nedílnou součástí průmyslové metrologie a slouží například k rozměrové kontrole přesných obrobků.

Mezi základní komponenty těchto strojů patří základna stroje s plochou pro samotné měření, pohyblivý rám, řídicí systém, snímací hlava a počítač s potřebným hardwarem a softwarem pro zpracování naměřených dat. Většina kartézských CMM je také vybavena referenční koulí, která slouží ke kvalifikaci snímače. [1]



Obrázek 1 Komponenty CMM: Machine structure (pohyblivý rám); Probe head (snímací hlava); Controller (řídicí systém); Computer (počítač) [1]

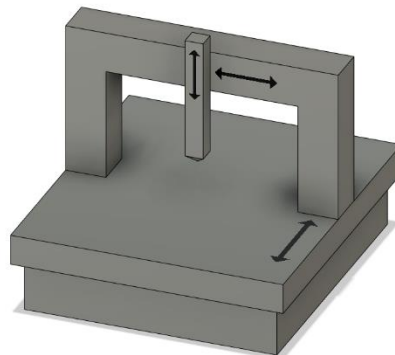
Složení materiálů používaných pro konstrukci CMM musí splňovat několik hlavních vlastností. První z nich je hmotnost. Čím těžší bude konstrukce stroje, tím větší budou silové účinky, které na něj působí, což může vést k deformacím a snížení přesnosti stroje při rychlých změnách polohy. Další klíčovou vlastností materiálů je teplotní roztažnost. Pokud bude mít materiál větší teplotní roztažnost, dojde při změnách okolní teploty k rozměrovým změnám, a to má za následek změnu v přesnosti měření. Díky moderním technologiím a softwarům je možné vliv teploty kompenzovat. Co může způsobit problém jsou teplotní gradienty, tedy místa s velkými rozdíly teplot. Vznik teplotních gradientů je vázán na tepelnou vodivost, což je schopnost materiálu vést teplo. Pokud však dojde k výrazné změně rozměrů vlivem změny teploty, je vhodné, aby se díl deformoval a měnil teplotu rovnoměrně a v celém svém objemu. Proto použití materiálu s velkou teplotní vodivostí nemusí být nutně nežádoucí. Pro dosažení přesného měření je důležité, aby byla při měření konstantní teplota. Vhodné laboratorní podmínky nelze vždy zaručit, a proto musíme tyto faktory zohlednit při výběru materiálu pro konstrukci CMM.

Mezi nejpoužívanější materiály na konstrukci CMM patří například ocel, keramika, kompozitní materiály, žula a hliníkové slitiny. Ocel je dobře dostupný materiál, jehož nevýhodou je vysoká hmotnost a teplotní roztažnost. Keramika a kompozity jsou teplotně stabilní materiály s nízkou hmotností a vysokou pevností, ale také vyšší cenou. Nižší hmotnost je také výhodou hliníku a jeho slitin. Hliník má velkou teplotní roztažnost a velkou teplotní vodivost. Posledním zmíněným a ve strojírenství nezvyklým materiálem je žula (granit). Žula je otěruvzdorný, teplotně stabilní materiál, který dobře pohlcuje vibrace. Mezi nevýhody žuly patří vyšší hmotnost a menší pevnost oproti keramice.

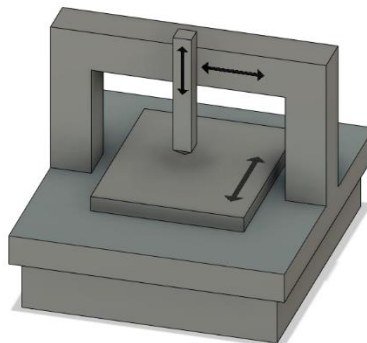
Stejně jako použité materiály, tak i samotný typ konstrukce CMM hraje důležitou roli v dosažení nejlepších výsledků měření pro konkrétní využití.

Portálový CMM

Jedná se o nejběžnější typ CMM. Nabízí velice dobrou přesnost a rychlost měření. Stroje tohoto typu jsou vhodné pro malé a středně velké součásti (do několika desítek centimetrů) a jsou vhodné v průmyslovém využití, tak i pro vědecké účely. Portálové CMM jsou jedny z nejpřesnějších na trhu. Stroje tohoto typu jsou nejčastěji vyráběny v provedení s pohyblivým portálem. Existuje také provedení s pohyblivým stolem.



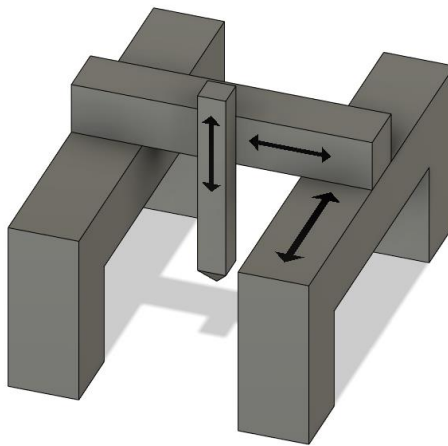
Obrázek 2 Schéma portálového CMM



Obrázek 3 Schéma portálového CMM s pohyblivým stolem

CMM mostového typu

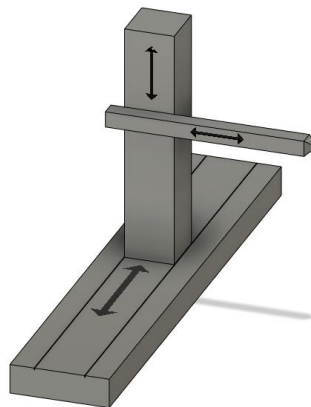
Tato konfigurace je vhodná pro měření velkých dílů o rozměrech v řádech metrů. Výhodou této konfigurace je velký měřicí prostor, který je dobře přístupný obsluze. Nepohyblivé postranní pilíře jsou solidní, aby zajistily stabilitu při měření. Pohyblivý je pouze horní rám a díky tomu jsou nižší momentové účinky na celou konstrukci. [1]



Obrázek 4 Schéma CMM mostového typu

CMM s horizontálním ramenem

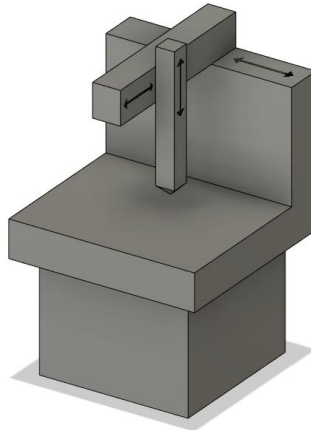
Základní provedení CMM s horizontálním ramenem se skládá z nosného sloupu umístěného na kolejnicích. Na nosném sloupu se nachází horizontální pohyblivé rameno. Tato konstrukce je vhodná do výrobních linek, například pro měření plechových součástí v automobilovém průmyslu. Pro lepší produktivitu je možné umístit dvě ramena proti sobě. [1]



Obrázek 5 Schéma CMM s horizontálním ramenem

Výložníkový CMM

CMM tohoto typu jsou zpravidla menší, vzhledem k tomu, že tato konstrukce by se při větších rozměrech mohla prohýbat pod vlastní vahou. Využití nachází hlavně v dílenském prostředí a jsou k tomu také patřičně navrhovány. Teplotní stabilita, ochrana proti prachu a vlhkosti nebo izolační obložení jsou důležitými parametry pro tento typ CMM. Výhodou je také snadný přístup k měřicí ploše a relativně snadné přemísťování celého stroje. [1]



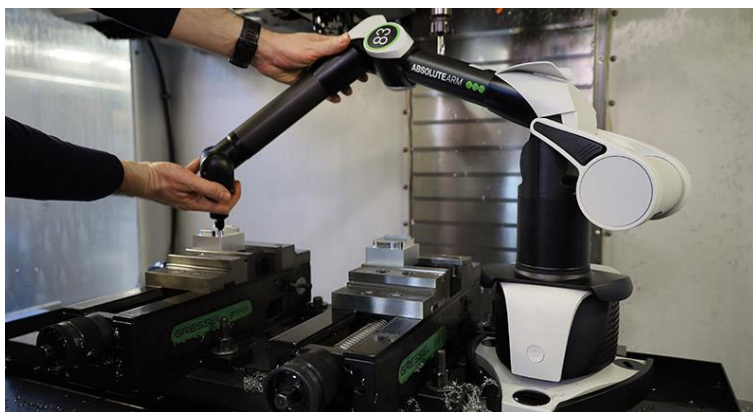
Obrázek 6 Schéma výložníkového CMM

2.1.2 Nekartézsky uspořádané souřadnicové měřicí přístroje

Tyto stroje zaznamenávají polohu měřených bodů v jiných souřadnicových systémech, než je kartézský. Může se jednat například o sférický souřadnicový systém. Při využití těchto souřadnicových systémů musíme počítat s úhlovou chybou měření, která se zvětšuje se vzdáleností měřeného bodu od osy rotace. [1]

Nekartézsky uspořádané CMM jsou realizovány například v podobě měřících ramen (Obrázek 7), kdy se měří úhel otočení jednotlivých kloubů ramen a tím se získá informace o poloze měřeného bodu. Dále jsou používány ruční měřicí přístroje, které mají dotykovou sondu a jejich poloha je snímána pomocí laseru, v takovém případě hovoříme o laser trackeru (Obrázek 8).

Velkou výhodou nekartézských CMM je jejich flexibilita. Tyto přístroje jsou zpravidla přenosné a některé vybaveny baterií. Tím pádem je možné provádět měření prakticky kdekoliv. Tato flexibilita přichází na úkor přesnosti, která je však plně dostačující pro mnoho aplikací. Pomocí laser trackeru můžeme měřit rozměrné díly, u kterých by konstrukce standardního kartézského CMM byla příliš nákladná a nepraktická. [1] Výhodou těchto zařízení je měřicí prostor, který není omezený konstrukcí stroje. Rychlost a částečně také přesnost samotného měření je závislá na obsluze, což může mít kladný i negativní efekt a zároveň je náročné měření plně automatizovat.



Obrázek 7 Měřící rameno [2]



Obrázek 8 Laser tracker [3]

2.2 Dotyková sonda

Dotyková sonda je klíčovou součástí souřadnicové měřicí techniky. Jedná se o komponent, který detekuje dotyk s měřenou součástí. Poloha tohoto dotyku je poté zaznamenána v souřadném systému CMM. Dotykové sondy dělíme na tvrdé, spínací a skenovací.

Důležitou součástí každé sondy, bez ohledu na typ je koncový snímač, který má standartně podobu kuličky. Jedná se o část sondy, která přichází do fyzického kontaktu s měřeným dílem. Snímač musí být odolný vůči mechanickému opotřebení, mít vysokou tvrdost, tvarovou přesnost a teplotní stabilitu. Mezi materiály používané pro výrobu koncových snímačů patří například rubín nebo nitrid křemíku.

Pevná sonda

Jedná se o tuhou konstrukci, kde je snímač v podobě kuličky pevně přichycen pomocí dřívku. Tento typ sondy se používá ve spojení s měřicím ramenem. Výhodou této sondy je její tuhost a jednoduché použití, ale opakovatelnost a přesnost měření je silně závislá na obsluze. Každý operátor zařízení s tímto typem sondy má různý způsob obsluhy, přivádění sondy k měřenému dílu a sílu, kterou na

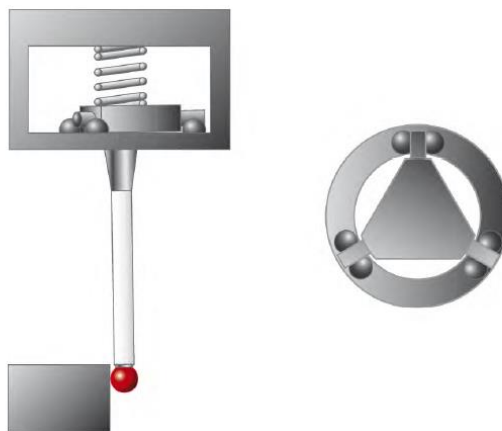
sondu působí. Z těchto důvodů se tvrdé sondy nevyužívají v sériové výrobě, kde vyžadujeme vysokou přesnost a opakovatelnost měření. [4]



Obrázek 9 Pevná sonda [5]

Spínací sonda

Spínací sonda aplikuje kinematické principy, které zvyšují přesnost měření. Základní konfigurace spínací sondy se skládá z talířku se třemi válečky, každý umístěný mezi dvěma kuličkami (Obrázek 10). Tímto způsobem jsou omezeny všechny stupně volnosti. Na talířek je napojený dřík se snímačem. Talířek je uchycen pomocí pružiny, která po dotyku s měřeným dílem navrátí celý mechanismus do původní polohy. Skrze kontakty je veden elektrický obvod, který generuje signál při vychýlení dříku z výchozí pozice. Toto vychýlení dává také souřadnicovému stroji čas na zpomalení a následné zastavení pohybu. Uspořádání kontaktů způsobuje, že síla potřebná pro detekci dotyku je rozdílná v závislosti na směru kontaktu s měřeným dílem. Tyto rozdíly v působící síle mají za následek různé vychýlení dříku. Tento problém řeší kalibrace sondy před začátkem měření. Spínací sondy mají solidní konstrukci a mohou být velice kompaktní a díky tomu jsou vhodné pro většinu měřících aplikací. [6] [7]

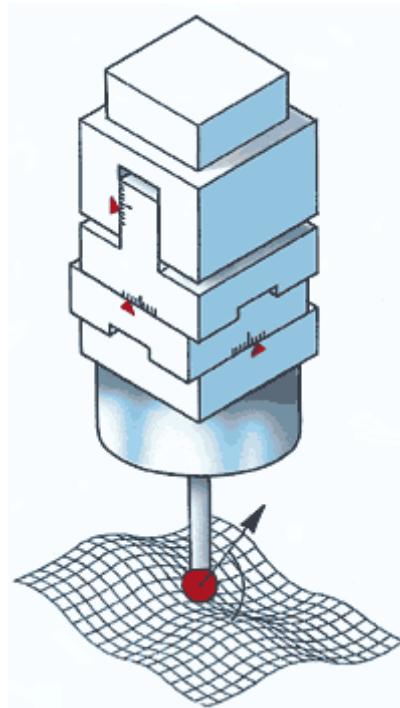


Obrázek 10 Schéma spínací sondy [6]

Skenovací sonda

Zatímco spínací sonda zaměřuje body jednotlivě, kdy po každém zaznamenaném bodu sonda přijede a zase odjede, u skenovacích sond dochází ke kontinuálnímu měření podél povrchu měřené součásti. Tím naměříme výrazně větší množství bodů a získáme jasnější informaci o tvaru, což je vhodné pro měření komplexních tvarů a kontur u kterých potřebujeme zajistit maximální přesnost. Použití skenovací sondy vyžaduje od základu odlišný přístup ke strategii měření a je důležitá synergie sondy a řídicího systému souřadnicového stroje.

Skenovací sondu (Obrázek 11) tvoří několik pohyblivých částí, které umožňují pohyb dříku se snímačem ve všech směrech. Při měření spínací sondou dojde při kontaktu s měřeným dílem k vyklonění snímače, oproti tomu u skenovací sondy dojde k jeho posunutí. Toto posunutí způsobí detekci kontaktu, dá stroji čas na zastavení a zabrání ohnutí dříku. Po této detekci se sonda nastaví do původní pozice a zaznamená souřadnice dotyku. Pokud se sonda pohybuje velkou rychlostí, může se předsunout ve směru pohybu a souřadnicový stroj má poté více času na zpomalení. [6] [8]



Obrázek 11 Skenovací sonda [9]

2.2.1 Příklady dotkových snímacích systémů

ZEISS VAST XTR gold (Obrázek 12) patří také mezi skenovací sondy. Výsadou tohoto systému je integrovaný otočná kloub, který umožňuje automaticky otáčet dřík sondy po 15° inkrementech. [10]

ZEISS VAST gold (Obrázek 13) je skenovací sonda vhodná pro většinu měřících aplikací. Tato sonda umožňuje úpravu kontaktní síly, která tak vůči součásti zůstává při měření konstantní, bez ohledu na směr dotyku. [10]



Obrázek 12 ZEISS VAST XTR gold [10]



Obrázek 13 ZEISS VAST gold [10]

ZEISS VAST XXT s otočnou hlavou *ZEISS RDS* (Obrázek 14) je flexibilní snímáčí systém, který kombinuje skenovací sonda s otočnou hlavou, která má rozsah $\pm 180^\circ$ ve vodorovné i svislé ose s nejmenším úhlovým posunem $2,5^\circ$. Tento systém je vhodný pro komplexní díly se složitou geometrií, kde by bylo měření jednoduchou sondou časově náročné nebo dokonce nemožné. [10]



Obrázek 14 ZEISS VAST XXT [10]

Renishaw REVO (Obrázek 15) je snímáčí systém, který pro měření používá pět řízených os, tři osy samotného CMM a dvě rotační osy hlavy. V těchto osách se celé zařízení aktivně pohybuje za účelem měření dané součásti. Tento systém minimalizuje silové účinky setrvačnosti stroje tím, že CMM se pohybuje pomaleji a systém REVO vykonává rychlé rotační pohyby. Tím může dojít ke značnému zefektivnění a zrychlení celého procesu měření. [11]



Obrázek 15 Renishaw REVO [11]

HP-THDe (Obrázek 16) je spínací sonda, která disponuje opto-mechanickou konstrukcí, která je schopná detekovat pohyb v řádech nanometrů. Další funkcí této sondy je adaptivní spínání, které umožňuje upravit parametry spínání v závislosti na nasazeném snímači. [12]



Obrázek 16 HP-THDe [12]

2.3 Bezdotykové snímací systémy

Bezdotykové snímací systémy získávají informace o měřené součásti analýzou specifického proudu fotonů. Tyto fotony mohou mít například podobu laseru, strukturovaného světla nebo rentgenového záření. Nekontaktní snímací systémy jsou velice produktivní, což se týče obstarání velkého množství dat, respektive zaměření velkého počtu bodů, za krátký čas. Tyto systémy nedosahují takových přesností jako souřadnicové měřicí stroje, ale právě vyšší množství zaměřených bodů nám může dát lepší představu o tom, jak měřený díl skutečně vypadá, a to hlavně u obecných tvarových ploch. Nekontaktní snímací systémy nachází své uplatnění v oblastech kontroly kvality a jsou klíčové pro reverzní inženýrství.

2.3.1 Průmyslové CT

CT (Computed Tomography) neboli výpočetní tomografie je metodou měření, která využívá rentgenového záření k získání informací o vnější geometrii a vnitřních vlastnostech dílu. Tyto informace

je možné získat při jednom měření a data o vnitřní struktuře jsou získána nedestruktivním způsobem. Pomocí CT systémů je možné odhalit póry, dutiny a praskliny ve struktuře měřené součásti. Tyto systémy jsou vhodné také na kontrolu sestav, kdy máme možnost analyzovat, jak do sebe jednotlivé díly zapadají ve složeném stavu. Nevýhodou CT je velice obtížné stanovení nejistoty měření kvůli mnoha faktorům, které celý proces měření ovlivňují. [13]

Princip měření je následovný. Měřený díl je ozářen rentgenovým zářením. Toto záření projde přes díl a následně na detektor. Podle toho, jaký útlum záření nastal při průchodu dílem, dostaneme informaci o měřeném dílu. Tato informace má podobu dvou rozměrného obrazu tzv. grey image. Tento proces je opakován z více úhlů, pomocí otočného stolu, na kterém je díl umístěn. Z těchto dvourozměrných obrázků je matematickou rekonstrukcí vytvořen trojrozměrný model z voxelů (voxel je 3D obdoba pixelu). Model je nakonec podroben postprocesingu, po kterém dostaneme finální výsledek měření. [14]

Průmyslové CT stroje nachází využití v mnoha odvětvích, od automobilového průmyslu, přes letecký, až po potravinářský. V aplikacích, jako je kontrola svarů, kompozitních dílů, odlitků, nebo dílů vyrobených aditivními technologiemi.

Příkladem je například stoj Phoenix X|cube od společnosti Waygate Technologies (Obrázek 17).



Obrázek 17 Phoenix X|cube [15]

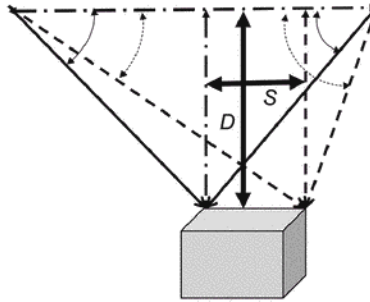
2.3.2 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je metodou trojrozměrného měření pomocí fotografií. Při pořizování fotografie v podstatě zaznamenáváme trojrozměrný objekt do dvourozměrné fotografie. Tím samozřejmě ztrácíme spoustu informací, a to hlavně o hloubce obrazu. Dalo by se říci, že fotogrammetrie je opačný proces k procesu pořizování fotografie. Snažíme se z dvourozměrné fotografie dostat k trojrozměrnému modelu. K tomu nám ovšem nestačí pouze jedna fotka, ale minimálně dvě, a to pouze v případě, že by tento proces byl ideální.

Reálné měření probíhá následovně. Na měřený díl se rozmístí referenční body, pokud se jedná o větší díl, tak je vhodné pro zlepšení přesnosti umístit k dílu i referenční tyč, která má přesně daný rozměr.

Následně pořídíme kamerou několik snímků ze všech možných a vhodně vybraných úhlů. Je důležité, aby každý referenční bod byl vyfocen na více snímcích, protože právě díky tomu bude software schopen určit vzájemnou polohu těchto snímků. [16]

Tato metoda snímání bodu z různých úhlů se nazývá triangulace. Schéma je znázorněno na Obrázku 18. Pokud k měření využíváme pouze okolní světlo, které není nijak upraveno, strukturováno a cíleně nasměrováno, tak hovoříme o tzv. pasivní triangulaci. [17]



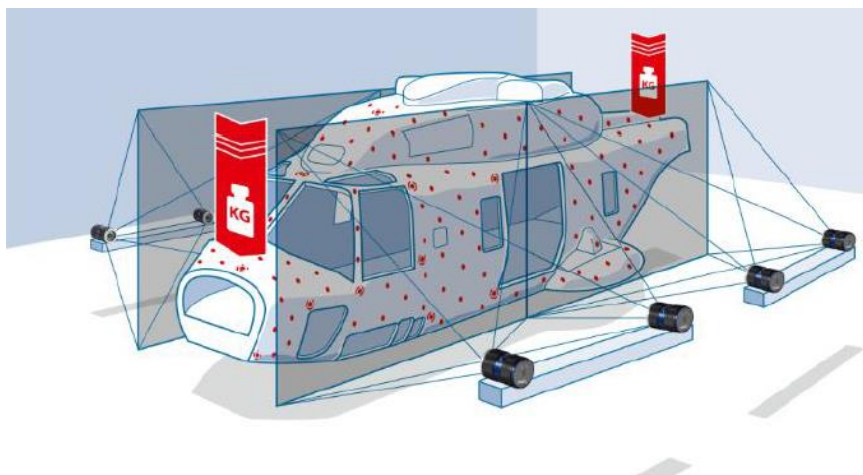
Obrázek 18 Schéma triangulace [17]

Systémy využívající fotogrammetrie jsou vhodné hlavně na měření větších objektů. Velkou výhodou fotogrammetrie je menší náchylnost na světelné podmínky, oproti například laser skeneru. Fotogrammetrie je možné využít při kontrole geometrie součástí, ale také při mechanických zkouškách jednotlivých dílů i celých strojů, kdy můžeme zaznamenat deformaci při silovém působení. Praktickým příkladem použití fotogrammetrie je Obrázek 19, kde měření turbíny probíhá ručně pomocí fotoaparátu. [18]



Obrázek 19 Snímání fotek turbíny [18]

Dalším praktickým využitím je zátěžový test trupu helikoptéry. Schéma měření je na Obrázku 20. Měření probíhalo pomocí několika kamer připevněných na rám. [18]



Obrázek 20 Schéma měření deformace trupu helikoptéry při zátěžovém testu [18]

Konkrétní systémy pro měření mají různá provedení. Jedná se například o set od společnosti Hexagon s názvem DPA Industrial (Obrázek 21) nebo doplněk v podobě kamery na 3D skener ATOS od společnosti Zeiss (Obrázek 22). [19] [20]



Obrázek 21 DPA Industrial [19]



Obrázek 22 ATOS PLUS 45M [20]

2.3.3 Laser skener

Laser skener je zařízení, které umožňuje měřit povrch součásti pomocí triangulace. Triangulační trojúhelník tvoří zdroj laseru, kamera a měřený díl. Laser je projektován na měřenou součást, většinou v podobě bodového paprsku, přímky nebo několika rovnoběžných přímek. Tuto projekci následně snímá kamera. Tento proces je několikrát opakován z více úhlů. Protože je snímané světlo strukturované a cíleně vysílané, hovoříme o tzv. aktivní triangulaci.

Laser je používán z toho důvodu, že je relativně jednoduché vytvořit úzký paprsek i na dlouhou vzdálenost. Laser je také velice koncentrovaný a monochromatický zdroj světla, což usnadňuje jeho detekci a snižuje vliv okolního světla na měření. Právě detekce paprsku přináší hned několik problémů, se kterými se musí výrobci laser skenerů vypořádat. Samotný bodový paprsek není bezrozměrný. V závislosti na měřícím rozsahu se jedná i o stovky mikrometrů. Je tedy klíčové zaměřit střed tohoto paprsku. Při dopadu laserový paprsek nevypadá jako kruh, nýbrž dojde k jeho rozptýlení. U Drsných nebo lesklých povrchů má toto rozptýlení výrazný vliv na přesnost měření. Detekci zkomplikuje také dopad laseru na hranu objektu, kdy zaměříme pouze část paprsku a dochází k chybnému určení pozice měřené hrany. Tyto problémy jsou řešeny pomocí propracované optiky, fotodiodami, které detekují rozptýlení a využitím více kamer. Pomoci může také použití světla s kratší vlnovou délkou. [17]

Laser skener má mnoho provedení. Mezi ně patří například skenovací hlava na CMM Nikon L100 (Obrázek 23) nebo ruční skener od firmy Zeiss T-Scan hawk (Obrázek 24).



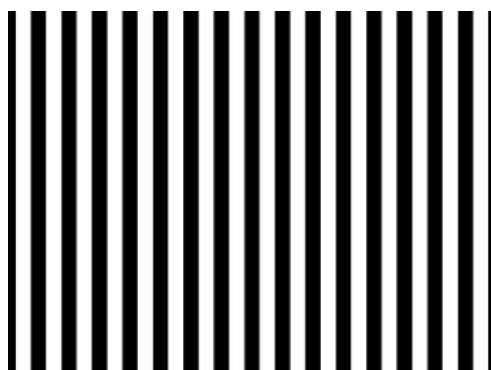
Obrázek 23 Nikon L100 [21]



Obrázek 24 T-Scan hawk [22]

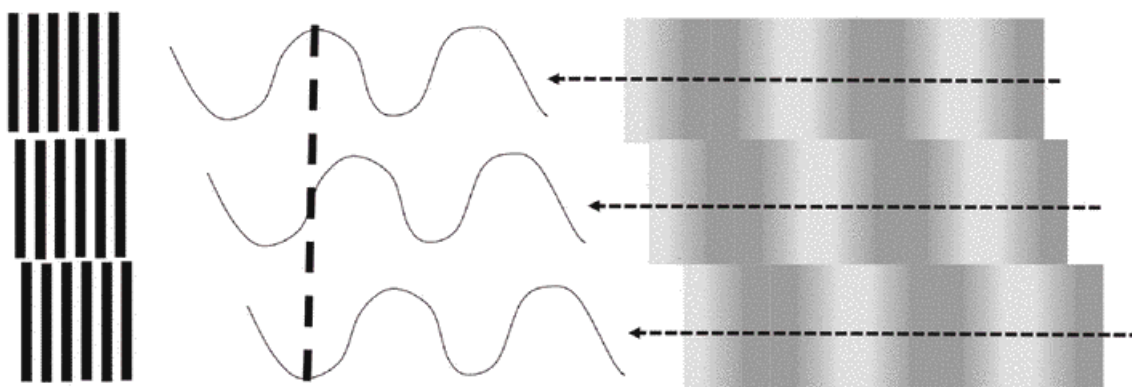
2.3.4 Pruhová projekce

Skenery pracující pomocí pruhové projekce fungují na principu aktivní triangulace. Na měřenou součást je promítán vzor pomocí LCD nebo LED projektoru, který je následně snímán kamerou. Software porovná promítaný a nasnímaný obraz a určí polohu jednotlivých bodů. Promítaný vzor hraje klíčovou roli a odvíjí se od něj rychlost, rozlišení a celková přesnost měření. Ve většině případů se jedná o soustavu rovnoběžných pruhů s pravidelně se střídající intenzitou (Obrázek 25). [17] [23]



Obrázek 25 Schéma promítaného vzoru při měření pruhovou projekcí

Na projektované světlo se můžeme dívat jako na elektromagnetické vlnění se sinusovým průběhem. Nejmodernější systémy využívají fázového posunu této vlny pro docílení velice přesného měření. Fáze vlny v jakémkoliv bodě odpovídá pozici promítaného vzoru, ale pokud sledujeme intenzitu pouze jednoho bodu, tak nedostaneme dostatečnou informaci o jeho poloze. Ovšem pokud vzor posuneme o vzdálenost menší, než je perioda dané sinusoidy, tak jsme schopni sledovat, jak se intenzita v daném místě mění a jsme schopni přiřadit pozici promítaného vzoru ke každému bodu na měřeném objektu. [17]



Obrázek 26 Schéma posunu projekce, které vede ke změně fáze a ke změně snímané intenzity světla

Pruhová projekce nachází využití v oblastech kontroly kvality a reverzním inženýrství. Slouží ke skenování dílů o velikostech od jednotek až po desítky centimetrů. Využití nachází například při tvorbě prototypů v kombinaci s aditivními technologiemi, kontrole plastových dílů, kontrole tvarově komplexních licích forem a plechových dílů.

Mezi výhody této metody patří vysoká produktivita měření, schopnost získat velké množství dat za krátký čas a relativně velká plocha skenování. Nevýhodami může být náchylnost k okolním světelným podmínkám nebo špatná opakovatelnost měření.

Příkladem konkrétních průmyslových řešení je například ATOS Q od společnosti Zeiss (Obrázek 27) nebo PrimeScan od společnosti Hexagon (Obrázek 28).



Obrázek 27 ATOS Q [24]



Obrázek 28 PrimeScan [25]

2.3.5 Tepelná pruhová projekce

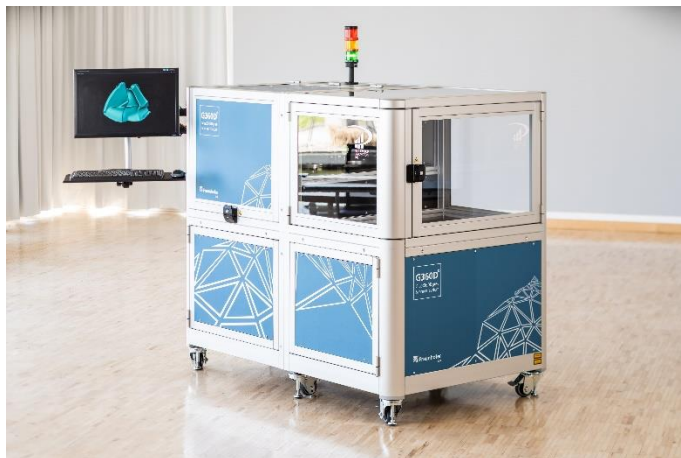
Výše představené metody jako je pruhová projekce, nebo laserové skenování jsou velice rozšířené v oblasti 3D měření. Tyto způsoby měření jsou silně závislé na optických vlastnostech měřeného objektu a jeho povrchu a využívají viditelné spektrum elektromagnetického záření. Tento fakt vychází ze samotného principu měření a je velkou komplikací u objektů, které jsou průhledné, průsvitné, reflexní nebo silně pohlcují světelné záření. Řešením je nanášení různých povlaků na měřený díl, aby se upravili optické vlastnosti dílu. Aplikace těchto povlaků a jejich následné odstranění je časově náročné a vnáší do měření chybu. Variantou řešení problematiky skenování průhledných objektů je právě tepelná pruhová projekce neboli Thermal fringe projection. [26]

Princip této metody spočívá v ozáření měřeného objektu laserem, čímž dojde ke zvýšení teploty povrchu a toto tepelné záření je následně snímáno dvojicí termokamer. Poloha měřeného bodu je zjištěna pomocí triangulace.

Přesnost měřená je dána teplotním rozdílem mezi ozářeným a neozářeným povrchem. Delší čas ozáření vytvoří větší teplotní kontrast, ale také zvětší tepelně ovlivněnou oblast a sníží přesnost měření. Pro docílení vysoké přesnosti je důležité využít výkonný laser a koncentrovaný paprsek. Právě soustředění laserového paprsku na co nejmenší plochu je jednou z obtíží této metody. Také fakt, že při měření dochází k ohřívání objektu nepřispívá k vysoké přesnosti. [27]

Zařízení s potenciálem pro průmyslové měření je Glass360Dgree (Obrázek 29) od společnosti Fraunhofer IOF, který dosahuje při měření skleněných dílů přesnosti až 10 μm a při měření dochází ke

změně teploty do 3°C. Systémy využívající tepelné pruhové projekce zatím nemají širší průmyslové využití a jsou hlavně předmětem výzkumu. [28]



Obrázek 29 Glass360Dgree [28]



Obrázek 30 Konfigurace kamer a laserového zdroje přístroje Glass360Dgree [28]

3 Kalibrace freeform artefaktu

Pro porovnání měřicích systémů jsou použity dva speciálně vytvořené artefakty, matný (Obrázek 31) a lesklý (Obrázek 32). Pojmem artefakt se v tomto případě rozumí díl, který nemá funkční použití a slouží jako určitý standart měření s přesně nadefinovanými rozměry. Freeform artefakt je takový artefakt, který je tvořen z obecné tvarové plochy. Obecným tvarem se rozumí tvar, který nepatří k základním geometrickým prvkům (jako je rovina, válec, koule, kužel, ...) a nelze jednoduše matematicky nadefinovat. Oba artefakty jsou vyrobeny ze slitiny hliníku EN AW 7075 a mají stejný tvar. Liší se ovšem v povrchové úpravě.



Obrázek 31 Matný artefakt



Obrázek 32 Lesklý artefakt

Lesklý artefakt byl po obrábění leštěn a následně eloxován. Eloxování je elektrochemický proces, při kterém dochází k vytvoření ochranné oxidové vrstvy na povrchu hliníkového dílu. Oxidová vrstva zlepšuje odolnost proti korozi, tvrdost a otěruvzdornost základního materiálu.

Po eloxování byl artefakt znovu vyleštěn. Při prvních měřeních bylo zjištěno, že tvarová plocha nedosahuje požadované přesnosti a nebylo dosaženo hladké spojitě plochy, a proto se proces leštění opakoval. Vrstva vzniklá eloxováním plnila svoji funkci a leštění bylo velice neefektivní pro vyhlazení nerovností na povrchu součásti. Před dosažením dodatečně hladké a spojitě plochy došlo k narušení povrchové vrstvy a jejímu postupnému odlupování. Povrchová vrstva byla nakonec odstraněna ponořením artefaktu do roztoku vody a chloridu sodného. Artefakt, nyní bez povrchové úpravy, byl leštěn voděodolnými brusnými papíry o drsnostech 800, 1000, 1200, 1500 a 2000. Posledním krokem v přípravě artefaktu bylo leštění leštící pastou GYEON Q2M Metal Polish. Tento proces se ukázal jako nejefektivnější pro dosažení maximální přesnosti a byl výsledkem mnoha experimentů s celou řadou leštících past s různými velikostmi částic.

Matný artefakt byl nejprve leštěn, poté tryskán částicemi Al_2O_3 (korund). Následně se provedlo eloxování, opět leštění a nakonec tryskání. Tryskání se provádělo pro zmatnění povrchu artefaktu, což vede k výraznému snížení odráženého světla a zlepšení přesnosti měření optickými metodami.

Cílem praktické části této práce je získat informace o obecné tvarové ploše artefaktů, která je tvořena prohlubní a výstupkem. Artefakt bude měřen pomocí dvou snímacích systémů:

- **Souřadnicový měřicí přístroj Zeiss Prismo**
- **Pruhové projekce Zeiss Comet**

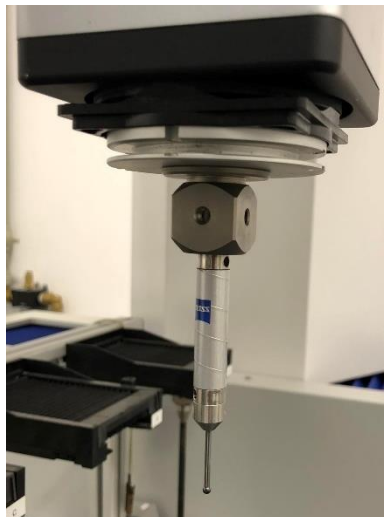
Jako referenční bude bráno měření strojem Zeiss Prismo, který disponuje řádově lepší přesností. Pro vyhodnocení měření bude vytvořen referenční model, který bude odpovídat reálnému stavu artefaktu a poslouží k porovnání výsledků získaných měřeními pruhovou projekcí.

3.1 Obecný postup kalibrace artefaktu

V této kapitole bude představen obecný postup kalibrace artefaktu a v další kapitole budou podrobně popsány konkrétní parametry konkrétních měření matného a lesklého artefaktu. Cílem kalibrace freeform artefaktu je vytvořit model, který bude odpovídat svými rozměry reálné součásti.

3.1.1 Příprava měření

Veškerá měření na CMM budou prováděna skrze software Zeiss Calypso. Před samotným měřením je důležitým krokem volba snímače. Nejčastěji se jedná o rubínovou kuličku. Při měření hliníkových dílů může docházet k tzv. adheznímu otěru, kdy se na povrchu kouličky usazuje hliník. Z toho důvodu byl zvolen snímač ve tvaru kuličky z nitridu křemíku (SiN) o průměru 3 mm. Konkrétní konfigurace je na Obrázku 33.



Obrázek 33 Konfigurace dotykového snímacího systému

Dále je zapotřebí provést tzv. kvalifikaci snímače, při které se určí přesný rozměr kuličky a její poloha v souřadném systému stroje. Nejprve se do snímací hlavy upne referenční snímač, pomocí kterého se definuje poloha referenční koule (Obrázek 34).



Obrázek 34 Referenční koule

Poté se do snímací hlavy upne snímač, kterým bude prováděno měření. Manuálně se provede dotyk s referenční koulí ve směru dříku. Následuje série dotyků, které stroj vykoná automaticky. Po kvalifikace snímače je přesně nadefinována jeho poloha v souřadném systému stroje.

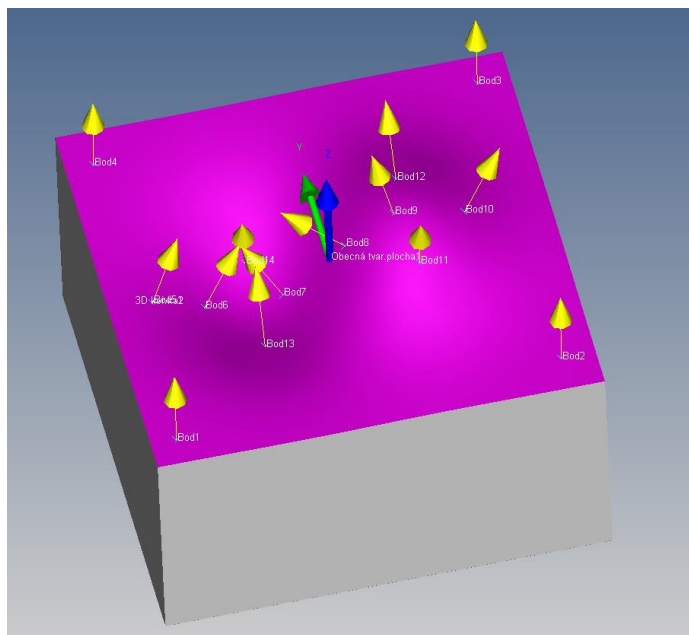
V neposlední se provede upnutí dílu do svěráku (Obrázek 35).



Obrázek 35 Svěrák pro upnutí artefaktu

3.1.2 Vytvoření strategie měření

Strategie pro první měření bude vytvořena na výrobním modelu artefaktu. Pro správné měření je nezbytné nadefinovat základní souřadný systém měřené součásti. V tomto případě se základní souřadný systém nadefinuje pomocí metody *3D připasování*, kdy jsou vhodně zvolené a manuálně naměřené body (Obrázek 36) připisovány ke CAD (Computer Aided Design) modelu. Poté stroj provede toto zaměření automaticky ve zvoleném počtu smyček (zvoleny 3 smyčky) a tím dojde k přesnému určení polohy artefaktu v souřadném systému stroje.

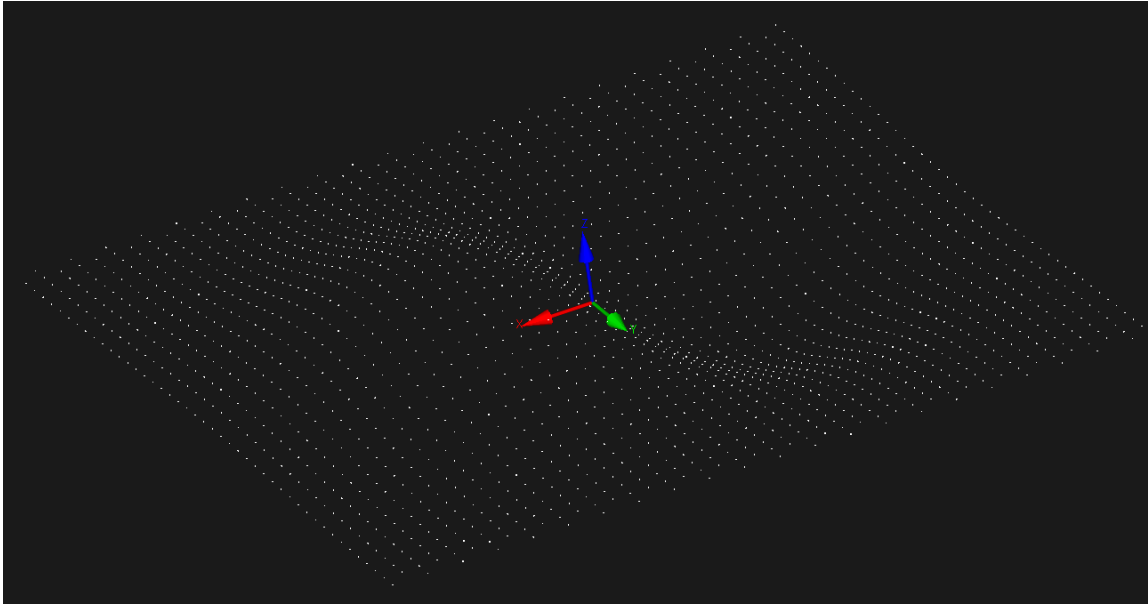


Obrázek 36 Body zvolené pro 3D připasování

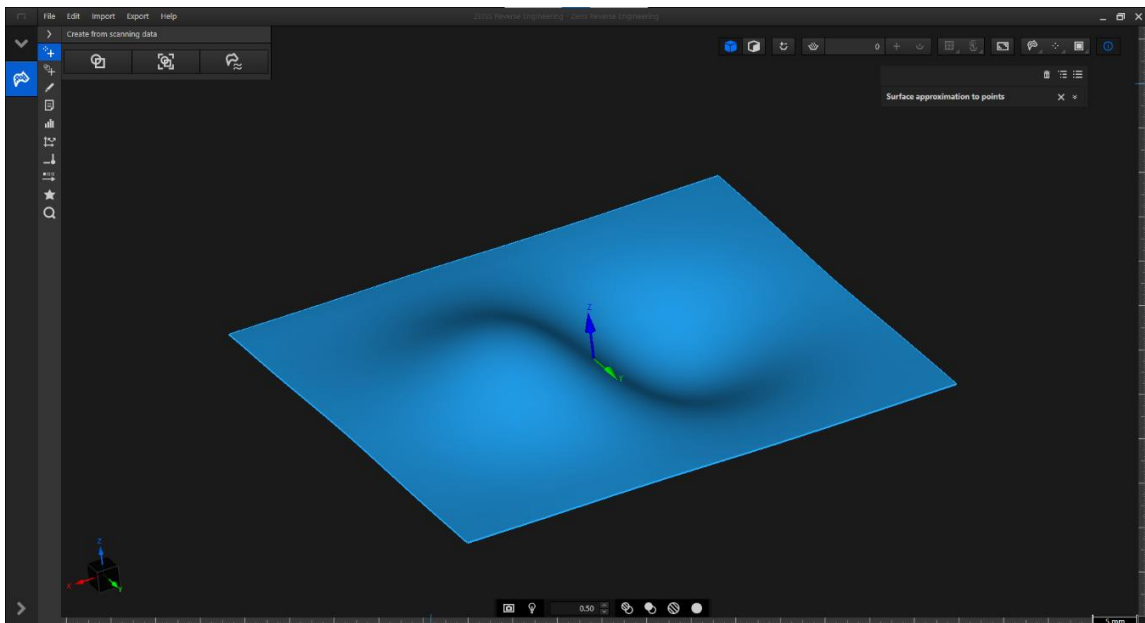
V momentě, kdy je měřený díl připasován, se může vytvořit samotná strategie měření. V softwaru Calypso se na ploše artefaktu vytvoří element *obecná tvarová plocha* a pravidelný rastr bodů, které budou měřeny ve spínacím režimu, kdy stroj po dotyku s dílem odjede a přemístí se k dalšímu bodu. Jedná o způsob časově náročnější oproti skenovacímu měření, při kterém snímač klouže po měřeném díle a v určitých intervalech zaznamenává body dotyku. Spínací způsob měření byl zvolen pro eliminaci možného sklouzávání snímače po hladkém povrchu artefaktu, které by způsobovalo nahodilou chybu měření.

3.1.3 Reverzní inženýrství obecné tvarové plochy

Reverzní inženýrství spočívá v rekonstrukci 3D modelu obecné tvarové plochy z naměřených dat. Naměřené body jsou exportovány z programu Calypso a následně importovány do softwaru pro reverzní inženýrství Zeiss Reverse Engineering. V softwaru se zobrazí mračno bodů (Obrázek 37), které pomocí funkce *Surface approximation to points* a volby vhodných parametrů, software proloží obecnou tvarovou plochou (Obrázek 38).

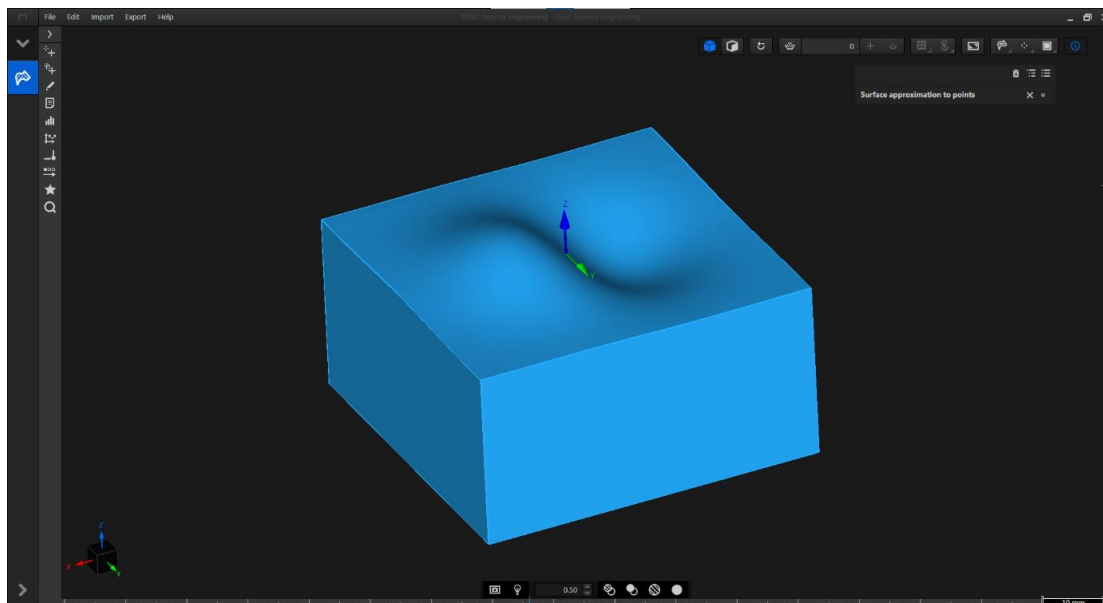


Obrázek 37 Mračno bodů získané měřením na CMM



Obrázek 38 Tvarová plocha vytvořená z mračna bodů

Vzniklou plochu jsem upravil tak, aby její okraje odpovídali okrajům skutečné součásti a zároveň model částečně reflektoval skutečný díl. To se provede pomocí funkce *Combine elements* a poté *Extrude solid body*. Ohraničení vzniklé plochy je vhodné z toho důvodu, že software vytvoří plochu částečně přetaženou ve směru krajních bodů, a to může způsobit nepřesnosti při dalším přizpůsobení a měření v softwaru Calypso. Vzniklý referenční model (Obrázek 39) je následně exportován ve formátu STL.



Obrázek 39 Referenční model vytvořený v softwaru Zeiss Reverse Engineering

3.1.4 Kontrolní měření obecné tvarové plochy

Posledním krokem celého procesu je kontrola rozměrové přesnosti nově vytvořeného modelu. Konkrétně bude sledována tolerance tvaru plochy, tedy vzdálenost dvou ekvidistantních ploch, mezi kterými leží námi naměřená plocha. Vyrovnání bude opět prováděno pomocí 3D připasování a měření bude probíhat ve spínacím režimu na předem zvoleném rastru 20x20 bodů ve vzdálenosti 4 mm od okraje plochy. Toto odsazení je zvoleno z toho důvodu, že cílem této práce je zkoumání tvarové plochy artefaktu, a ne jeho hran. Okraje mohou být zatíženy chybou špatného proložení krajních bodů plochou v procesu reverzního inženýrství.

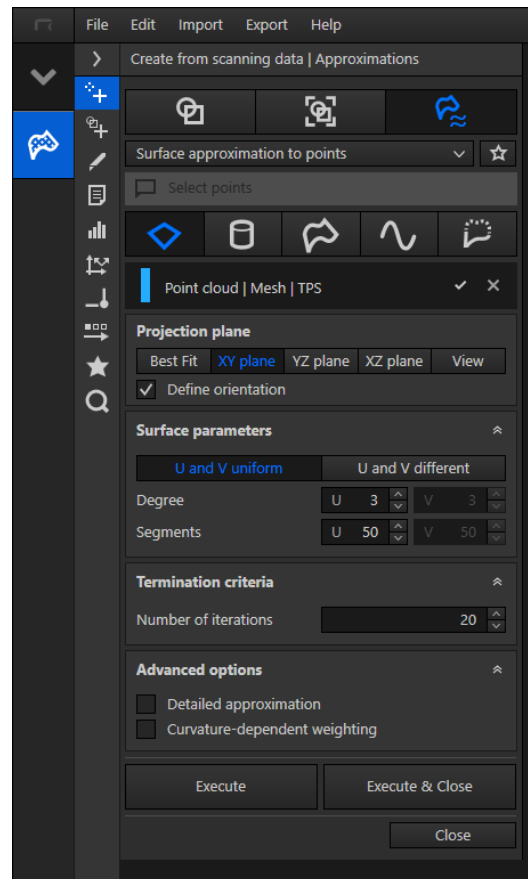
3.2 Parametry pro kalibraci matného artefaktu

Výše zmíněný postup byl prováděn v mnoha iteracích s více či méně uspokojivými výsledky. Proces obsahuje proměnné jako je počet bodů pro reverzní inženýrství a parametry vytvoření obecné tvarové plochy z mračna bodů, jako je stupeň polynomu a počet segmentů, ve kterých je plocha připisována k mračnu bodů.

Výsledky experimentální práce byly takové, že vhodným stupněm polynomu je stupeň 3 a ideální počet segmentů je 50. Při menším počtu segmentů došlo ke zhoršení přesnosti a při vyšším počtu segmentů byla přesnost stejná nebo horší v řádu desetin mikrometru. Zvýšení počtu bodů pro reverzní inženýrství vedlo ke zlepšení tolerance tvarové plochy. Toto zlepšení je dáno hlavně tím, že artefakt neměl dostatečně hladký a spojitý povrch. Zvýšení počtu bodů vedlo ke zmapování těchto nerovností, a tedy k přesnějšímu zachycení skutečného tvaru součásti. Nevýhodou měření většího počtu bodů je velice

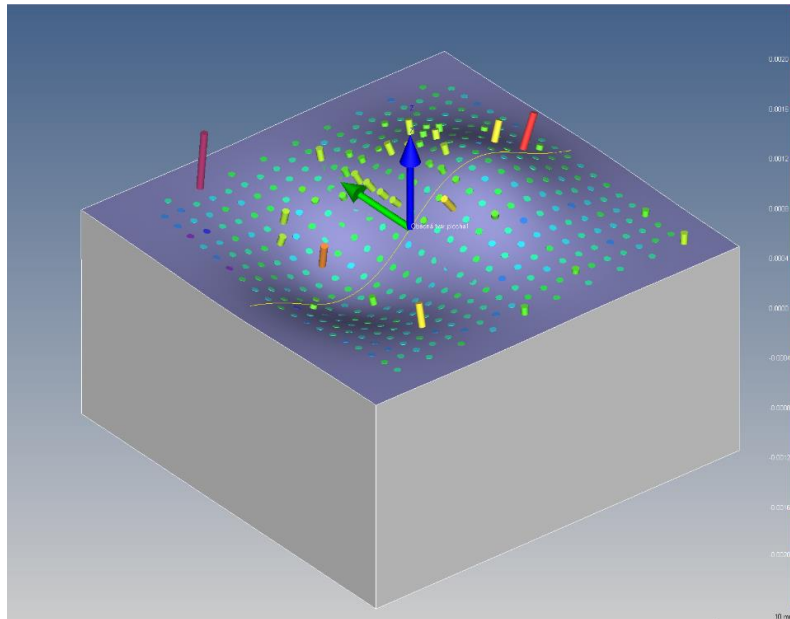
dlouhá doba měření, která v případě rastru 63x63 bodů byla 2 hodiny. Při takto dlouhém měření je klíčové zajistit stálou teplotu v laboratoři a zabránit tak teplotnímu driftu, který by ovlivnil měření.

Výsledné měření bylo provedeno vytvořením elementu *obecná tvarová plocha* s pravidelným rastrem 63x63. Naměřené body dotyku byly následně exportovány do softwaru Reverse Engineering a proloženy plochou s parametry, které jsou na Obrázku 40.



Obrázek 40 Parametry pro proložení naměřených bodů plochou

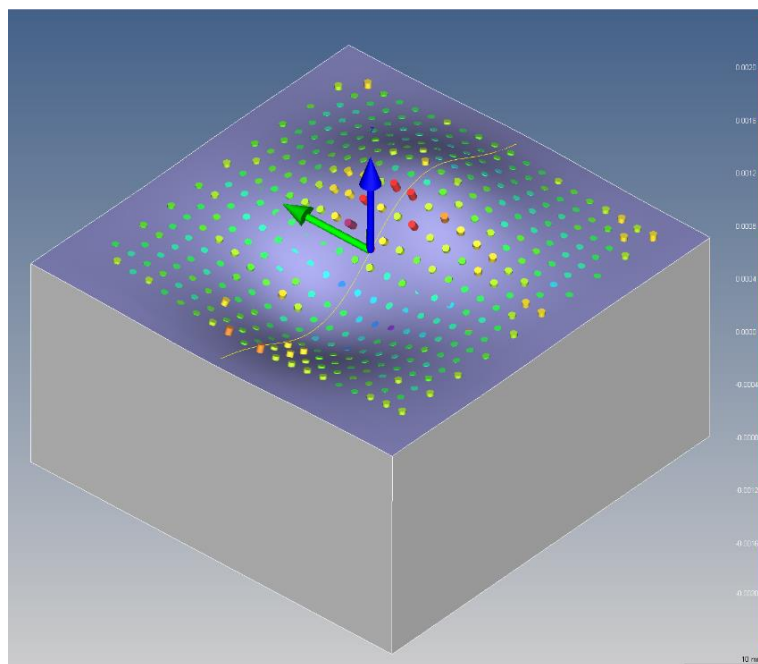
Následně byl model exportován ve formátu STEP a nahrán do softwaru Calypso. Zde byl znovu vyrovnán a bylo provedeno kontrolní měření na rastru 20x20. Výsledkem byla tolerance tvaru plochy 0,0058 mm a její grafické hodnocení je na Obrázku 41.



Obrázek 41 Grafické znázornění odchylek matného artefaktu

3.3 Parametry pro kalibrace lesklého artefaktu

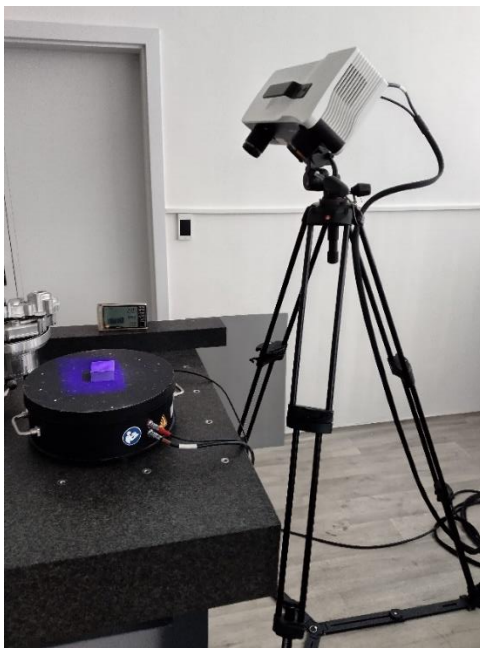
Kalibrace lesklého artefaktu začala opět vytvořením elementu obecná tvarová plocha, v tomto případě s rastrem 45x45 bodů. Body dotyku byly exportovány do softwaru Reverse Engineering a proloženy plochou s parametry stejnými jako pro matný artefakt (Obrázek 41). Následně byl model upraven a exportován do softwaru Calypso. Zde bylo provedeno kontrolní měření na rastru 20x20 bodů. Výsledkem byla tolerance tvaru plochy 0,0010 mm. Grafické hodnocení je na Obrázku 42. Bylo zjištěno, že pro získání takovéto přesnosti byl klíčový proces leštění.



Obrázek 42 Grafické znázornění odchylek na lesklém artefaktu

4 Plán měření pro pruhovou projekci

Měření bylo prováděno na zařízení Comet L3D 2 5M s objektivem o měřícím rozsahu 100 mm, doplněné otočným stolem. Zařízení je ovládáno pomocí softwaru Zeiss collin3D. Konfigurace měřícího systému je na Obrázku 43. Tato kapitola je zaměřená na vysvětlení postupu měření a vizuální porovnání naměřených dat s referenčním modelem. Konkrétní číselná data budou hodnocena v další kapitole.



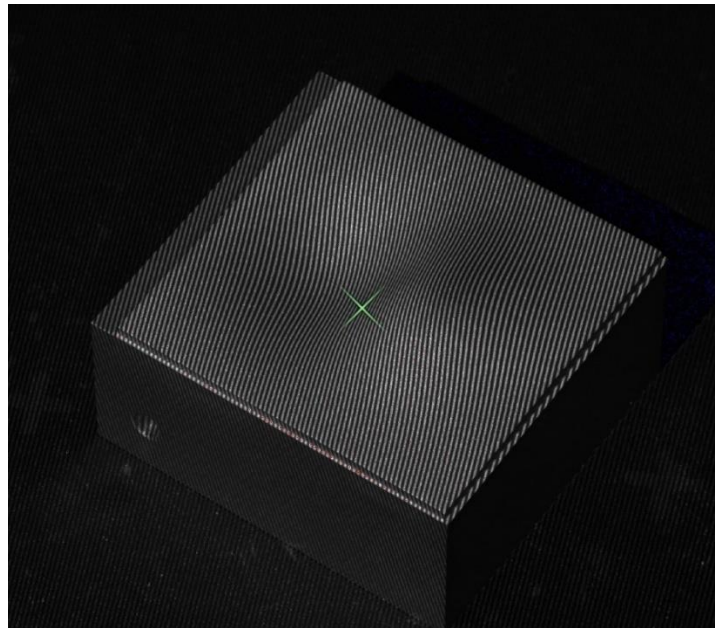
Obrázek 43 Konfigurace zařízení Zeiss Comet

Před začátkem měření byl stroj zkalibrován pomocí speciální kalibrační desky (Obrázek 44), která je v průběhu kalibrace nasnímá z několika nadefinovaných poloh.



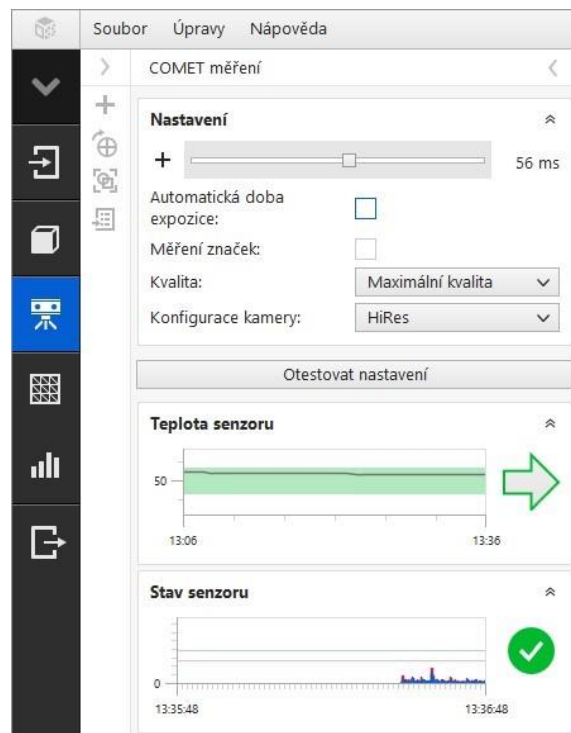
Obrázek 44 Kalibrační deska pro optické měření

Po kalibraci byla vhodně nastavena vzdálenost mezi měřeným artefaktem a zařízením Comet, tak aby se artefakt nacházel v měřícím rozsahu objektivu (Obrázek 45)



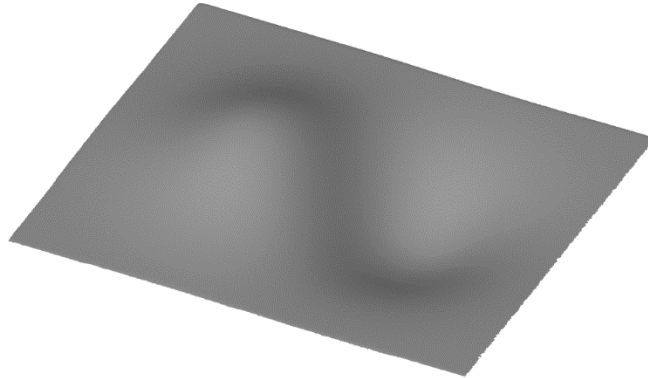
Obrázek 45 Artefakt skrze objektiv zařízení Zeiss Comet

Měření bylo provedeno pro oba artefakty stejně, a to v deseti pozicích na otočném stole v pravidelných intervalech 36°. V každé pozici byl artefakt naskenován a výsledný mrak bodů se tedy skládal z deseti jednotlivých skenů. Parametry skenování jsou zobrazeny na Obrázku 46.



Obrázek 46 Parametry skenování

Po dokončení měření byl proveden postprocessing naměřených dat, který se skládal z odstranění bočních stran artefaktu tak, aby zůstala pouze vrchní tvarová plocha a následné převedení mračna bodů na trojúhelníkovou síť a její export ve formátu STL. Výsledná plocha je na Obrázku 47.



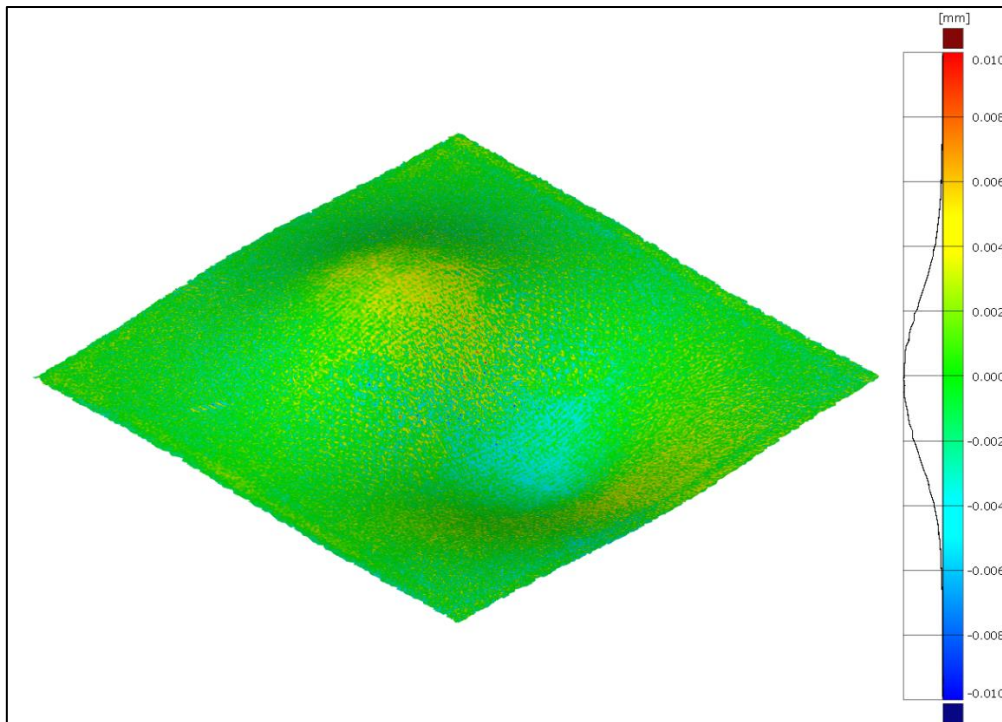
Obrázek 47 Plocha získaná měřením na zařízení Comet

Tato plocha byla následně porovnána s referenčním modelem, který vycházel z dat získaných souřadnicovým měřicím strojem. Připasování těchto dvou modelů proběhlo pomocí funkce Best fit v programu GOM Inspect, ve kterém byla naměřená data zároveň vyhodnocena.

4.1 Měření lesklého artefaktu

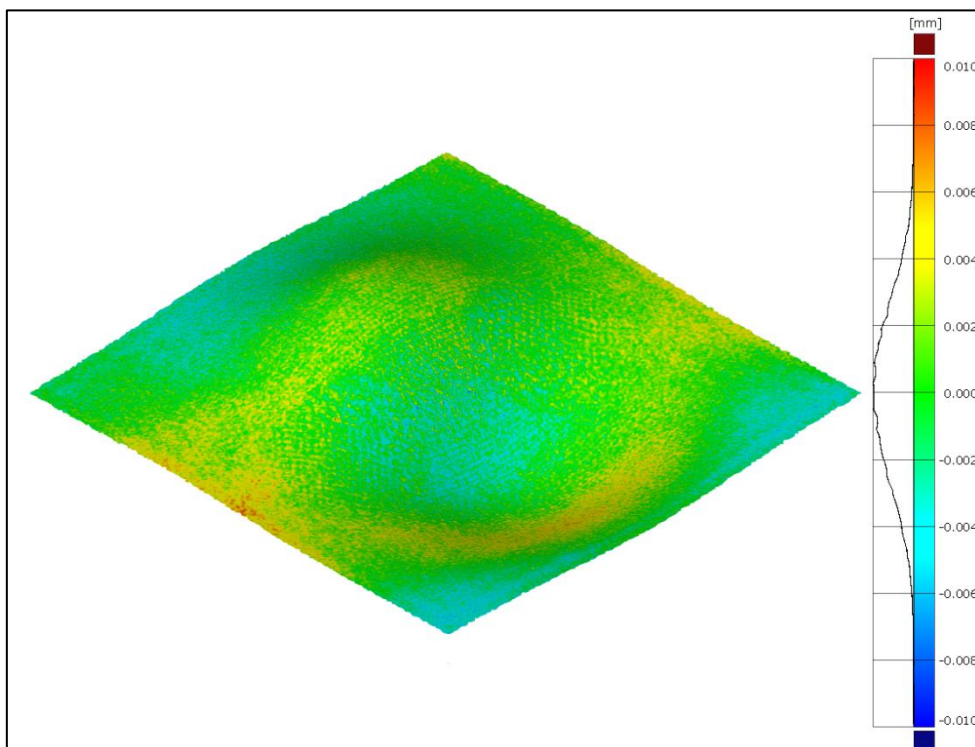
Na lesklý artefakt bylo zapotřebí před měřením nanést zmatňující sprej ATTBLIME AB2, který má antireflexní účinek a snižuje tedy eliminuje vznik odlesků od povrchu artefaktu. Odlesky výrazně snižují přesnost skenování a v krajním případě měření znemožňují úplně. Jedná se o sublimující sprej, který by měl na měřené součásti vydržet 1–2 hodiny. Vrstva nástřiku není bezrozměrná a je zapotřebí počítat s tím, že její aplikací vytváříme chybu měření, kterou je ovšem velice náročné kvantifikovat, protože závisí na konkrétní aplikaci nástřiku uživatelem. Při nanášení bylo snahou nanést co možná nejtenčí vrstvu, která by ovšem dostatečně zakryla lesklý povrch artefaktu.

Při prvním nanesení zmatňujícího spreje byla vrstva velice slabá a bylo provedeno pouze jedno měření. Po tomto měření došlo k částečné sublimaci spreje a vzniku skvrn, které odhalily lesklý povrch artefaktu. Výsledek tohoto měření je zobrazen na barevné mapě (Obrázek 48), kde jsou zachyceny odchylky od referenčního modelu. Pro přehlednost bude toto měření označováno jako nulté. Po měření byl nástřik z artefaktu odstraněn a nanesen znovu.

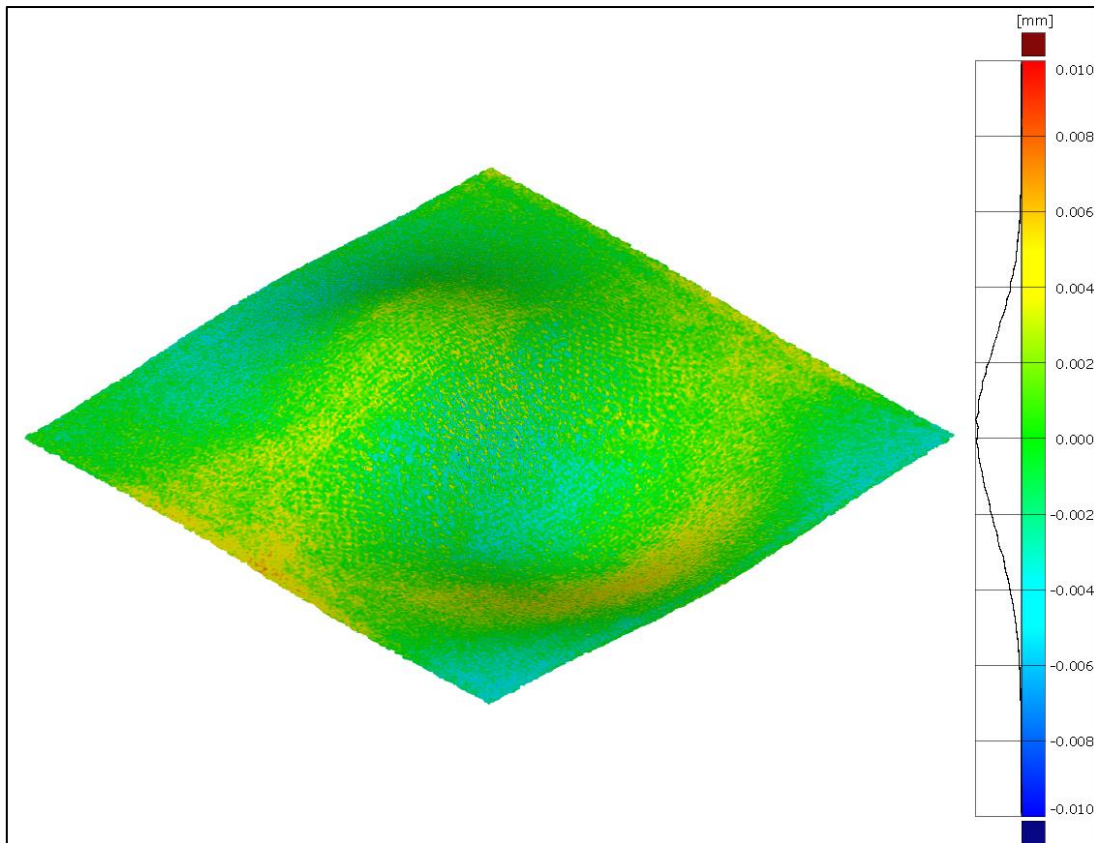


Obrázek 48 Barevná mapa pro nulté měření lesklého artefaktu

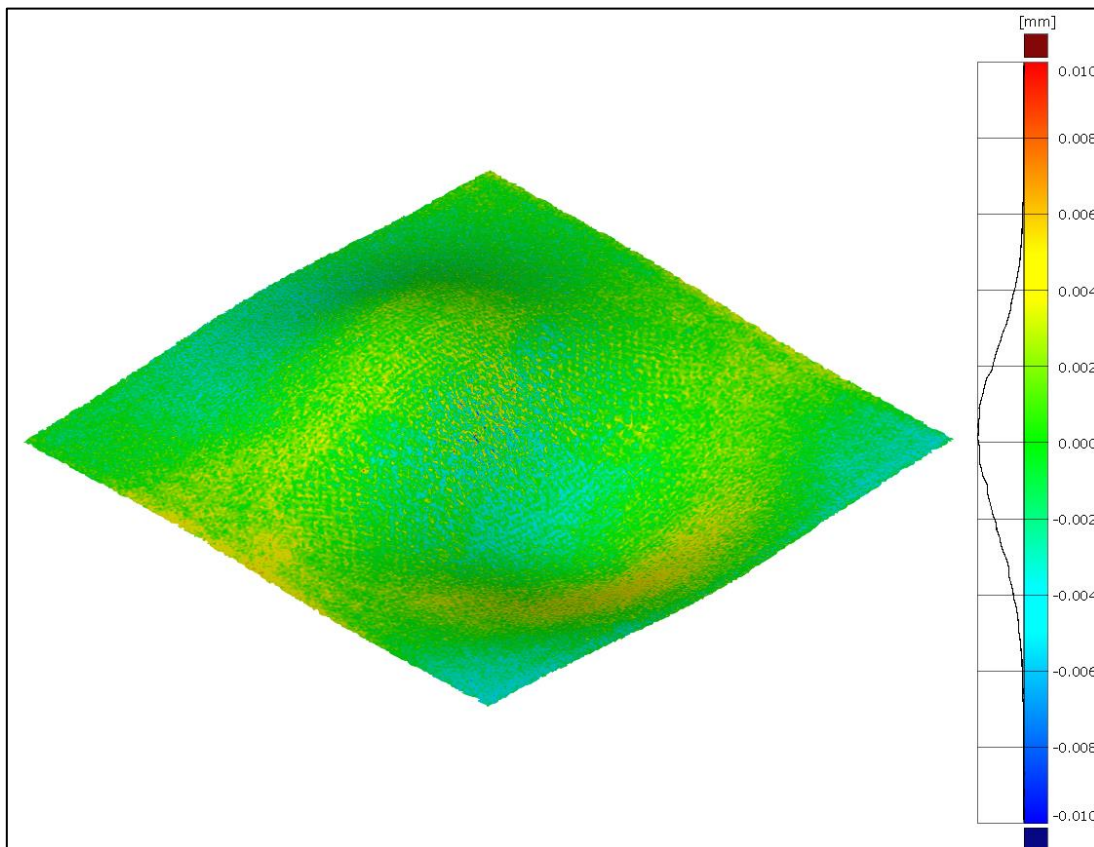
Po nové aplikaci nástřiku bylo provedeno 5 měření a jejich porovnání s referenčním modelem je vyobrazena na následující barevných mapách.



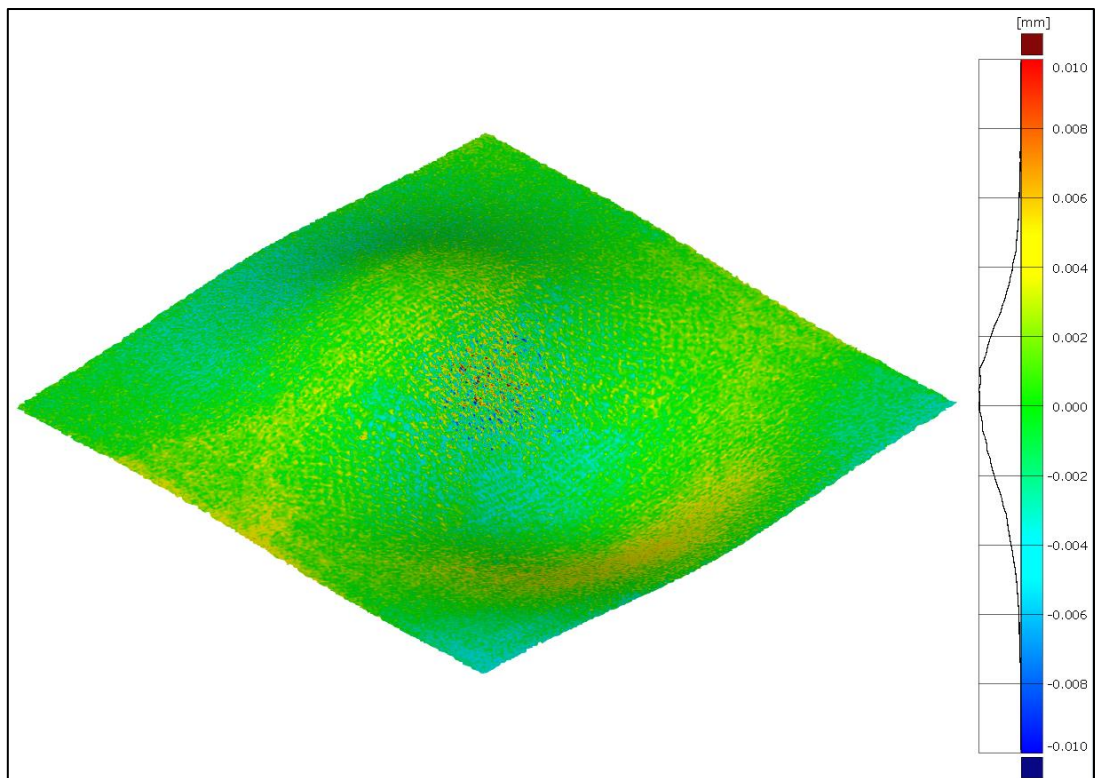
Obrázek 49 Barevná mapa pro 1. měření lesklého artefaktu



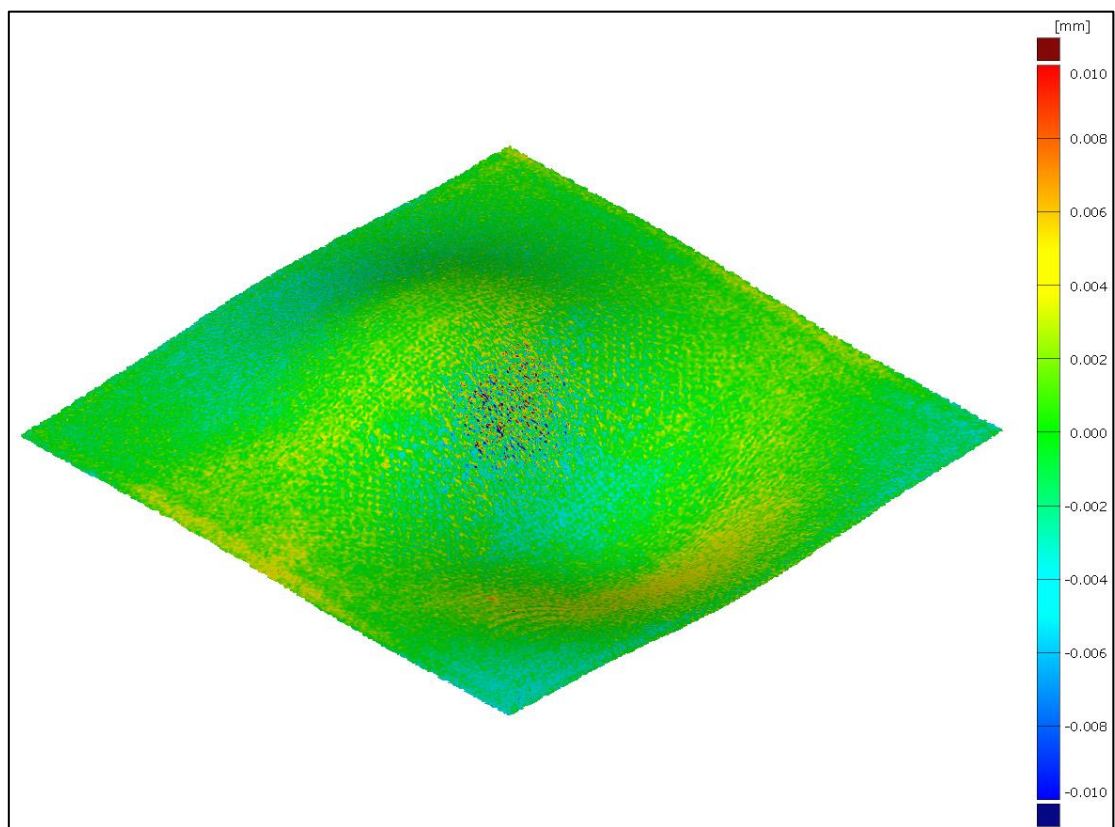
Obrázek 50 Barevná mapa pro 2. měření lesklého artefaktu



Obrázek 51 Barevná mapa pro 3. měření lesklého artefaktu



Obrázek 52 Barevná mapa pro 4. měření lesklého artefaktu

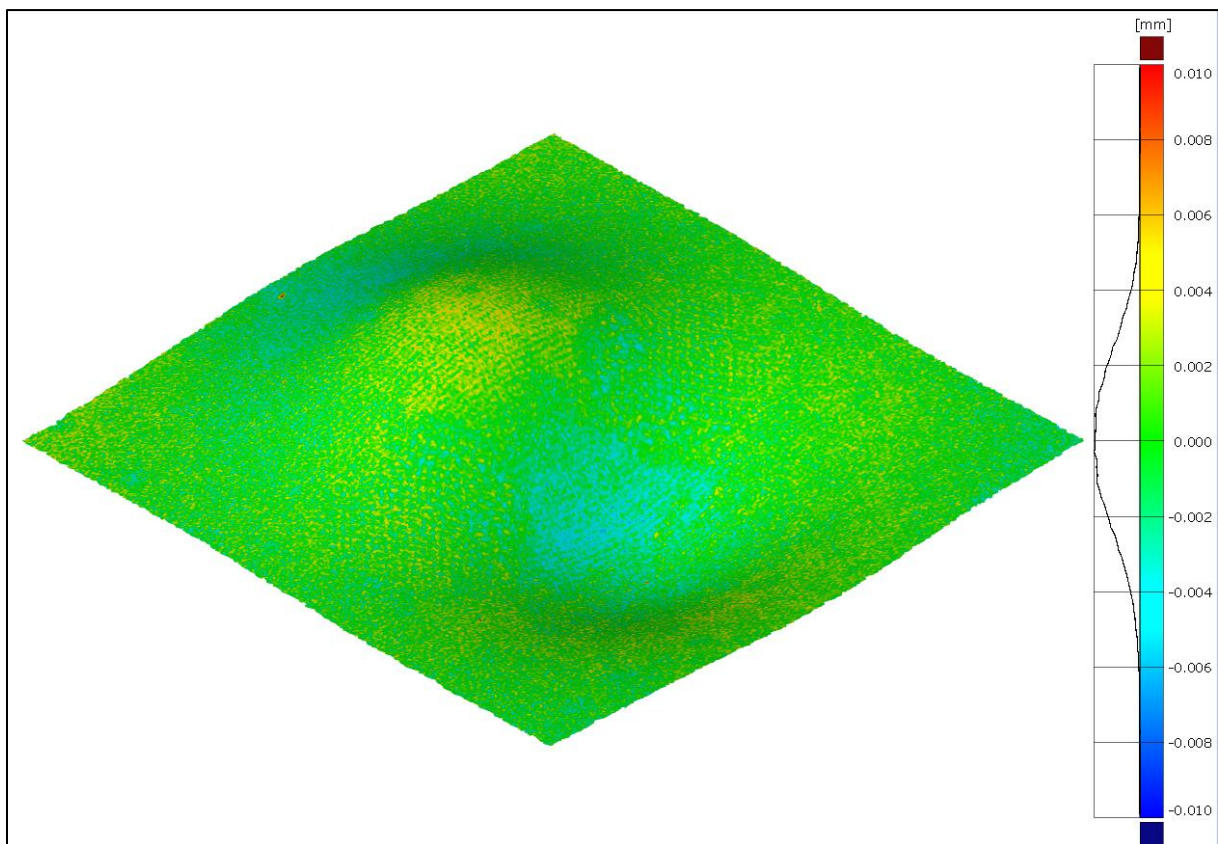


Obrázek 53 Barevná mapa pro 5. měření lesklého artefaktu

Z těchto obrázků je patrné, že během měření docházelo k sublimaci spreje. Nejvíce v oblasti přechodu mezi prohlubní a výstupkem artefaktu, kde byla nanesená vrstva s největší pravděpodobností nejslabší.

4.2 Měření matného artefaktu

Matný artefakt bylo možné naměřit bez použití speciálního spreje a bylo provedeno 5 měření. Data získaná těmito měřeními si byla velice podobná a porovnání barevných map jednotlivých měření nepřináší další vědecký účel. Detailnější porovnání dat bude provedeno v další kapitole, a proto je zde zobrazena pouze barevná mapa prvního měření (Obrázek 54). Z barevné mapy vyplývá, že největší chyby měření se nachází na vrcholu výstupky a na dně prohlubně artefaktu.



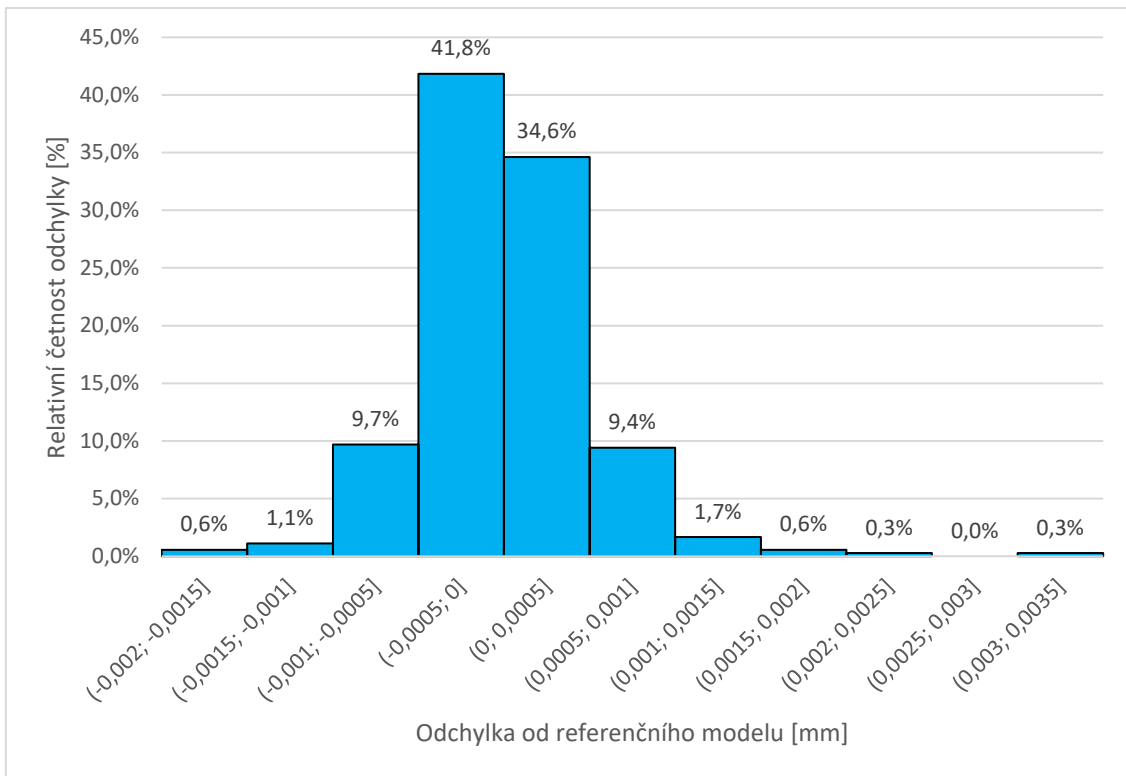
Obrázek 54 Barevná mapa pro 1. měření matného artefaktu

5 Vyhodnocení měření obecné tvarové plochy

Pro názorné porovnání výsledků měření jsou použity histogramy, které zachycují četnost odchylek měřených bodů od referenčního modelu.

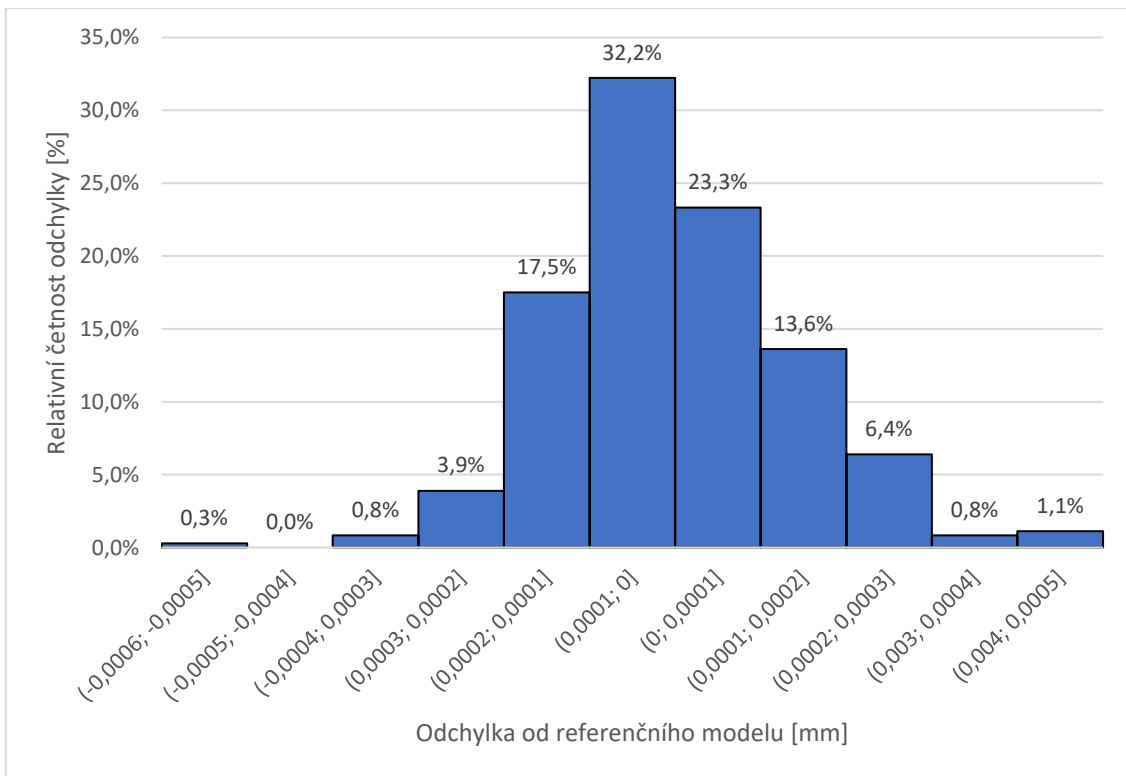
5.1 Dotykové měření

Při dotykovém měření pomocí CMM byl na matném artefaktu naměřen mrak bodů, který spadá do tolerance tvaru plochy 0,0058 mm a rozložení odchylek je zobrazeno v Grafu 1. Z Grafu 1 vyplývá, že přibližně 96 % odchylek se nachází v rozmezí od $\pm 0,001$ mm.



Graf 1 Četnost odchylek pro dotykové měření matného artefaktu

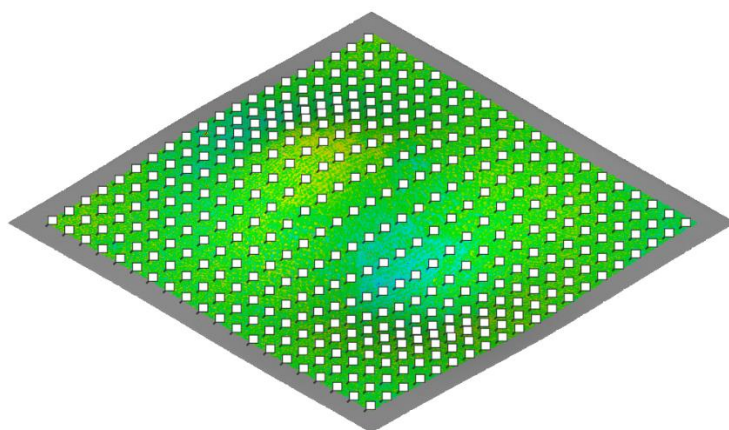
Pro lesklý artefakt byly naměřené body v toleranci tvaru plochy 0,0010 mm a zastoupení odchylek je zobrazeno v Grafu 2.



Graf 2 Četnost odchylek pro dotykové měření lesklého artefaktu

5.2 Bezdotykové měření

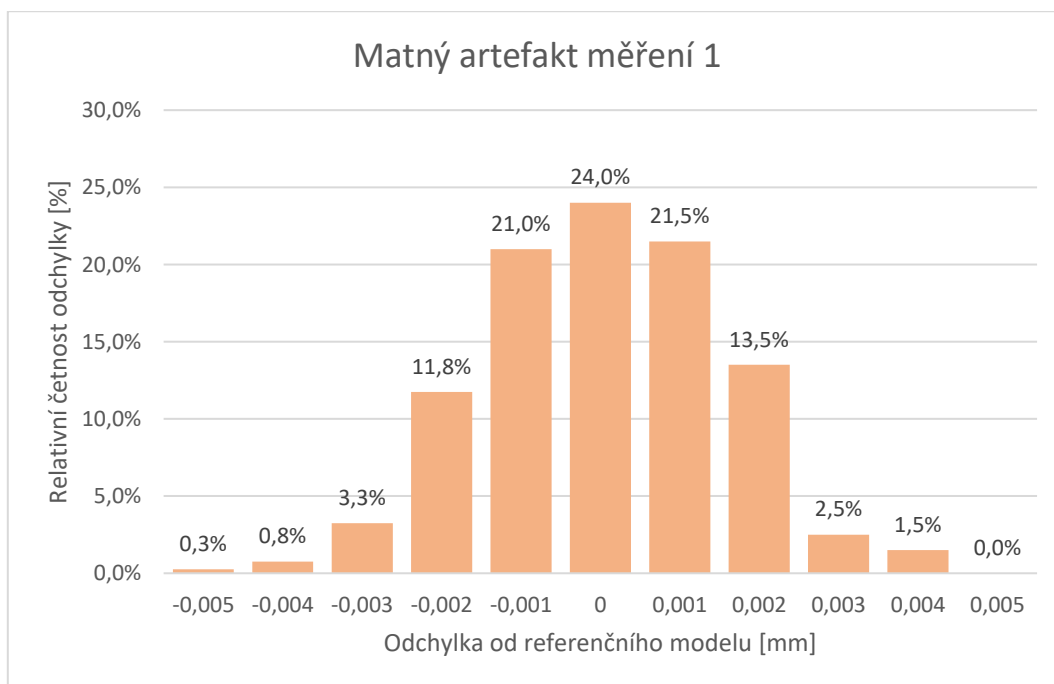
Pro hodnocení odchylek měření pruhovou projekcí byl zvolen stejný rastr 20x20 bodů odsazený 4 mm od okraje (Obrázek 55), jako při měření pomocí souřadnicového měřicího stroje. Tento rastr byl vytvořen pomocí funkce *ekvidistantní praporky odchylek* v softwaru GOM Inspect. Z exportovaných odchylek bodů byly vytvořeny histogramy, které jsou zobrazeny dále.



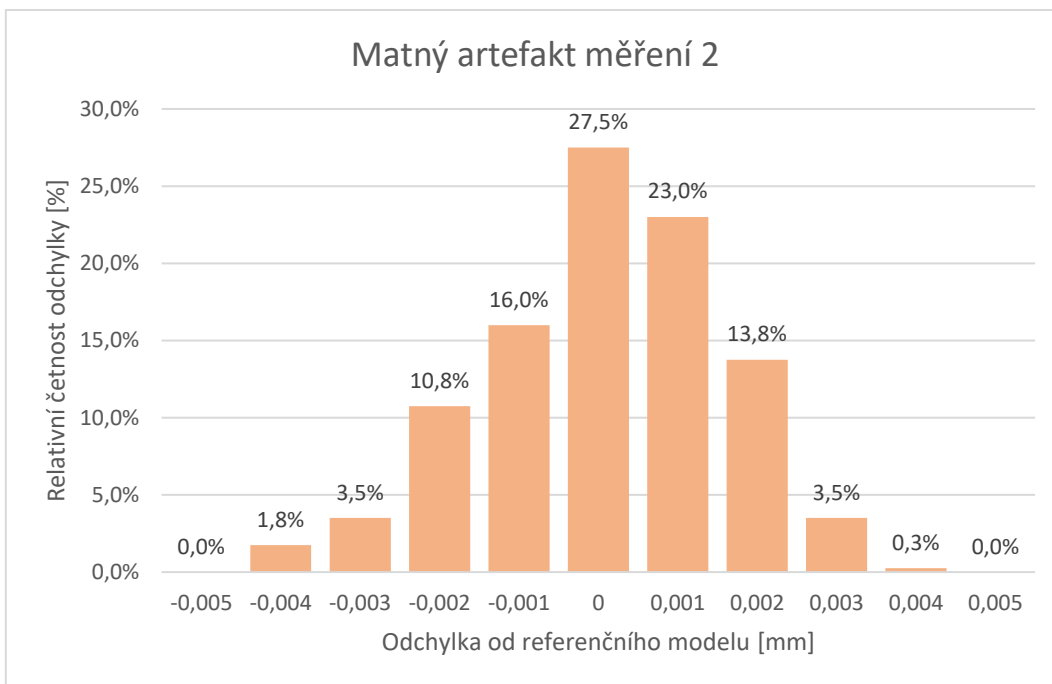
Obrázek 55 Rastr bodů pro hodnocení výsledků měření

5.2.1 Výsledky bezdotykové měření matného artefaktu

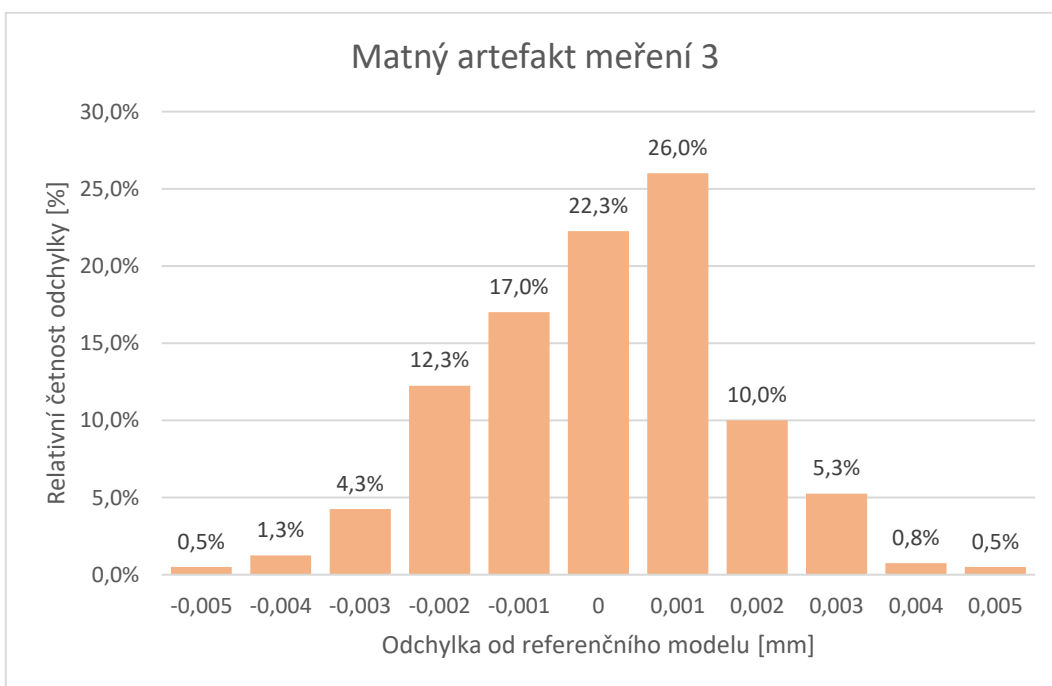
Pro matný artefakt je, pro každé z pěti měření, rozložení odchylek následující:



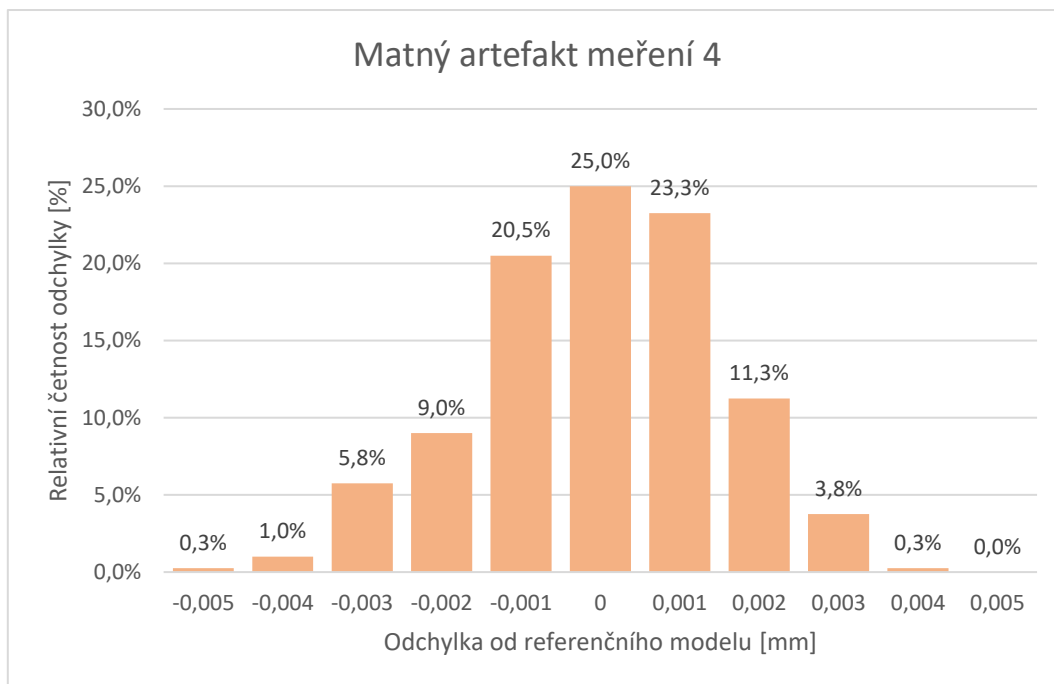
Graf 3 Relativní četnost odchylek pro 1. měření matného artefaktu



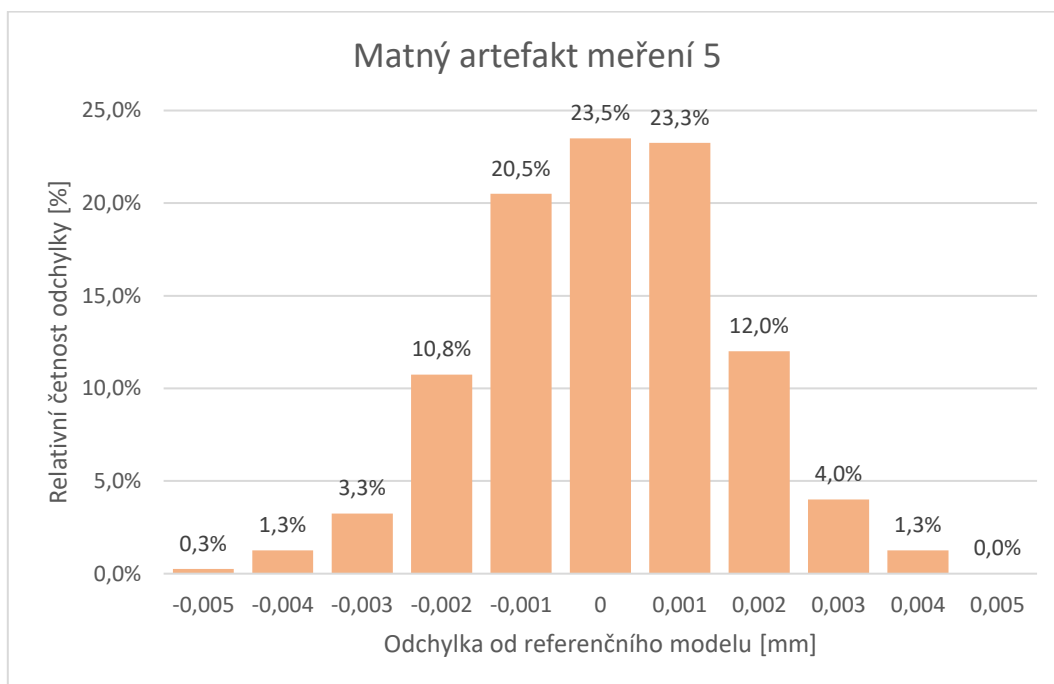
Graf 4 Relativní četnost odchylek pro 2. měření matného artefaktu



Graf 5 Relativní četnost odchylek pro 3. měření matného artefaktu



Graf 6 Relativní četnost odchylek pro 4. měření matného artefaktu



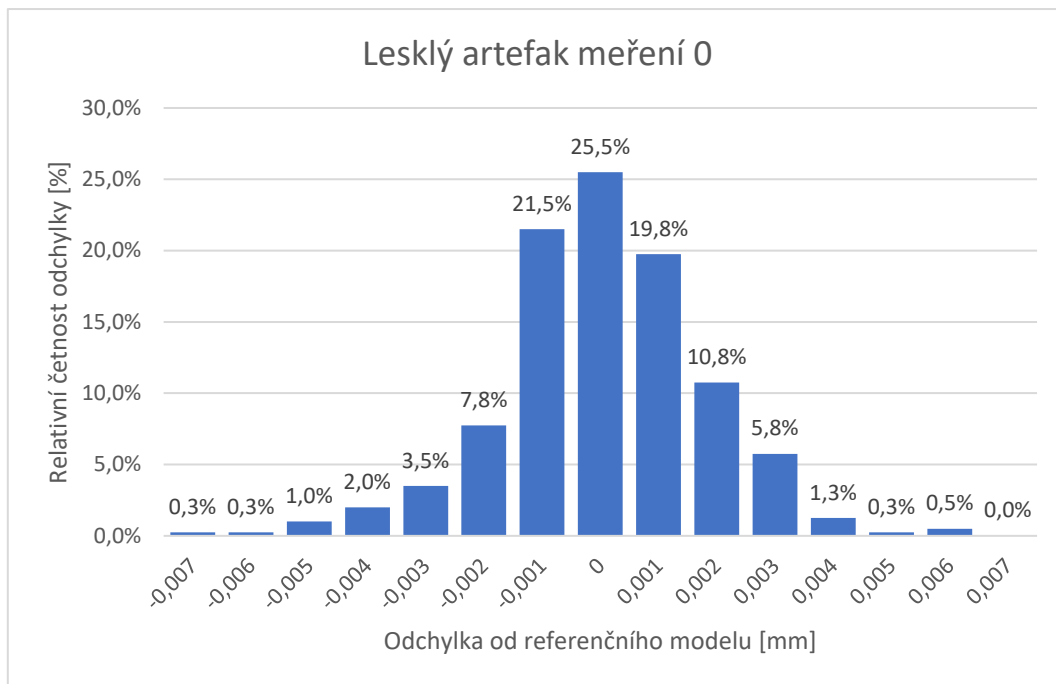
Graf 7 Relativní četnost odchylek pro 5. měření matného artefaktu

Z opakovaných měření vyplývá, že největší četnost odchylek se nachází v oblasti $\pm 0,002$ mm. V tomto rozmezí se nachází přibližně 90 % hodnot u všech pěti měření a zároveň se odchylky všech měření nachází v rozmezí $\pm 0,005$ mm. Můžeme tedy říci, že opakovatelnost měření byla konstantní. Mírné rozdíly mezi měřeními mohou být způsobeny změnou osvětlení v laboratoři, která je sice opatřena

žaluziemi, ale ty nejsou schopny úplně zamezit vlivu slunečního záření. Dalším vnějším vlivem může být teplota. Tento vliv je eliminován klimatizačním systémem laboratoře. Chybu měření může způsobit i zpracování mračna bodů, u kterého záleží na konkrétním algoritmu. Zároveň se musí vzít v úvahu fakt, že určitou chybu měření obsahuje i referenční model. Tato chyba byla kvantifikována při kontaktním měření pomocí CMM.

5.2.2 Bezdotykové měření lesklého artefaktu

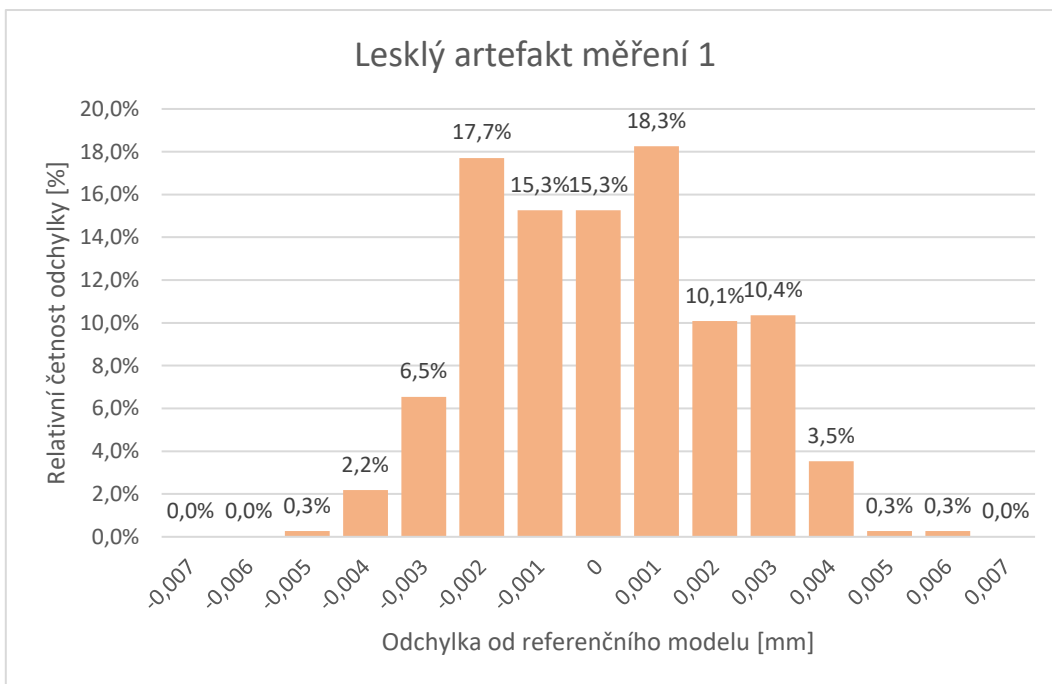
Po nanesení velice tenké vrstvy spreje, která plochu artefaktu zmatnila pouze na jedno měření bylo rozložení odchylek následující:



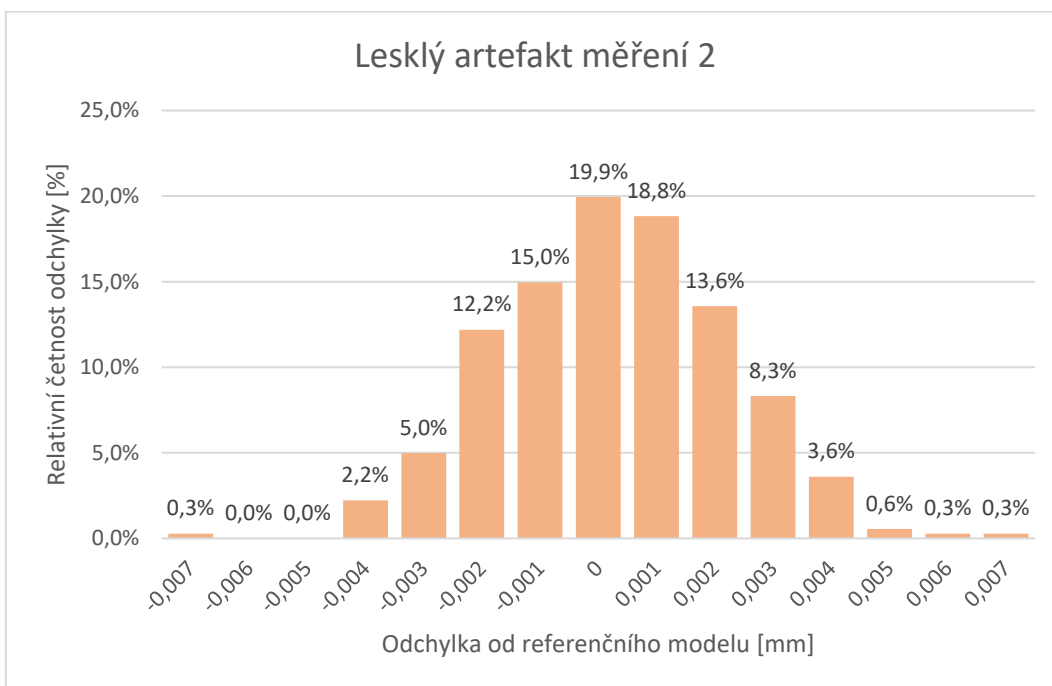
Graf 8 Relativní četnost odchylek pro nulté měření lesklého artefaktu

Na grafu 8 je možné sledovat, že přesnost měření se pohybuje řádově v jednotkách mikrometru a v rozmezí $\pm 0,002$ mm se nachází přibližně 86 % odchylek. Měření obsahuje body s větší odchylkou až 0,007 mm, které jsou způsobeny odlesky světla od ne zmatněných částí artefaktu.

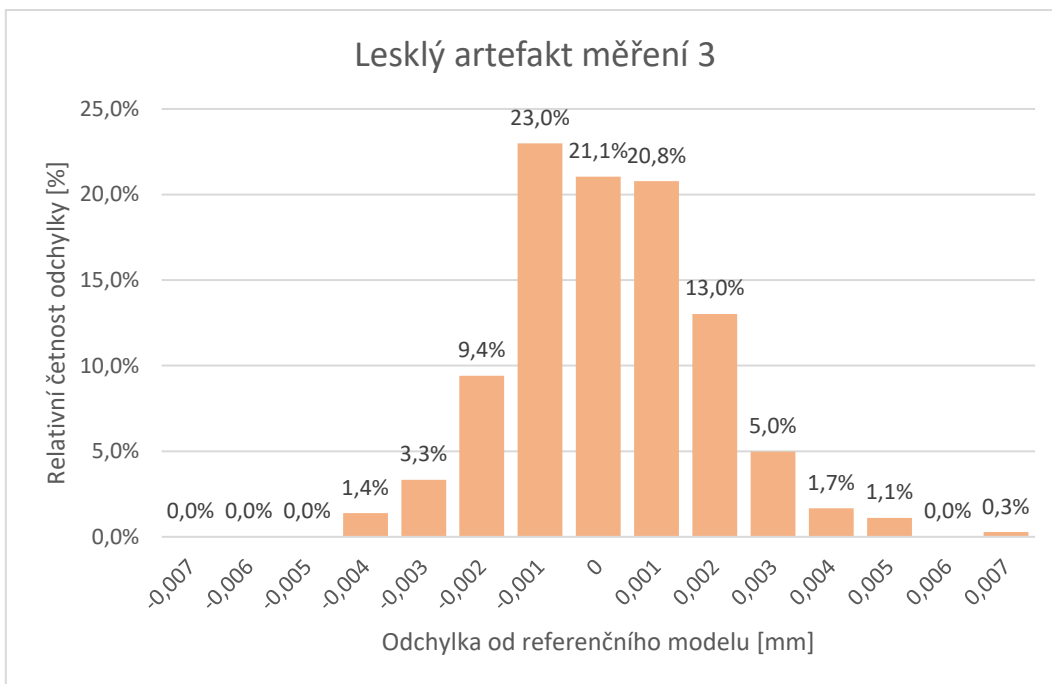
Po nové aplikace spreje bylo provedeno pět po sobě jdoucích měření a rozložení odchylek je následující:



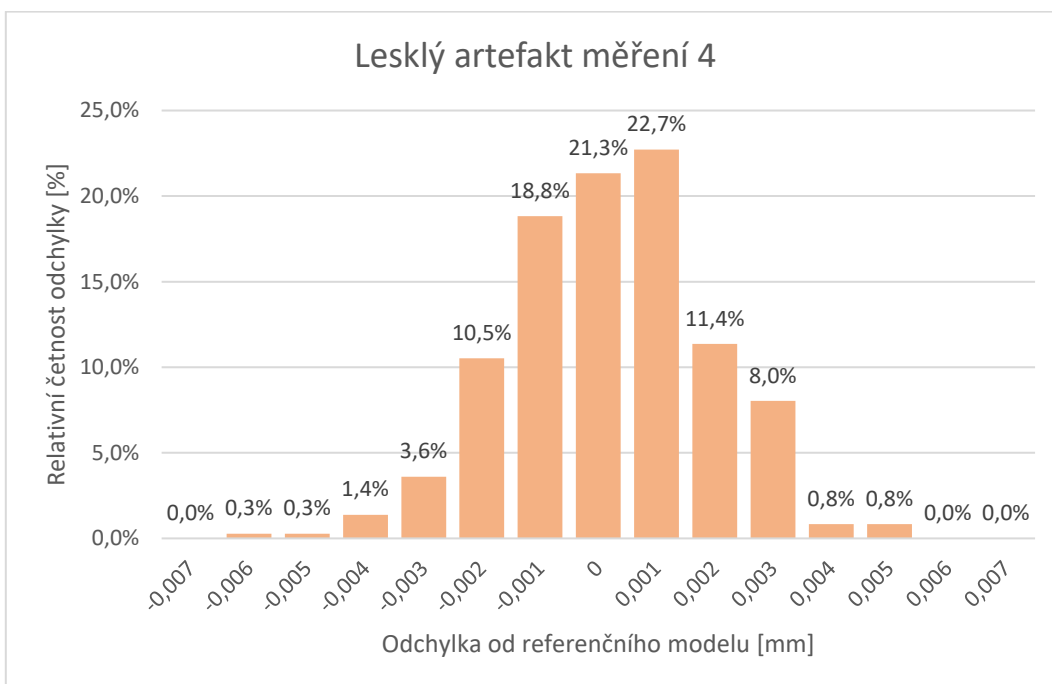
Graf 9 Relativní četnost odchylek pro 1. měření lesklého artefaktu



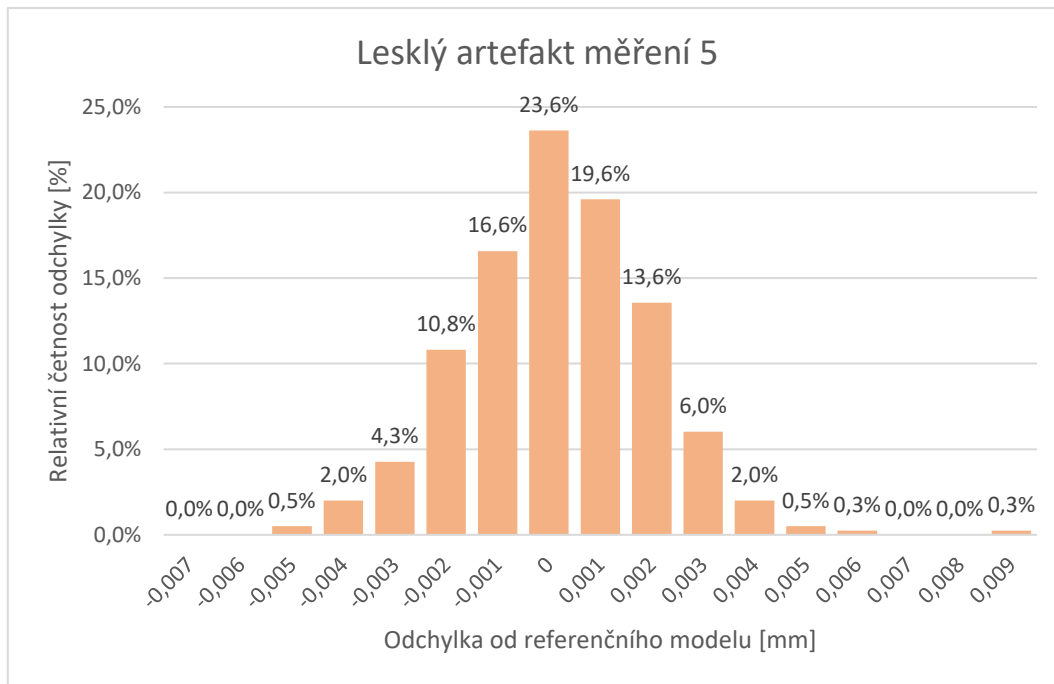
Graf 10 Relativní četnost odchylek pro 2. měření lesklého artefaktu



Graf 11 Relativní četnost odchylek pro 3. měření lesklého artefaktu



Graf 12 Relativní četnost odchylek pro 4. měření lesklého artefaktu



Graf 13 Relativní četnost odchylek pro 5. měření lesklého artefaktu

Tato série měření je zajímavá tím, že můžeme sledovat postupnou sublimaci zmatňujícího nástřiku. Oproti nultému měření byla na artefakt nanесena silnější vrstva zmatňujícího nástřiku a na histogramech je patrná postupná změna rozložení odchylek. Při prvním měření byly nejvíce zastoupené odchylky -0,002 a 0,002 mm, což není žádoucí. Rozložení odchylek se postupně měnilo až při pátém měření byl získán nejlepší výsledek a četnost odchylek začala nejvíce připomínat normální rozdělení, které je pro takové měření žádoucí a přibližně 85 % odchylek se nacházelo v rozmezí $\pm 0,002$ mm. V posledním pátém měření se také vyskytuje odchylka od referenčního modelu až 0,009 mm způsobená sublimací nástřiku a následnými odlesky od povrchu artefaktu. Sublimující nástřik má výrazný vliv na opakovatelnost měření.

6 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou snímacích systémů, které umožňují měření obecných tvarových ploch. V úvodu této práce jsou popsány nejzásadnější snímací systémy, jejich vlastnosti, specifika, možnosti použití a základní principy fungování. Práce také popisuje základní dělení snímacích systémů na dotykové a bezdotykové. Pro praktické provedení výzkumné práce v rámci bakalářského studia byl z každé z těchto kategorií vybrán jeden snímací systém, který byl použit pro následné porovnání a kalibraci artefaktu.

V této práci byl navržen postup kalibrace dvou freeform artefaktů za použití souřadnicové měřicí techniky, který spočíval ve vytvoření referenčních modelů pro jednotlivé artefakty. Referenční modely představují přesnou reprezentaci reálného dílu v podobě CAD modelu. Tyto modely byly následně použity pro porovnání se snímacím systémem fungujícím na principu pruhové projekce. Při měřeních pomocí CMM bylo zjištěno, že pro dosažení vysoké přesnosti referenčního modelu je velice důležitý povrch artefaktu, které by měl tvořit hladkou a spojitou plochu.

Referenční model matného artefaktu splňoval toleranci tvaru plochy 0,0058 mm s tím, že přibližně 96 % odchylek se nacházelo v rozmezí od -0,001 do 0,001 mm včetně. Pro lesklý artefakt bylo docíleno tolerance plochy 0,0010 mm.

Následně bylo provedeno měření artefaktů pruhovou projekcí. Výsledky těchto měření byly porovnány s referenčními modely. Při opakovaném měření matného artefaktu byl rozsah odchylek od reference $\pm 0,005$ mm a přibližně 90 % odchylek se nacházelo v rozsahu $\pm 0,002$ mm. Výsledek ukazuje na velice dobrou opakovatelnost měření pruhovou projekcí. Na lesklý artefakt byl před měřením nanesen sublimující zmatňující nástřik. Při měření lesklého modelu byl rozsah odchylek $\pm 0,007$ mm, s výjimkou posledního měření, kdy byla maximální odchylka 0,009 mm. Během pěti opakovaných měření docházelo vlivem sublimace nástřiku ke změnám rozložení odchylek. Při posledním pátém měření bylo přibližně 85 % odchylek v rozsahu $\pm 0,002$ mm. Problematika měření lesklých povrchů představuje oblast dalšího výzkumu. Měření na zařízení s pruhovou projekcí je výrazně rychlejší a produktivnější oproti měření na CMM, kde se doba měření pohybovala v řádech desítek minut. Měření pruhovou projekcí trvalo v řádu jednotek minut, oproti měření na CMM, a bylo získáno velké množství dat o celém povrchu artefaktu. Měření nedosahuje takových přesností jako CMM a je výrazně ovlivněno povrchem měřené součásti.

Výsledkem této bakalářské práce je kalibrace dvou freeform artefaktů, vyhodnocení přesnosti pruhové projekce Zeiss Comet pro měření těchto dvou artefaktů a technologický postup pro porovnání dotykových a bezdotykových snímacích systémů, který je možné v praxi aplikovat na další artefakty nebo výrobní součásti.

7 Seznam použité literatury

- [1] J. HOCKEN, Robert a Paulo H. PEREIRA, ed. *Coordinate Measuring Machines and Systems*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. ISBN 978-1-4200-1753-3.
- [2] *Absolute Arm Compact* [online]. In: . [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/portable-measuring-arms/romer-absolute-arm-compact>
- [3] *FARO Introduces New 6DoF Laser Tracker Platform* [online]. In: . [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://metrology.news/faro-introduces-new-6dof-laser-tracker-platform/>
- [4] SALAH H. R, Ali. *Automotive Engine Metrology*. CRC Press, 2017. ISBN 978-1-5231-1797-0.
- [5] *Common Questions on Portable CMMs* [online]. In: . [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://gomeasure3d.com/blog/common-questions-portable-cmms/>
- [6] FLACK, David. *Measurement Good Practise Guide No. 43: CMM Probing*. 2014. ISSN 1368-6550.
- [7] BASTAS, Ali. Comparing the probing systems of coordinate measurement machine: Scanning probe versus touch-trigger probe. *Measurement*. 2020, (156). ISSN 0263-2241. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107604>
- [8] Scanning probes. In: *Renishaw* [online]. [cit. 2021-12-25]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/scanning-probes--6656>
- [9] *Measuring the Real World with High-Performance Scanning Systems* [online]. In: . [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.qualitydigest.com/sept00/html/scanning.html>
- [10] ZEISS [online]. [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology>
- [11] *5osý odměřovací systém REVO* [online]. In: . [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/5osy-odmerovaci-system-revo--10438>
- [12] *Doteková spínací sonda HP-THDe* [online]. In: . [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/coordinate-measuring-machines/cmm-sensors/touch-trigger-probes/hp-thde-touch-trigger-probe>
- [13] HORVATIĆ NOVAK, A., B. RUNJE a J. STEPANIĆ. Capabilities of industrial computed tomography in the field of dimensional measurements. *Advances in Production Engineering & Management*. 2017, 12(3), 245-253. ISSN 1854-6250. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.14743/apem2017.3.255>
- [14] KRUTH, J.P., M. BARTSCHER, S. CARMIGNATO, R. SCHMITT, L. DE CHIFFRE a A. WECKENMANN. Computed tomography for dimensional metrology. *CIRP Annals* [online]. 2011, 60(2), 821-842 [cit. 2021-12-27]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:[10.1016/j.cirp.2011.05.006](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.006)
- [15] *Phoenix X/cube: 2D X-Ray Solutions for Automotive and Aerospace* [online]. In: . [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://www.bakerhughesds.com/industrial-x-ray-ct-scanners/x-cube>

- [16] *Photogrammetry in the industry: from an image to a 3D measuring report* [online]. In: . [cit. 2021-12-31]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/topics/photogrammetry>
- [17] HARDING, Kevin G. *Practical Optical Dimensional Metrology*. SPIE. ISBN 978-1-5106-2293-7. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPODM0007/practical-optical-dimensional/practical-optical-dimensional>
- [18] BÖSEMANN, Werner. INDUSTRIAL PHOTOGRAMMETRY - ACCEPTED METROLOGY TOOL OR EXOTIC NICHE. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. 2016, -5, 15-24 [cit. 2021-12-30]. ISSN 2194-9034. Dostupné z: doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B5-15-2016
- [19] *DPA Industrial: High-End Shop-Floor Photogrammetry Made Easy* [online]. In: . [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/products/photogrammetry/dpa-industrial>
- [20] *ATOS Plus 45M: Automated Photogrammetry for ATOS* [online]. In: . [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/products/3d-measuring-machines/atos-plus>
- [21] *L100 - The ultimate CMM scanner combining productivity and accuracy* [online]. In: . [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.nikonmetrology.com/en-gb/3d-metrology/automated-3d-scanning-l100>
- [22] *ZEISS T-SCAN hawk: Portable 3D scanner | HandsOnMetrology* [online]. In: . [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.handsonmetrology.com/products/t-scan-hawk>
- [23] LI, Feng, David STODDART a Iwona ZWIERZAK. A Performance Test for a Fringe Projection Scanner in Various Ambient Light Conditions. *Procedia CIRP*. 2017, **62**, 400-404. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.080>
- [24] *Quality assurance of sheet metal parts* [online]. In: . [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/products/3d-scanning/atos-q>
- [25] *PrimeScan* [online]. In: . [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-cz/products/structured-light-scanners/aicon-primescan>
- [26] BRAHM, Anika, Conrad RÖBLER, Patrick DIETRICH, Stefan HEIST, Peter KÜHMSTEDT a Gunther NOTNI. Non-destructive 3D shape measurement of transparent and black objects with thermal fringes. In: *Proc.SPIE*. 2016, . Dostupné z: doi:10.1117/12.2227093
- [27] LANDMANN, Martin, Henri SPECK, Patrick DIETRICH, Stefan HEIST, Peter KÜHMSTEDT a Gunther NOTNI. Fast 3D Shape Measurement of Transparent Glasses by Sequential Thermal Fringe Projection. *EPJ Web Conf*. 2020, **238**. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202023806008>
- [28] *New 3D sensor scans transparent objects* [online]. In: . [cit. 2022-02-13]. Dostupné z: <https://www.iof.fraunhofer.de/en/pressrelease/2021/3d-mwir-en.html>

8 Seznam obrázků

Obrázek 1 Komponenty CMM: Machine structure (pohyblivý rám); Probe head (snímací hlava); Controller (řídící systém); Computer (počítač) [1]	8
Obrázek 2 Schéma portálového CMM	9
Obrázek 3 Schéma portálového CMM s pohyblivým stolem	9
Obrázek 4 Schéma CMM mostového typu.....	10
Obrázek 5 Schéma CMM s horizontálním ramenem	10
Obrázek 6 Schéma výložníkového CMM	11
Obrázek 7 Měřící rameno [2]	12
Obrázek 8 Laser tracker [3]	12
Obrázek 9 Pevná sonda [5].....	13
Obrázek 10 Schéma spínací sondy [6]	13
Obrázek 11 Skenovací sonda [9]	14
Obrázek 12 ZEISS VAST XTR gold [10].....	15
Obrázek 13 ZEISS VAST gold [10].....	15
Obrázek 14 ZEISS VAST XXT [10].....	15
Obrázek 15 Renishaw REVO [11].....	16
Obrázek 16 HP-THDe [12].....	16
Obrázek 17 Phoenix X cube [15].....	17
Obrázek 18 Schéma triangulace [17].....	18
Obrázek 19 Snímání fotek turbíny [18]	18
Obrázek 20 Schéma měření deformace trupu helikoptéry při zátěžovém testu [18].....	19
Obrázek 21 DPA Industrial [19]	19
Obrázek 22 ATOS PLUS 45M [20]	19
Obrázek 23 Nikon L100 [21]	20
Obrázek 24 T-Scan hawk [22]	21
Obrázek 25 Schéma promítaného vzoru při měření pruhovou projekcí.....	21
Obrázek 26 Schéma posunu projekce, které vede ke změně fáze a ke změně snímané intenzity světla	22
Obrázek 27 ATOS Q [24]	22
Obrázek 28 PrimeScan [25]	23
Obrázek 29 Glass360Dgree [28]	24
Obrázek 30 Konfigurace kamer a laserového zdroje přístroje Glass360Dgree [28]	24
Obrázek 31 Matný artefakt	25
Obrázek 32 Lesklý artefakt	25
Obrázek 33 Konfigurace dotykového snímacího systému	26
Obrázek 34 Referenční koule	27
Obrázek 35 Svěrák pro upnutí artefaktu	27
Obrázek 36 Body zvolené pro 3D přizpůsobení.....	28
Obrázek 37 Mračno bodů získané měřením na CMM.....	29
Obrázek 38 Tvarová plocha vytvořená z mračna bodů	29
Obrázek 39 Referenční model vytvořený v softwaru Zeiss Reverse Engineering	30
Obrázek 40 Parametry pro proložení naměřených bodů plochou.....	31
Obrázek 41 Grafické znázornění odchylek matného artefaktu.....	32
Obrázek 42 Grafické znázornění odchylek na lesklém artefaktu	32
Obrázek 43 Konfiigurace zařízení Zeiss Comet.....	33
Obrázek 44 Kalibrační deska pro optické měření.....	33

Obrázek 45 Artefakt skrze objektiv zařízení Zeiss Comet.....	34
Obrázek 46 Parametry skenování	34
Obrázek 47 Plocha získaná měřením na zařízení Comet.....	35
Obrázek 48 Barevná mapa pro nulté měření lesklého artefaktu	36
Obrázek 49 Barevná mapa pro 1. měření lesklého artefaktu	36
Obrázek 50 Barevná mapa pro 2. měření lesklého artefaktu	37
Obrázek 51 Barevná mapa pro 3. měření lesklého artefaktu	37
Obrázek 52 Barevná mapa pro 4. měření lesklého artefaktu	38
Obrázek 53 Barevná mapa pro 5. měření lesklého artefaktu	38
Obrázek 54 Barevná mapa pro 1. měření matného artefaktu	39
Obrázek 55 Rastr bodů pro hodnocení výsledků měření	41

9 Seznam grafů

Graf 1 Četnost odchylek pro dotykové měření matného artefaktu.....	40
Graf 2 Četnost odchylek pro dotykové měření lesklého artefaktu	40
Graf 3 Relativní četnost odchylek pro 1. měření matného artefaktu	41
Graf 4 Relativní četnost odchylek pro 2. měření matného artefaktu	42
Graf 5 Relativní četnost odchylek pro 3. měření matného artefaktu	42
Graf 6 Relativní četnost odchylek pro 4. měření matného artefaktu	43
Graf 7 Relativní četnost odchylek pro 5. měření matného artefaktu	43
Graf 8 Relativní četnost odchylek pro nulté měření lesklého artefaktu	44
Graf 9 Relativní četnost odchylek pro 1. měření lesklého artefaktu.....	45
Graf 10 Relativní četnost odchylek pro 2. měření lesklého artefaktu.....	45
Graf 11 Relativní četnost odchylek pro 3. měření lesklého artefaktu.....	46
Graf 12 Relativní četnost odchylek pro 4. měření lesklého artefaktu.....	46
Graf 13 Relativní četnost odchylek pro 5. měření lesklého artefaktu.....	47