

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



**APLIKACE REVERZNÍHO INŽENÝRSTVÍ
V OBLASTECH S VYSOKÝMI POŽADAVKY
NA PŘESNOST**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Bc. Eliška Hrbková
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

PRAHA 2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hrbková** Jméno: **Eliška** Osobní číslo: **419858**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Aplikace reverzního inženýrství v oblastech s vysokými požadavky na přesnost

Název diplomové práce anglicky:

Application of reverse engineering in areas with high precision requirements

Pokyny pro vypracování:

1. Vývoj a nové trendy v oblasti reverzního inženýrství
2. Senzory využívané pro akvizici měřených dat využitelné pro přesné měření/skenování
3. Popis postupu reverzního inženýrství pro vysoce přesné aplikace
4. Aplikace postupu na vybranou součást (obsahující obecné tvarové plochy)

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Libor Beránek, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání diplomové práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2018**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Libor Beránek, 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

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a vedení při práci. Také bych chtěla poděkovat panu Ing. Vladimíru Šulcovi, Ing. Michalu Koptišovi a Ing. Janu Šimotovi za pomoc při řešení praktické části práce a mé rodině za podporu při celém průběhu studia.

Abstrakt

Snímací postupy používané v reverzním inženýrstvím se liší mnoha parametry. Pro správnou volbu vhodné snímací metody a rekonstrukce je proto nutné detailně znát jak limity používaných kontaktních a bezkontaktních metod snímání, tak i omezení softwarového zpracování. Tato práce proto analyzuje možné aplikace metod reverzního inženýrství, a i konkrétní použité metody. Provedený rozbor je podpořen experimentální aplikací postupu na kovové součásti ze slitiny hliníku EN AW 7075 s obecnou tvarovou plochou. Na které je demonstrováno kvalitativní porovnání různých postupů reverzního inženýrství a použité metody jsou následně vzájemně porovnány.

Klíčová slova

Reverzní inženýrství, rekonstrukce informace, mrak bodů, akvizice dat, snímací systémy, CMM, CAD model.

Abstract

Probing methods used in Reverse Engineering differ in many parameters. Therefore, it is necessary to know in detail the limits of the contact and the non-contact probing methods, as well as the limitations of the software processing, in order to choose the appropriate scanning method and reconstruction. This work, therefore, analyzes possible applications of Reverse Engineering methods and specific methods used. The analysis is supported by the experimental application of the EN AW 7075 aluminum alloy component with a general shaped surface. On which a qualitative comparison of different Reverse Engineering processes is demonstrated and the methods used are then compared to each other.

Keywords

Reverse Engineering, information recovery, point clouds, data acquisition, probing systems, Coordinate Measuring Machine, CAD model.

Seznam použitých symbolů a zkratk

CAD	Computer Aided Desing – počítačem podporované projektování
CAM	Computer Aided Manufacturing – počítačem podporované obrábění
CCD	Charge-Coupled Device – zařízení s vázanými náboji
CMM	Coordinate Measuring Machine – souřadnicový měřicí stroj
CNC	Computer Numerical Control - počítačově číslicově řízené
CT	Computed Tomography – počítačová tomografie
MRI	Magnetic Resonance Imaging – magnetická rezonance
RE	Reverse Engineering – reverzní inženýrství
STL	Stereolithography – stereo litografická síť
2D	Two Dimensional - dvojrozměrný
3D	Three Dimensional - trojrozměrný

Obsah

Úvod.....	8
1 Reverzní inženýrství a jeho aplikace	9
1.1 Aplikace reverzního inženýrství	10
2 Senzory využívané pro akvizici měřených dat	17
2.1 Dotykové snímání systémy	17
2.2 Bezdotykové snímací systémy	25
2.3 Nosič snímacího systému	36
2.4 Porovnání	38
3 Popis postupu reverzního inženýrství	40
3.1 Postup reverzního inženýrství	40
3.2 Přesné aplikace	41
3.3 Příklady softwarů pro reverzní inženýrství	42
4 Aplikace postupu na vybranou součást.....	45
4.1 Souřadný systém	45
4.2 Dotykový snímací systém.....	47
4.3 Bílé světlo.....	60
4.4 Laser skener	62
4.5 Počítačová tomografie.....	65
4.6 Konstrukční operace v ZRE	68
4.7 Měření drsnosti.....	72
4.8 Vyhodnocení	74
Závěr	77
Seznam použitých zdrojů.....	79
Seznam obrázků.....	82
Seznam tabulek	85

Úvod

V inženýrské praxi se můžeme setkat se situací, kdy je nutné z různých důvodů získat informace o objektu, ke kterému nemáme žádnou nebo nedostatečně kvalitní dokumentaci. V důsledku toho je jediným zdrojem informací pouze samotný objekt, který máme k dispozici a navíc často za omezených podmínek, kdy například nesmí dojít k jeho zničení, poškození, nebo změně polohy. Je zřejmé, že získání jakékoliv informace o struktuře objektu a případně i způsobu jeho výroby, pak není jednoduchým úkolem. V takové situaci je nutné k získání maximálního možného množství informací využít právě reverzní inženýrství.

Tato diplomová práce se zabývá aplikacemi reverzního inženýrství v oblastech s vysokými požadavky na přesnost a problematikou vhodného snímacího systému.

První kapitola práce vysvětluje pojem reverzní inženýrství a důvody proč je vhodné tento proces využít. Jsou zde také uvedeny aplikace reverzního inženýrství v různých oblastech. Ve druhé kapitole je sestaven přehled snímacích systémů pro akvizici měřených dat. Systémy jsou rozdělené do dvou kategorií dle spojení s měřeným objektem. Je zde popsán princip funkce těchto systémů a v závěru jsou uvedené senzory porovnány z hlediska přesnosti a rychlosti, se kterou jsou schopni sbírat měřená data.

Třetí část této diplomové práce je zaměřena na popis postupu reverzního inženýrství.

V poslední kapitole je pak uvedena praktická ukázka aplikace reverzního inženýrství na konkrétní součásti, kdy pro akvizici dat jsou využity různé snímací systémy. Postup reverzního inženýrství samostatně pro každý snímací systém zachycují podkapitoly. Závěr poslední kapitoly se zabývá vyhodnocením vhodnosti aplikace použitých snímacích systémů v oblastech s vysokými požadavky na přesnost.

1 Reverzní inženýrství a jeho aplikace

Strojírenství jako takové je proces navrhování, výroby, montáže a oprav strojů a zařízení. Rozlišujeme dva přístupy k produktu charakterizované termíny klasické inženýrství (z anglického Forward Engineering) a reverzní neboli zpětné inženýrství (z anglického Reverse Engineering, dále RE) [1].

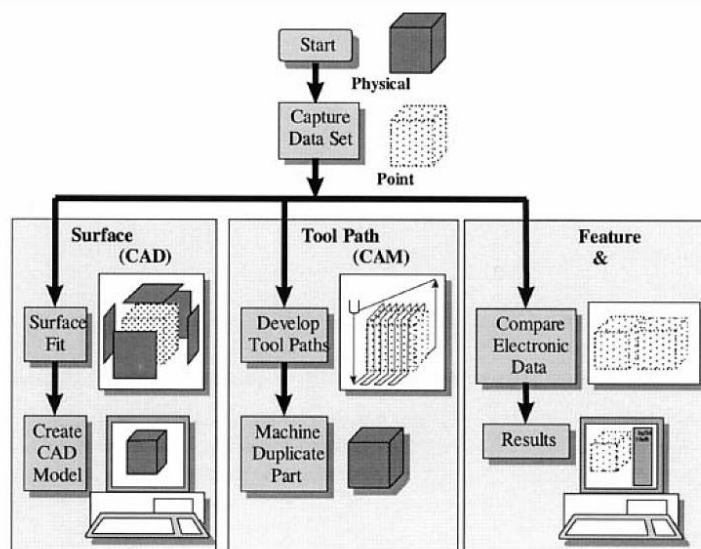
Přístup k produktu charakterizovaný termínem klasické inženýrství označuje klasický postup výroby produktu od samotného návrhu po jeho realizaci ve výsledný, reálný produkt vyžadující představivost, kreativitu a originalitu.

Oproti tomu druhý přístup k produktu charakterizovaný termínem reverzní inženýrství označuje tzv. zpětnou analýzu, tedy proces znovuvyrobění existující součásti bez pomoci výkresu, dokumentace či dat počítačového modelu. Nejedná se pouze o přesné napodobení původní součásti, hlavním cílem RE je obnovení technických údajů produktů, získání informací o tvaru a funkci dílu pomocí inženýrské analýzy a měření původního výrobku. Zjištěné technické údaje nám pomohou obnovit postup výroby zkoumané součásti. Ten můžeme následně použít pro přesnější výrobu, jako údaj pro restaurování historických odkazů apod. [2].

RE se využívá v mnoha oblastech jako je strojírenství, letectví, automobilový průmysl, spotřební elektronika, lékařské přístroje, stavební průmysl, stavba lodí, šperkařství. Uplatňuje se i ve forenzních vědách a při vyšetřování nehod [3].

RE se používá především pro jeho tři funkce (Obr. 1. 1) [2]:

- 1) obnovení CAD modelu z reálné součásti,
- 2) obnovení postupu výroby reálné součásti (CAM),
- 3) analýza a kontrola jednotlivých funkčních prvků, redesign existujícího dílu.



Obr. 1. 1 Rozsah reverzního inženýrství [2]

1.1 Aplikace reverzního inženýrství

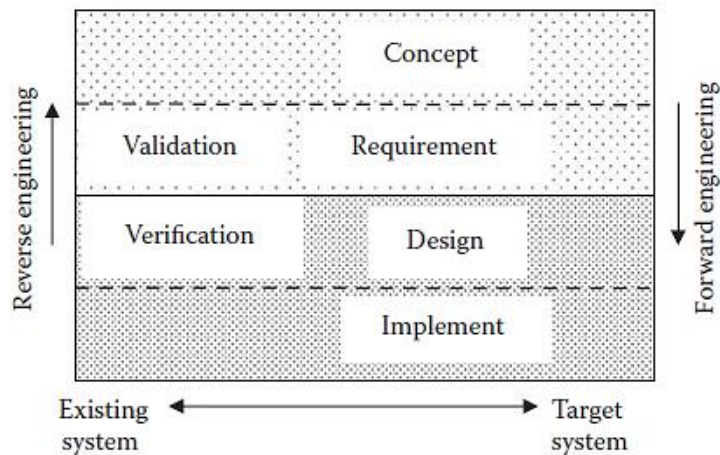
Délka životního cyklu nového vynálezu se v historii počítala na staletí. Příkladem může být vynález elektrické žárovky, který trval tisíce let. V průběhu dalších let se tento interval vlivem modernizace zkracoval. Pro vývoj digitálního fotoaparátu stačilo pouze několik desetiletí. Aby mohlo docházet k rychlejší modernizaci a obnově strojů, nástrojů apod., je využito způsobů reverzního inženýrství. V dnešním průmyslu má právě RE vliv na produkování levnějších výrobků a na zvyšování konkurence, kdy tyto dva body hrají významnou roli v dalším průmyslovém vývoji [3].

Reverzní inženýrství je velmi uplatňované také v průmyslu informačních technologií. Využívá se zde od samotného vývoje softwaru až po zabezpečení internetové sítě. Dalšími oblastmi aplikace reverzního inženýrství je letecký, automobilový a ostatní dopravní průmysl. Hlavním důvodem užití je možnost rekonstrukce událostí, které se staly před a bezprostředně po dopravních nehodách [3].

1.1.1 Software Reverse Engineering (SRE)

SRE je definováno jako proces analyzování konkrétního systému pro vytvoření podobného systému na vyšší myšlenkové úrovni bez vztahu k nějakému konkrétnímu případu. Má dvě funkce. První je postup kódování pro přepsání zdrojového kódu, který není buď přístupný, nebo dostupný v oblasti vývoje softwaru. Druhou funkcí je schopnost dekódovacího procesu určeného pro zrušení nebo vyláčení chyb softwarového zabezpečení. Tato funkce hraje v dnešních moderních informačních technologiích významnou roli [3].

Na Obr. 1. 2 jsou uvedeny stěžejní body ve vývoji softwaru. Reverzní inženýrství se zde pohybuje směrem vzhůru. Analyzuje implementaci stávajícího systému, zjišťuje detaily návrhu, znovu získává požadavky, až nakonec dosáhne původní koncepční úrovně. Klíčovými cíli reverzního inženýrství v této oblasti je znovuzískání informací, extrakce artefaktů a sloučení vyšších úrovní abstrakcí. Hlavní funkcí RE v této oblasti je vytvořit podklad pro následnou změnu funkčnosti systému nebo pro dokončení oprav softwaru, která se provede pomocí klasického inženýrství [3].



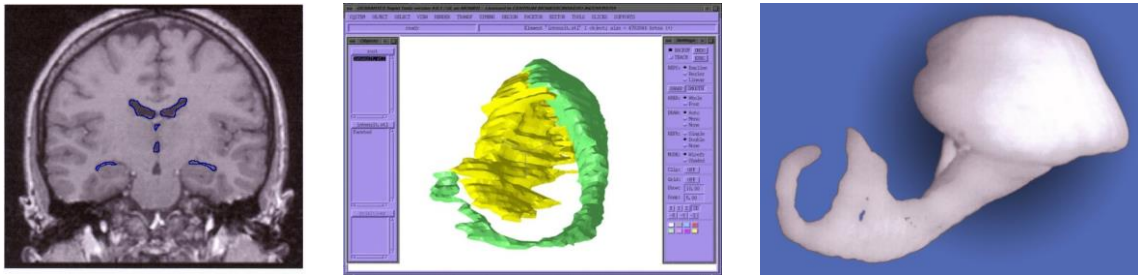
Obr. 1. 2 Úrovně procesu vývoje softwaru [3]

1.1.2 RE v lékařství

Pokud hovoříme o aplikaci RE v oblasti výzkumu a vývoje v lékařství, mluvíme o tzv. Medical Reverse Engineering (dále jen MRE). Hlavní aplikaci nachází při rekonstrukcích 3D modelů anatomických struktur, při vývoji medicínských produktů, plánování léčby, v biomedicínském výzkumu apod. [4]. Použití MRE v této oblasti je ale potřebné z následujících důvodů:

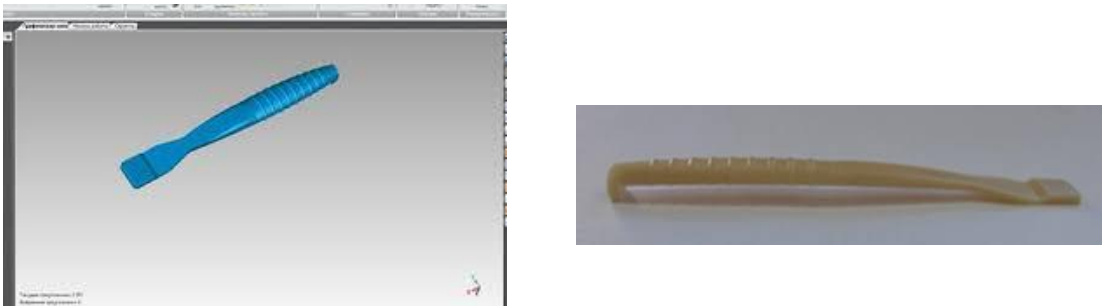
- nemáme k dispozici digitální model,
- tvar lékařského předmětu nebo pomůcky je velice složitý.

Je nezbytné ale dodat, že velice efektivní využití MRE je při spojení s aditivními technologiemi, např. při vývoji prototypů, pro vizualizace anatomie (Obr. 1. 3) apod.



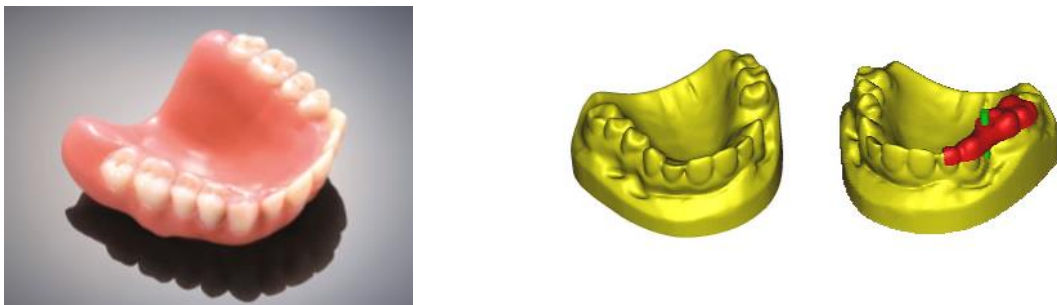
Obr. 1. 3 Vizualizace anatomie: vlevo: data z MRI; uprostřed: počítačový model; vpravo: fyzický model [5]

Příkladem spojení metod MRE a aditivních technologií jsou pinzety využívané v oblasti mikrochirurgie oka. Jelikož je každé oko jedinečné, tak podléhají pinzety častým změnám designu. Tento nástroj je jednoduchý, ale jeho geometrie je velice složitá, proto je zde vhodné využít metod MRE. S následným využitím aditivních technologií se časová náročnost vyvíjení nového prototypu tohoto nástroje zkrátí skoro o 95 % [6]. Na Obr. 1. 4 vlevo je zobrazeno vyvíjení nového designu pinzety a vpravo prototyp tohoto nástroje vyrobený pomocí aditivní technologie.



Obr. 1. 4 Vlevo: vyvíjení nového prototypu pinzety; vpravo: nový prototyp [6]

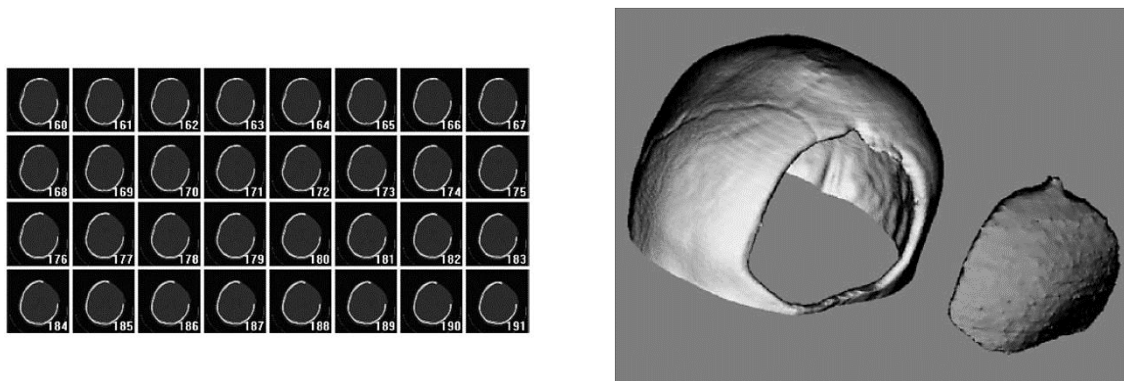
Dalším příkladem využití MRE je v oblasti stomatologie, kde příležitost pro aplikaci metod MRE představuje detailní uspořádání a jedinečnost tvaru zubů každého z nás. Využívá se pro vývoj umělých zubů, korunek apod. (Obr. 1. 5).



Obr. 1. 5 Využití metod MRE ve stomatologii [4, 5]

V ušním lékařství se metod MRE využívá při vývoji naslouchadel a důležitá aplikace MRE je v oblasti protetiky. Pro získání dat pro vytvoření CAD modelu a následné aplikace metod MRE se využívá medicínských zobrazovacích systémů – počítačové

tomografie (CT), magnetické rezonance (MRI). Vzniklé snímky se využijí pro tvorbu 3D modelu a následné vymodelování náhrady (Obr. 1. 6) [7].



Obr. 1. 6 Vlevo: Snímky lebky z CT; vpravo: 3D rekonstrukce, model implantátu [7]

1.1.3 RE v automobilovém průmyslu

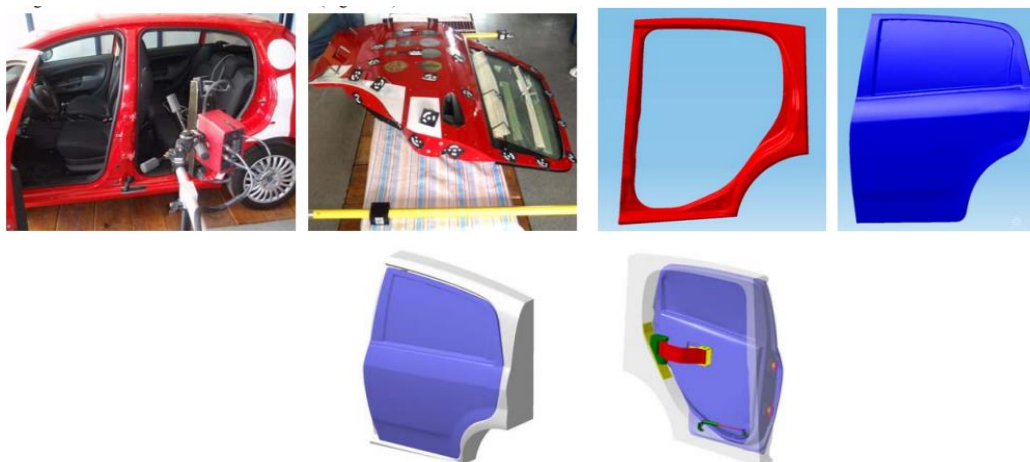
V průběhu historie se zaznamenalo několik stěžejních bodů v automobilovém průmyslu. Mezi ně zahrnujeme vynález samotné vozu, který nepotřebuje k provozu koně. Dále je to rychlost a produktivita systému hromadné výroby zavedené Henry Fordem. V poslední řadě je nutné zmínit také snahu o nabízení vozů vyrobených dle přání zákazníka. Ukazuje se, že pro tyto hlavní body bylo klíčové využití způsobů RE [1].

RE se v dnešním automobilovém průmyslu využívá hlavně z následujících důvodů [1]:

1. Získání již optimalizovaných free-form tvarů.
2. Překonání překážek v oblasti výměny a integrity dat.
3. Vytvoření komplexní geometrie, která nemá CAD model.
4. Vyřešení a opravení problémů vznikajících z nesrovnalostí mezi CAD modelem a reálnými nástroji.
5. Urychlení inovací v oblastech, kde nepotřebujeme CAD model např. ergonomický design, design inspirovaný historií, návrh spalování, aerodynamika.
6. Zajištění kvality a výkonnosti prostřednictvím počítačové kontroly a inženýrské analýzy.

V automobilovém průmyslu se reverzního inženýrství využívá především v oblasti vytváření nového designu, rekonstrukce a rozměrové kontroly. Jedním z příkladů užití reverzního inženýrství v automobilovém průmyslu je při úpravě sériové produkce automobilů pro potřeby osob s postižením. Získané 3D modely představují dobrý základ pro návrhové intervence, různé analýzy a simulační úkoly. A při použití optických

měřících systémů se zkrátí výsledný čas potřebný pro vývoj [9]. Na Obr. 1. 7 je uveden příklad aplikace metod RE při vývoji mechanismu otevírání zadních dveří automobilu pro osoby s postižením.



Obr. 1. 7 Nahoře vlevo: snímání zadních dveří a rámu; nahoře vpravo: CAD model zadních dveří a rámu; dole: nový mechanismus otevírání zadních dveří [9]

Další aplikace metod RE je získání informací o konkurenčním výrobku, nebo analýza nového designu z hlediska aerodynamiky. Na Obr. 1. 8 je zobrazeno využití v naposledy uvedené aplikaci. Nejprve se nasnímal tvar automobilu (Obr. 1. 8 vlevo nahoře), získaný mrak bodů se naimportoval do softwaru pro RE a zpracoval ve vodotěsnou polygonální síť (Obr. 1. 8 vpravo nahoře), která byla vyexportována ve formátu IGES a vložena do CAD sestavy spolu se zbývajícími daty (Obr. 1. 8 vlevo dole). Takto sestavený model je připravený pro digitální analýzy průtoku vzduchu s novým spoilerem a tím je umožněné precizní dokončení návrhu automobilu ještě před začátkem samotné výroby (Obr. 1. 8 vpravo dole) [10].



Obr. 1. 8 Využití v RE pro simulaci v aerodynamickém tunelu [10]

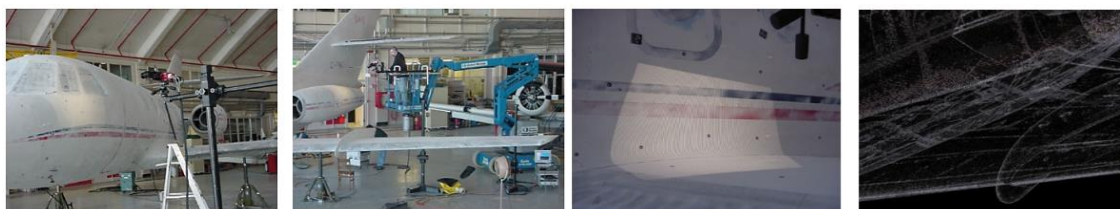
1.1.4 RE v leteckém průmyslu

RE hraje v leteckém průmyslu významnou roli z hlediska vyspělosti průmyslu, rozvoje moderních technologií a požadavku trhu. Největší technologický úspěch poslední dekády byl zaznamenán Boeing Commercial Airplane Group, kdy se její divizi podařilo 100 % digitalizovat a v počítači znovu sestavit první letoun. Při vytváření modelu 777 byly použity nové postupy v navrhování a sestavování modelu. V důsledku digitalizace měli konstruktéři možnost odstranit chyby a problémy. Tím došlo ke zlepšení kvality celého modelu a ke snížení nákladů [1].

Navzdory modernizaci a pokroku se letecký průmysl potýká s problémy ve využívání digitálních dat pro výrobu letadel. Problém vzniká v nekompatibilitě dat a v omezeném využití v dnešních CAD softwarech. Další problém je při uchovávání náhradních dílů, které je vysoce nákladné. Proto se RE využívá pro digitalizaci dílů a následně pro sestavení digitálního inventáře. Při opravách se díly vyrábějí na požádání. Dnešní letecký průmysl využívá RE z těchto hlavních důvodů [1]:

1. Digitalizace součástí bez CAD modelu a výkresové dokumentace.
2. Překonání překážek v oblasti výměny a integrity dat.
3. Vyřešení a opravení problémů vznikajících z nesrovnalostí mezi CAD modelem a reálnými nástroji.
4. Zajištění kvality a výkonnosti prostřednictvím počítačové kontroly a inženýrské analýzy.

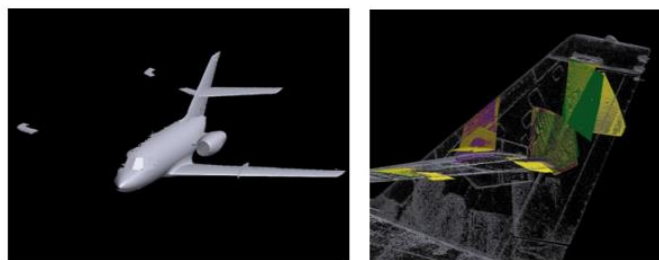
Příkladem praktické aplikace RE v leteckém průmyslu je naskenování celého proudového letadla Falcon 20 „Zero G“ za účelem zaznamenání tvaru letadla pro CFD analýzu, možných poloh letadla v pohybu a kontroly symetrie letadla [11].



Obr. 1. 9 Skenování pomocí systému ATOS II (strukturované bílé světlo) a získaný mrak bodů [11]

Na Obr. 1. 9 je uvedený postup skenování tvaru letadla. Ze získaného mraku bodů je vytvořený model. Na Obr. 1. 10 vlevo je zobrazena půlka tvaru letadla s údaji o typu křídla pro zkontrolování symetrie, následné zrcadlení a vytvoření celého modelu letadla.

Na stejném obrázku vpravo je ukázáno na modelu v jakých pozicích je potřebné umístit vztlakové klapky a aerodynamickou brzdu [10].



Obr. 1. 10 Vlevo: Údaje o typu křídla pro kontrolu symetrie a zrcadlení; vpravo: pozice pro umístění vztlakových klapek a vzduchové brzdy [11]

Dalším příkladem tentokrát v oblasti vojenského letectví je modernizace australské vojenské flotily Black Hawk helikoptér (Obr. 1. 11), kdy součástí projektu byla požadována digitalizace helikoptéry a následné sestavení přesného 3D modelu, který bude zobrazovat detailní informace o současném stavu stavby draku helikoptéry a doplňkového vybavení. Z důvodu velikosti a požadované vysoké přesnosti byla pro skenování použita kombinace fotogrammetrie a optického skenování využívající principu koherenční skenovací interferometrie [12].



Obr. 1. 11 Black Hawk helikoptéra (rozměry: 15,4 m x 2,4 m x 2,3 m) [12]

Obr. 1. 12 vlevo zobrazuje nasnímaná data pomocí koherenční skenovací interferometrie, kdy nejtypičtější oblastí využití je při skenování přední části. Na stejném obrázku vpravo je poté uveden vytvořený CAD model pomocí obou technologií [12].

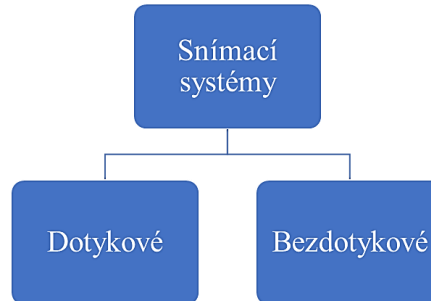


Obr. 1. 12 Vlevo: získaná data z optického skenování; vpravo: vytvořený CAD model z naskenovaných dat [12]

Výsledkem je jistota, že máme data, která opravdu a s vysokou přesností odrážejí stávající stav draku helikoptéry a která se dají snadno importovat do různých CAD softwarů [12].

2 Senzory využívané pro akvizici měřených dat

Jednou z hlavních výzev při rekonstrukci součásti je získání jejího geometrického tvaru. K tomu se využívají senzory, které zaznamenají geometrická data reprezentující daný reálný produkt. Základní rozdělení těchto snímacích systémů je na dotykové a bezdotykové (Obr. 2. 1).



Obr. 2. 1 Základní rozdělení snímacích systémů

2.1 Dotykové snímání systémy

Princip dotykového snímání spočívá ve fyzickém kontaktu snímače s měřeným předmětem. Je to sekvenční měření bodů na povrchu, kdy při každém dotyku měřeného povrchu snímací kuličkou je zaznamenán bod.

Snímání může probíhat ve dvou režimech. Prvním režimem je tzv. bodový neboli spínací režim. Snímač se mechanicky přiblíží k povrchu, dotkne se ho, zaznamená bod a vzdálí se do bezpečné vzdálenosti. Tento postup se potom opakuje pro každý bod. Z hlediska spotřeby času je tento systém neefektivní a neproduktivní. Záleží na velikosti snímaného povrchu, na počtu potřebných snímaných bodů.

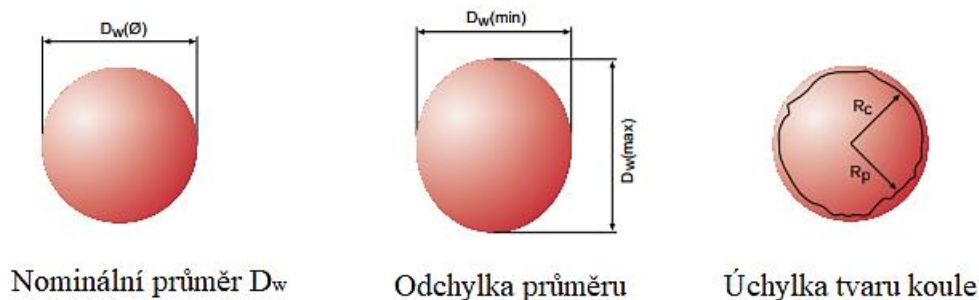
Naproti tomu, pokud budeme snímat ve skenovacím režimu, snímač se přiblíží k povrchu, dotkne se ho a začne se pohybovat na povrchu po předem stanové trajektorii. Po celou dobu snímání zůstává v kontaktu s povrchem a snímá body, jejichž počet se může pohybovat až v řádech tisíců.

Snímací systém určený pro dotykové snímání se skládá z několika částí – hlavy, prodloužení, dřívku a samotného doteku. Snímací dotek zprostředkovává kontakt mezi součástí a sondou. Dle snímaného prvku volíme typ snímacího doteku (přímý, hvězdicovitý, diskový atd.), jeho rozměr a materiál, ze kterého je dotek vyroben (rubín, nitrid křemíku). Mezi důležité vlastnosti doteku patří nejnižší odchylnost tvaru, vysoká tuhost a vysoká odolnost proti opotřebení. Dotek je upevněn na konci dřívku, který přenáší informaci o kontaktu. V případě krátkého dřívku pro měření používáme prodloužení. Celý

tento systém je poté upevněn pomocí hlavy v pinole CMM. Hlava může být pevná nebo otočná.

2.1.1 Přesnost snímacího doteku

Abychom dosáhli velice přesného měření, nestačí mít k dispozici přesný CMM. Musíme si dát také pozor i na přesnost samotné doteku snímacího systému, protože úchylka tvaru použité kuličky může mít přímý dopad na samotné měření CMM (Obr. 2. 2).



Obr. 2. 2 Zobrazení nominálního průměru doteku, odchylky jeho průměru a úchylky tvaru koule [13]

Kulička se vyrábí v třídách přesnosti 48 až třídě přesnosti 3, kdy třída přesnosti 48 je nejnižší a třída přesnosti 3 je nejvyšší. Snímací systémy od společnosti Renishaw určené pro přesné měření využívají kuličky vyrobené v třídách přesnosti 5 a 3. Kdy v třídě přesnosti 3 mají doteky odchylky tvaru $\pm 0,08 \mu\text{m}$. Většina využívá kuličky nižší třídy Grade 10 s odchylkou tvaru $\pm 0,25 \mu\text{m}$ [13].

Přesnost dotyků spočívá hlavně ve způsobu připevnění dotyku na dřík. Výsledkem prováděných výzkumů konstrukce dotyku bylo zjištění, že tvar kuličky může být degradován vrtáním otvoru do kuličky a deformací způsobenou lepením do nákrůžku.

Na Obr. 2. 3 vlevo jsou uvedeny dva způsoby připevnění doteku ke dříku. První způsob montáže (způsob A) je přilepení kuličky do nákrůžku. Nevýhodou této možnosti je menší plocha pro připevnění kuličky ke dříku, navíc zde není jiný typ zajištění. Proto může dojít k oddělení kuličky od dříku i při malém namáhání. Varianta B uvádí druhý způsob, který spočívá ve vyvrtání otvoru do kuličky, jehož průměr je až 0,5 mm. Dotek je poté nasazen na vybroušený konec dříku, jehož délka se musí shodovat s délkou vyvrtaného otvoru. Výhodou této varianty je větší plocha pro přilepení kuličky, která je navíc zajištěná nasazením na vystouplý konec dříku, což zaručuje dlouhou životnost snímače [13].



Obr. 2. 3 Vlevo: připevnění doteku ke dříku; vpravo: umístění snímacího doteku ve sférické misce [13]

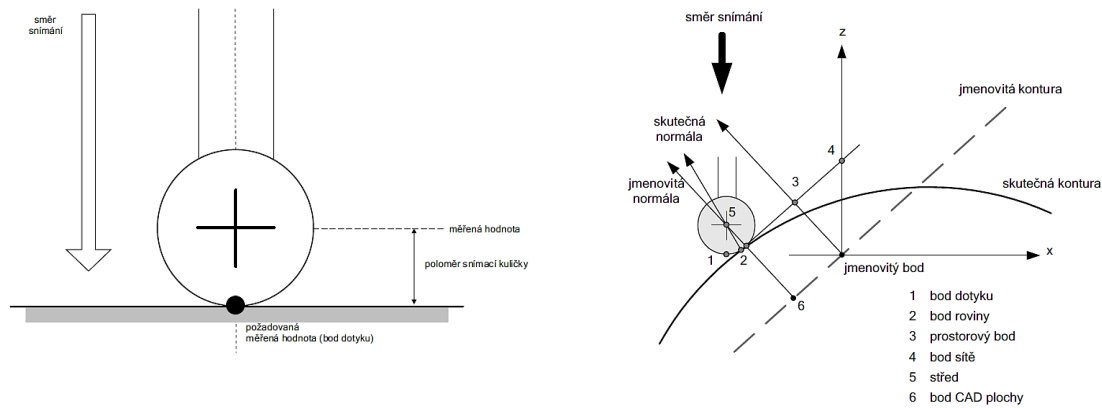
Společnost Renishaw zkoumala zdokonalení konstrukce vysoce přesných kuliček Grade 3. Všechny doteky vyráběné společností Renishaw jsou nevrtané a nalepené do sférické misky (Obr. 2. 3 vpravo). Měřením se ukázalo, že tato konstrukce zaručí, že tvar kuličky zůstane během celého procesu v rámci specifikací [13].

2.1.2 Definování měřicí síly

Z důvodu například průhybu dříku, plastických a elastických deformací jak snímacího doteku, tak samotné součásti je zásadní pro zajištění opakovatelnosti a správnosti výsledků měření vyvolání a kontrolování definované síly pro měření, pro jejíž vyvolání existují dva způsoby. Pasivní měřicí síla je vyvolána pružným prvkem např. pružinou ve velikosti úměrné deformaci tohoto prvku. Aktivní měřicí síla je generována systémem pohybujících se cívek při doteku snímače s měřeným povrchem. Výhodou měření s aktivním generováním měřicí síly je snížení nejistoty měření vlivem minimalizace odchylek měřících sil [14].

2.1.3 Korekce o poloměr snímače

Pokud snímáme dotykovým snímacím systémem, měřicí stroj pokaždé získá jako měřenou hodnotu souřadnice středu snímače. Tato hodnota se tedy odchyluje o poloměr snímače od bodu dotyku, což je požadovaná naměřená hodnota. Software, pomocí kterého měříme, má funkci, že koriguje naměřené hodnoty a my dostáváme souřadnice bodu dotyku. Po této korekci může zůstat určitá zbytková chyba, která je sice zanedbatelná, ale přesto vstupuje do výsledků měření. Korekce na poloměr snímače neprobíhá ve směru snímání, ale ve směru normály. Na Obr. 2. 4 jsou uvedena schémata pro korekci o poloměr snímače. Vlevo je uvedeno základní schéma korekce o poloměr v případě snímání roviny. Na stejném obrázku vpravo je uvedena korekce v případě snímání jiného typu povrchu, kde vidíme, že korekce opravdu neprobíhá ve směru snímání, ale ve směru normály povrchu [19].



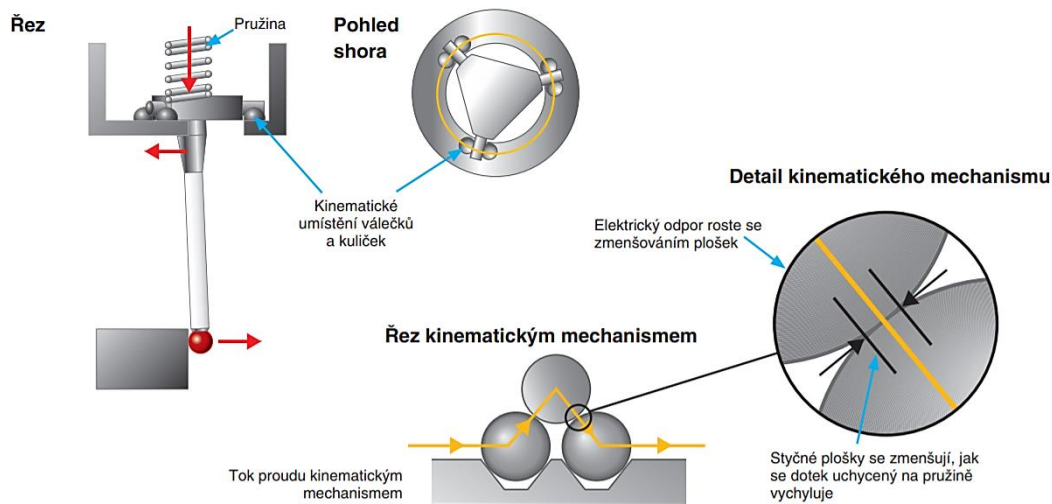
Obr. 2. 4 Korekce o poloměr snímače [19]

2.1.4 Spínací dotykový systém

Spínací dotykový systém je určen pro snímání jednotlivých bodů. Principem této metody je, že se snímací systém přiblíží k měřenému objektu v bezpečné vzdálenosti, poté plynulou rychlostí dojde k mechanickému kontaktu doteku s měřeným povrchem. Při doteku je vyvolán spínací signál, odečte se poloha snímaného bodu a snímací systém se vzdálí od objektu. Jelikož se tento postup opakuje pro každý snímaný bod, je tento způsob časově náročný a méně produktivní. Systém je vhodný pro měření, kde není nutné vyhodnocování odchylky tvaru, tedy pro měření běžných geometrických prvků.

Kinematická sonda

Spínací kinematická sonda používá pro zaznamenání aktuální polohy soustavu třech rovnoměrně rozmístěných válečků uložených na šesti kuličkách. Tlakem pružiny vzniknou mezi kuličkami a válečky styčné plochy, kterými prochází elektrický proud. Při kontaktu doteku s měřenou součástí a dosažení stanovené prahové hodnoty dojde k rozpojení nejméně jednoho ze tří kontaktních bodů a vznikne signál pro zaznamenání polohy odměřovacím systémem CMM. Na Obr. 2. 5 je uveden princip kinematické sondy při kontaktu s obrobkem [13].



Obr. 2. 5 Princip spínací kinematické sondy [13]

Nevýhodou tohoto systému jsou rozdílné snímací síly při měření, které závisí na pozici dřívku při dotyku s měřeným povrchem. Nestabilní velikost síly má za následek různé prohnutí snímače od doby kontaktu snímače s povrchem do doby, než dojde ke vzniku signálu a zaznamenání polohy. To má vliv na samotné měření, které je pak méně stabilní [15].

Tenzometrická sonda

Tenzometrická sonda využívá jako sonda kinematická kinematického mechanismu, ale pro měření kontaktní síly působící na dotek a pro generování signálu využívá tenzometry. Tenzometry zaznamenávají narůstající přitlačnou sílu vyvíjenou na dotek. Při překročení hraniční hodnoty síly vznikne signál a opět jako u kinematické sondy odměřovací systém CMM zaznamená aktuální polohu. Elektrický signál vzniká již při velmi malé síle, která je stálá ve všech směrech, a tedy nevznikají odchylky způsobené silami, které jsou závislé na směru dřívku při kontaktu s měřenou plochou. Jelikož dochází k eliminaci průhybu snímače, můžeme použít delší snímač, aniž by docházelo ke snížení přesnosti měření. Dalšími výhodami je lepší opakovatelnost a delší životnost snímače vlivem potřeby nižší kontaktní síly [13, 15].



Obr. 2. 6 Schéma tenzometrického snímacího systému [15]

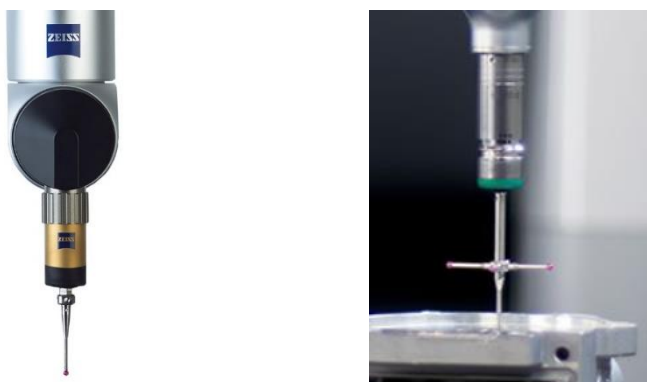
Spínací dotekové sondy na trhu

Na trhu jsou dostupné spínací kinematické sondy s výměnnými moduly, např. společnost Renishaw nabízí kinematickou sondu s výměnnými moduly TP20 (Obr. 2. 7 vlevo). Tato dvoudílná konstrukce se skládá ze samostatného tělesa sondy a oddělitelných modulů, které jsou připojeny k tělesu sondy magneticky. V závislosti na požadavcích měřené úlohy si můžeme nastavit vhodnou velikost spínací síly. Doteky v závislosti na velikosti spínací síly měří s opakovatelností od $\pm 0,35 \div \pm 1 \mu\text{m}$. Dále společnost Renishaw nabízí tenzometrické sondy s výměnnými moduly TP200. Sestava se také jako předchozí skládá z tělesa sondy TP200 (Obr. 2. 7 vpravo) nebo TP200B (verze se zvýšenou odolností proti vibracím). U výměnného modulu TP200 máme možnost výběru dvou spínacích sil. Opakovatelnost v jednom směru je u tohoto typu sondy $0,50 \mu\text{m}$ [13].



Obr. 2. 7 Vlevo: TP20; Vpravo: TP200 [13]

Společnost Zeiss nabízí spínací dotkový systém RST-P (Obr. 2. 8 vlevo). Tento systém, jak uvádí výrobce, pracuje na duálním principu. To znamená, že signál pro zaznamenání polohy vyvíjí piezoelektrické prvky. Jsou uspořádané před mechanickým uzlem, který slouží pro ověřování snímání a chrání senzor RST-P před poškozením při kolizi a kontaktu se součásti. Mechanický uzel tvoří tříbodové uložení. Senzor RST-P lze využít pro délková měření prizmatických součástí v automobilovém průmyslu, při výrobě nástrojů a forem.



Obr. 2. 8 Vlevo: spínací dotkový senzor RST-P; vpravo: spínací doteková sonda HP-THD [16, 17]

Společnost Hexagon nabízí spínací dotkovou sondu HP-THD (Obr. 2. 8 vpravo) a doporučuje ji pro aplikace s přesnými tolerancemi a aplikace vyžadující velkou hustotu bodů. Sonda měří s opakovatelností v jednom směru $0,3 \mu\text{m}$ [17].

2.1.5 Skenovací dotykový systém

Skenovací dotykové snímací systémy se přiblíží k povrchu, vznikne kontakt mezi snímacím dotykem a měřeným objektem, snímací systém se začne pohybovat po povrchu po předem stanové trajektorii a zaznamenává body. Rychlost snímání, počet snímaných bodů a krok mezi snímanými body si volíme při definování strategie měření. Obecně je měření v režimu skenování méně přesné než měření jednotlivých bodů. Vzhledem ke snímání a zaznamenávání informací většího množství bodů získáváme srozumitelnější obraz o měřené součásti o jejím tvaru a profilu. Pokud potřebujeme získat informace o odchylce tvaru součásti pro stanovení chyby součásti, je skenovací dotykový systém vhodnou volbou [14].

Analogové skenovací snímací systémy

Snímací systém se skládá ze třech pružinových paralelogramů (Obr. 2. 9). Rozsah vychýlení těchto paralelogramů bývá obvykle ± 3 mm ve směru měřicích os. Pohyby v každé ose jsou snímány indukčním měřicím systémem. Nulový bod indukčního měřicího systému je v neutrální pozici každého paralelogramu. Systém pohybujících se cívek generuje měřicí sílu, jakmile dojde ke kontaktu s obrobkem. Velikost této síly si definujeme sami podle tvaru a materiálu měřené součásti. Měření analogovým skenovacím systémem probíhá ve statickém režimu, to znamená, že odečet souřadnic probíhá za klidu stroje. Tento režim měření umožňuje přesnější měření. Dále analogové skenovací snímací systémy mohou využívat pasivní senzory, to je zařízení, které zjistí průhyb sondy, nebo aktivní senzory, které aktivně kontrolují vychýlení snímače a přítlačnou sílu [14, 15, 18].



Obr. 2. 9 Analogový skenovací systém Zeiss [15]

Skenovací dotykové sondy na trhu

Společnost Zeiss na trh uvedla skenovací dotykovou sondu VAST XXT (Obr. 2. 10 vlevo). Je to pasivní senzor umožňující jak měření jednotlivých bodů, tak skenování. Průhyb této sondy se odvíjí od délky dřívku, hodnota průhybu uváděná výrobcem je maximálně ± 3 mm. Pokud tuto skenovací sondu upevníme do otočné polohovací hlavy RDS (Obr. 2. 28 vpravo), tak měřicí rychlost bude 2,5 sekundy/bod a chyba měření v závislosti na přesnosti stroje bude $1,7 \div 3$ μ m. Dále společnost Zeiss

nabízí aktivní skenovací senzor VAST XT gold (Obr. 2. 10 vpravo). Tento senzor umožňuje aktivní skenování, tedy skenování s kontrolou průhybu sondy a přítlačné síly, kterou si můžeme sami nastavit podle měřené úlohy. Rozsah vychýlení sondy je v ose X a Y ± 2 mm a v ose Z $\pm 2,5$ mm [16].



Obr. 2. 10 Vlevo: pasivní senzor VAST XXT; vpravo: aktivní senzor VAST XT gold [16]

Společnost Hexagon nabízí skenovací sondy HP-S-X5 (Obr. 2. 11 1. zleva) upevněné v analogové pevné hlavě pro přesné a opakovatelné měření. Je vhodné je aplikovat při měření malých tolerancí a složitých geometrií mechanických částí jako jsou ozubená kola, rotory, lopatky. Pro měření s otočnou hlavou nabízí společnost skenovací sondy HP-S-X3 (Obr. 2. 11 2. zleva), které umožňují buď bodové měření, nebo vysokorychlostní skenování. Tyto sondy jsou vhodné pro kontrolu rozměrů malých až středně velkých vysoce přesných prizmatických dílů a složitých geometrických tvarů [17].



Obr. 2. 11 Zleva: HP-S-X5, HP-S-X3, SP80, SP600M [13,17]

Společnost Renishaw nabízí skenovací sondu SP80 (Obr. 2. 11 3. zleva), která je montovaná přímo do pinoly stroje. Sonda je vhodná pro použití s dlouhými doteky. Rychlost skenování může být v závislosti na délce doteku až 5 mm/s. Skenovací sonda SP600M (Obr. 2. 11 4. zleva) se může upnout jak do pevné, tak i do otočné hlavy. Umožňuje rychle skenování i rychlé měření ve spínacím režimu [13].

2.2 Bezdotykové snímací systémy

Bezdotykové snímací systémy jsou druhým typem senzorů pro akvizici dat (Obr. 2. 1). Tyto snímací systémy nevyžadují fyzický kontakt s měřeným povrchem a umožňují na rozdíl od dotykových snímacích systémů odečít více bodů v jeden časový okamžik. Tím je měření produktivnější a rychlejší.

2.2.1 Principy bezdotykových snímacích systémů

Při použití bezdotykových snímacích systémů je měřený objekt reprezentován 2D řezy nebo mrakem bodů, které jsou snímány pomocí energetických toků jako je světlo, zvuk, nebo magnetické pole. Následně je pozorována energie odražená objektem, nebo procházející skrz objekt. Geometrie objektu je pak vypočítána použitím hodnot z triangulace, měření doby letu, interference vln, nebo zpracováním obrazu. Podstatné je, že u těchto metod nedochází ke kontaktu mezi měřícím zařízením a objektem.

Obecnými vlastnostmi bezdotykových metod jsou výhody jako

- Nedochází k fyzickému kontaktu
- Rychlá digitalizace
- Pro většinu aplikací obvykle postačující přesnost a rozlišení
- Možnost detekovat barvy
- Možnost skenovat objekty s vysokými detaily, kde by mechanické sondy byly příliš velké k dosažení požadovaného výsledku

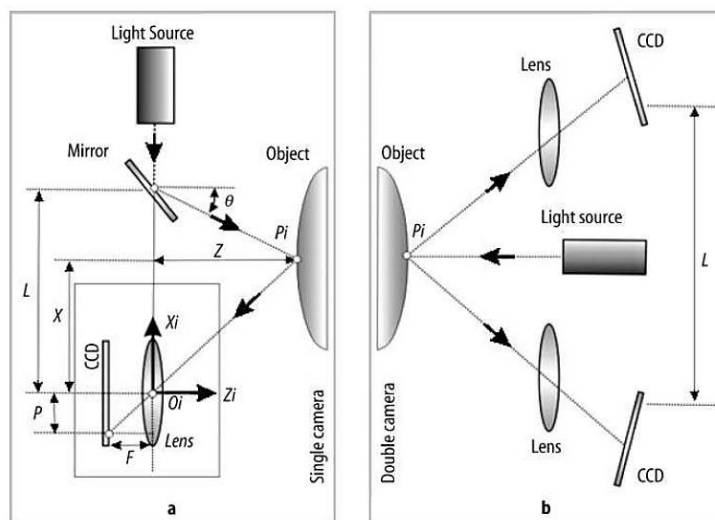
Nevýhodami naopak je:

- Možné problematické snímání některých barevných, průhledných, nebo odrazivých povrchů
- Nižší přesnost v porovnání s kontaktními metodami
- Menší stabilita měření (vliv osvětlení, vliv povrchu součástí)

Triangulace

Senzory pracující na principu triangulace využívají k měření změnu obrazu závislou na vzdálenosti / tvaru měřeného vzorku od snímací hlavy. Hlavními částmi senzorů jsou zdroj světelného paprsku a detektor, který se skládá z optického prvku a detektoru polohy (nejčastěji CCD snímač) [20].

Podle konstrukce a typu snímání tyto měřicí systémy mohou snímat v bodech, rastru, nebo v pružích. Následující Obr. 2. 12 ukazuje běžné snímací schéma za použití jedné kamery, nebo dvojice kamer.



Obr. 2. 12 Triangulační schéma: a) 1 CCD kamera; b) 2 CCD kamery [1]

Jak je z obrázků vidět, tak společným principem pro tyto snímací systémy je promítání odpovídajícího vzoru (bod, pruhy, mřížka) na měřený objekt. Analýzou tvaru obrazu deformovaného povrchem měřené součásti lze pak zrekonstruovat tvar povrchu součásti.

Ke změně promítaného obrazce, nebo v nejjednodušším případě posunu promítaného bodu zobrazeném na CCD snímači, dochází v závislosti na vzdálenosti objektu od triangulační základny. V Obr. 2. 12 označena jako L [1].

V případě, že je použita jedna kamera, zdroj světla promítá bod, nebo přímku na objektu pod definovaným úhlem. Kamera pak snímá pozici bodu nebo přímky na objektu. V případě realizace více kamerami zdroj světla nemusí promítat pod definovaným úhlem, ale stačí, když promítá pohyblivý nebo statický umělý obrazec na povrch součásti.

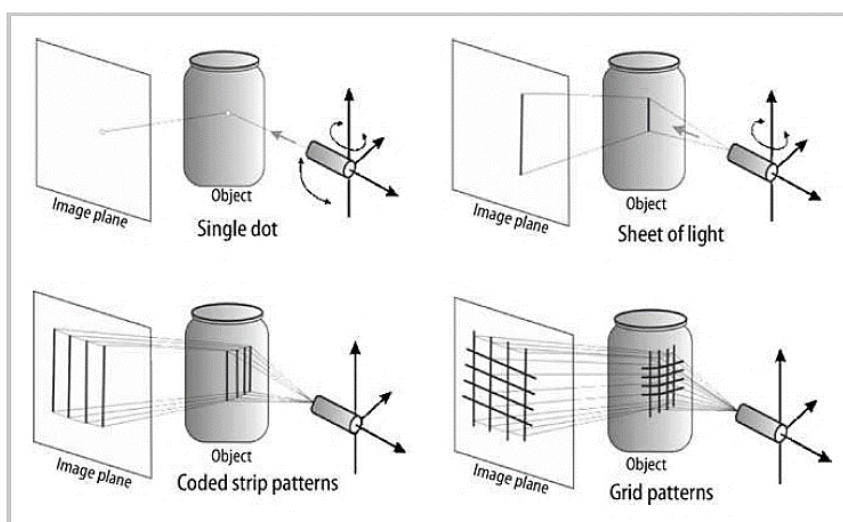
Chyba měření je přímo úměrná Z^2 (výška triangulačního trojúhelníku), ale nepřímo úměrná ohniskové vzdálenosti a velikosti základny. Proto zvětšení základny může zlepšit přesnost měření. Kvůli praktickým omezením ale nemůže být základna skeneru neomezeně zvětšována. Proto jsou triangulační skenery obvykle využívány k měření malých objektů z krátkých vzdáleností [1].

Pokud je užito jednoduchých vzorů, jako je bod, nebo plátek světla, tak je triangulační skener namontován na pohyblivé rameno CMM stroje, které umožňuje realizovat více

skenu z různých pozic. Tím se řeší potíže související se zastíněním některých částí objektu.

Proužková projekce

Kvalitu skenování na principu triangulace zlepšuje použití složitějších vzorů strukturovaného světla. V tomto případě je na objekt promítána 2D struktura a kamerou je snímán její obraz. Na rozdíl od předchozího případu promítání bodu nebo linie, jsou strukturované vzory rozšířeny na 2D obrazce jako je mřížka, nebo složitější kódové struktury. Důvodem použití složitějších vzorů je jednak možnost rychleji realizovat proces snímání a také umožňuje vhodným zpracováním obrazu zmírnit některé negativní vlivy povrchu a tvaru objektu, jako jsou například odlesky, částečně zastíněné struktury apod [1].

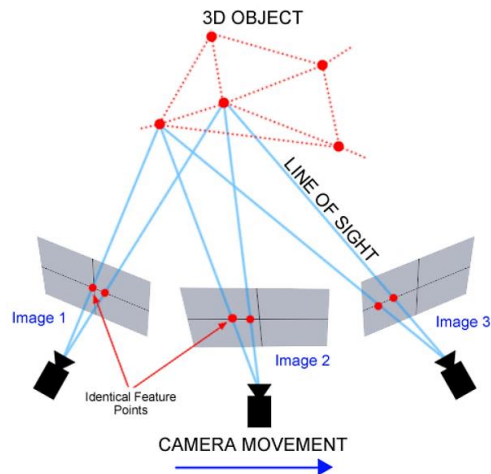


Obr. 2. 13 Různé vzory použité při proužkové projekci [1]

Fotogrammetrie

Fotogrammetrie se zabývá extrakcí maximálního množství informací z fotografických snímků. Ze souboru snímků získaných z několika míst běžnými fotografickými postupy dokážeme rekonstruovat třírozměrný tvar objektu včetně jeho textury [21].

Samotný proces spočívá v pořízení mnoha kvalitních snímků objektu z co největšího množství pohledů na objekt (Obr. 2. 14). Takto získané snímky jsou poté algoritmicky zpracovány a výsledný tvarový model musí být rozměrově zkalibrován. Pro tento proces je dostupných mnoho softwarových nástrojů využívajících různě pokročilé algoritmy např. VisualSFM, Regard3D [21].



Obr. 2. 14 Fotogrammetrie [22]

Výhodou této metody je její implementační jednoduchost a univerzální použití. Problematické jsou pouze objekty, které jsou lesklé, mají periodicky opakující se strukturu, nebo jsou naopak bez struktury, která by mohla sloužit ke správnému sesazení snímků [21].

Měření doby letu (Time of flight)

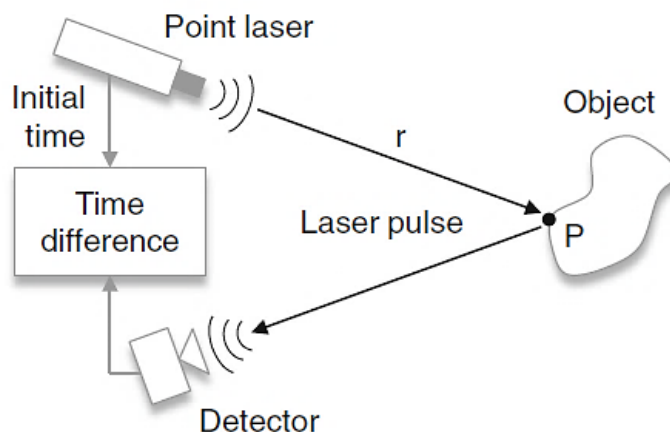
Ke skenování objektů, kde to jejich rozměry umožňují, lze využít princip měření doby letu. Kdy vyslaný signál (paprsek, zvuk) se odráží od měřeného povrchu součásti a je zachycen detektorem. Pomocí elektroniky je vyhodnocena doba, za kterou se vrátí signál vyslaný zdrojem světla do detektoru. Protože se u tohoto principu využívá konečné rychlosti šíření podle vztahu [23]:

$$D = \frac{ct}{2}$$

Kde

- D - měřená vzdálenost
- c - rychlost šíření
- t - měřený čas

Je vidět, že velmi kritické je v tomto případě schopnost přesně měřit čas, který definuje minimální rozsah a přesnost měření. Pro představu pro případ využití světla ve formě laserového pulsu, kde rychlost šíření ve vzduchu je přibližně 3×10^8 m/s a rozlišení měření času $1 \mu\text{s}$ dostaneme rozlišení měřené vzdálenosti $\sim 150\text{m}$ [23].



Obr. 2. 15 Měření vzdálenosti laserovým impulsem principem TOF [1]

Komerční realizace lidar senzorů mají časové rozlišení podstatně lepší a dosahují proto rozlišení v měřené vzdálenosti v řádu setin milimetrů [23].

Nevýhodou je, že skenery pracující na principu doby letu nezobrazují texturu objektu ale pouze jeho geometrii. Nejsou vhodné pro digitalizaci malých a středně velkých objektů [1].

Zařízení, které pracuje na principu doby letu, je laser radar. Příkladem může být laser radar MV331/351 od společnosti Nikon metrology (Obr. 2. 16). Je vhodný pro aplikace o poloměru až 50 metrů. Přesnost měření závisí na velikosti měřeného objektu. Při velikosti 2 m je přesnost měření 24 μm a při velikosti 30 m 301 μm . Uplatňuje se např. při kontrole částí letadel, při optimalizaci geometrie větrné turbíny [24].

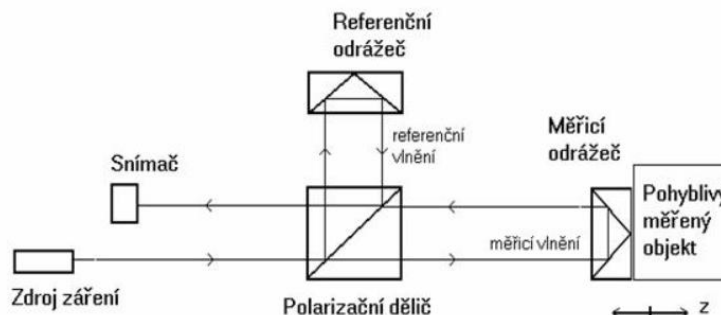


Obr. 2. 16 Laser radar MV331/351 [24]

Interferometrie

Interferometrické systémy patří mezi jedny z nejvíce rozšířených metod využívaných pro měření a kontrolu tvaru ploch. Využívají principu superpozice (skládání) dvou nebo více vln monochromatického či polychromatického koherentního vlnění, která spolu

interferují. Vlnění vyzařované ze zdroje záření je v polarizačním děliči rozděleno na měřicí a referenční (Obr. 2. 17). Dochází k odrazu obou vlnění, které ještě před dopadem na snímač (detektor) interferují. Lze zaznamenat amplitudy vln a také jejich fázový posun, který je zobrazen pomocí interferenčního obrazce. Interferometrie se vyznačuje vysokou přesností měření až s nanometrickou přesností [13, 18, 25],



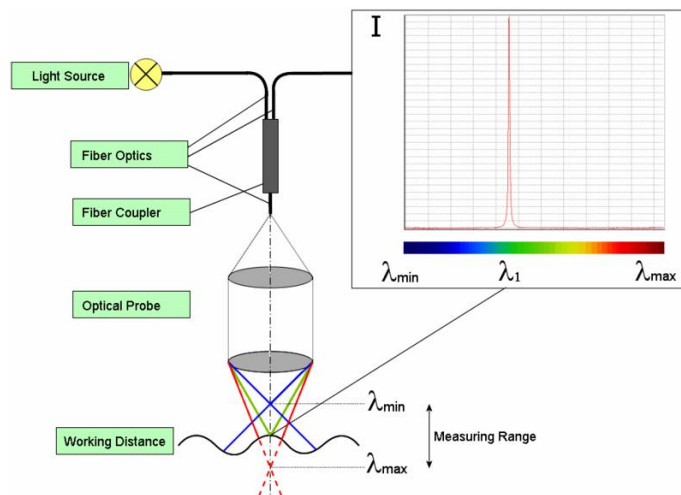
Obr. 2. 17 Princip optické interferometrie [26]

Principy založené na principu optické interferometrie jsou: interferometrie pracující s více vlnovými délkami, holografická interferometrie, skvrnová interferometrie, interferometrie s bílým světlem [26].

Měření pomocí bílého světla

Chromatický senzor bílého světla je vhodnou volbou pro měření povrchů lesklých a méně tvarově členitých. Optimální úhel sklonu senzoru vůči měřenému povrchu se pohybuje mezi 60 a 90 stupni. Pokud potřebujeme měřit tvarově složité geometrie, je vhodné kombinovat tuto sensoriku s otočnou hlavou.

Principem (Obr. 2. 18) je zaznamenávání vzdálenosti povrchu dle intenzity vlnové délky odraženého paprsku zpět na detektor. Největší intenzita světla, které se promítá zpět do detektoru, pak odpovídá vlnové délce, která je na povrchu. Mimo povrch dochází k rozostření. Paprsek se odrazí od povrchu s určitou vlnovou délkou, která je v barevném spektru znázorněna peakem. Pozice tohoto peaku nám udává vzdálenost od měřeného povrchu. Měřicí rozsah těchto senzorů bílého světla bývá v řádech jednotek milimetrů.



Obr. 2. 18 Princip měření zaostřeným bílým světlem

Měření pomocí kamery

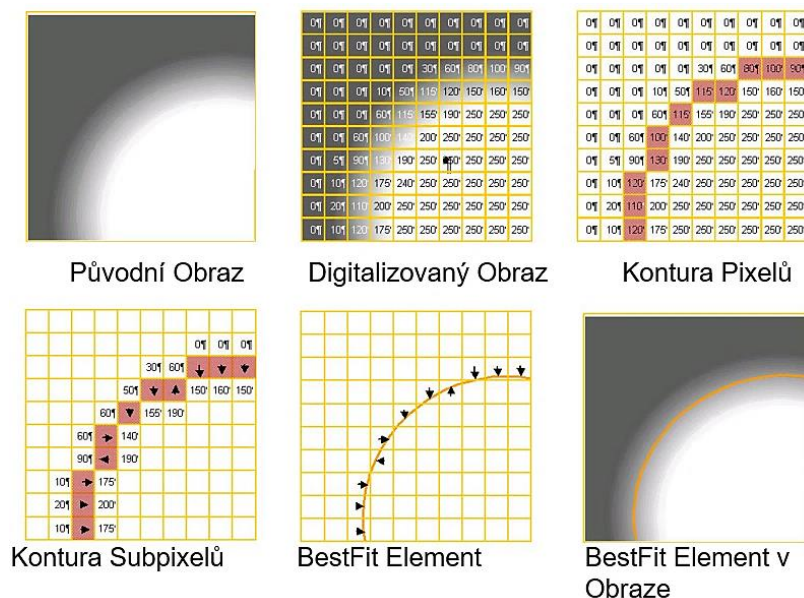
Kamera je další typ optického bezdotykového snímacího systému, který využívá CCD kameru. Elektronika kamery převede optický signál na digitální obraz, který je poté použit pro výpočet měřených bodů pomocí odpovídajícího softwaru. Měření s vyšší přesností dosáhneme použitím telecentrického objektivu. Výhodou telecentricity je konstantní zvětšení nezávislé na vzdálenosti měřeného povrchu od objektivu a zároveň nedochází ke zkreslení obrazu mimo osu objektivu.

Hlavními aplikacemi je měření drobných dílů, dílů s dvourozměrnými geometrickými prvky, snadno deformovatelných dílů, dílů z měkkých materiálů (plech, pryž, plast). [14, 16, 17]

Zpracování obrazu

Ke zpracování obrazu dochází všude tam, kde je CCD prvek a 3. rozměr se poté vytváří na základě triangulace.

Zdroj světla osvětluje měřenou součást. Na protější straně součásti je snímací čip s optikou vhodnou pro zvolenou aplikaci (např. s telecentrickým objektivem). Samotné měření spočívá v číslicovém zpracování obrazu tak, že jsou identifikovány pixely, které odpovídají hraně součásti. Jejich pozice jsou interpolovány do hladké křivky a následně jsou vypočteny souřadnice křivky v požadovaných (měřených) bodech. Tento postup je znázorněn na Obr. 2. 19. K nalezení pixelů na hraně součástí různí výrobci využívají jiné algoritmy (2D edge finding, gray value processing, binary processing) [27].



Obr. 2. 19 Analýza obrazu [27]

Nutnou podmínkou pro užití tohoto systému měření je zajištění vhodného osvětlení měřeného vzorku, které zajistí dostatečný kontrast mezi objektem a okolím. Toho není možné vždy dosáhnout. Proto existují další systémy, které se liší především způsobem osvětlení vzorku a optikou před snímacím prvkem.

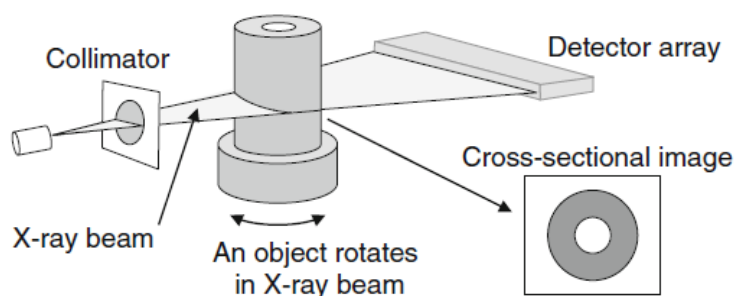
Typickým příkladem problematického prvku na součásti jsou slepé díry. Pro jejich osvětlení se proto využívá vláknové sondy, která přivádí světlo dovnitř otvoru. Vláknovou sondu lze navíc, kromě prostého využití jako zdroje světla ve slepých dírách využít i jako kontaktní snímač, neboť její pozice je měřitelná ze snímaného obrazu. Čímž lze v některých případech zlepšit přesnost nebo realizovat měření drsnosti povrchu [27].

Počítačová tomografie

Počítačová tomografie (z anglického Computed Tomography) využívá při měření rentgenové záření. Je to nedestruktivní metoda měření, kdy pořízená data obsahují informace jak o povrchu a geometrii měřeného objektu, tak o jeho vnitřní stavbě (např. vnitřní vady u odlitků).

Na Obr. 2. 20 je znázorněn princip měření. Zdroj rentgenového záření generuje rentgenové paprsky, které nejprve dopadají na měřenou součást a poté na detektor. Po dopadu se pomocí výpočetní techniky vytvoří 2D snímek. Součást se během otáčí kolem svislé osy a v jednotlivých krocích se snímají stovky 2D snímků, ze kterých se poté vhodným propojením zkonstruuje 3D obraz měřené součásti. Vznikne tak virtuální model, který můžeme libovolně natáčet a celek podrobit dalším analýzám. Jelikož

z nasnímaných dat můžeme vytvořit CAD model, je počítačová tomografie vhodná pro reverzní inženýrství [1, 18].



Obr. 2. 20 Princip počítačové tomografie [1]

Jednou z nevýhod využití počítačové tomografie je omezená velikost měřené součásti, která se odvíjí od velikosti a možností tomografu. Další omezení je při materiálu součásti. Materiály s vysokou hustotou (kovy) vyžadují větší výkon k prozáření. Mezi vhodné materiály pro měření patří plast, hliník, lehké slitiny. Náklady na pořízení společně s náklady na provoz tomografu a materiálovými požadavky (rozměr, hustota materiálu součásti) omezují využití této metody [18].

2.2.2 Bezdotykové snímací systémy na trhu

Optické

Na Obr. 2. 21 jsou uvedeny zástupci bezdotykového snímacího systému využívajícího bílé světlo. Vlevo je DotScan od firmy Zeiss, který nachází využití při skenování kovových částí kolenních implantátů. V pravé části je senzor bílého světla od firmy Hexagon, jehož výhodou je malý průměr ohniska, které je optimalizované pro vysoké rozlišení [16, 17].



Obr. 2. 21 Vlevo: ZEISS DotScan; Vpravo: PRECITEC Lateral Resolution [16, 17]

Tab. 2. 1 Parametry ZEISS DotScan a PRECITEC LR [17, 28]

	Pracovní vzdálenost	Měřicí rozsah	Rozlišení
ZEISS DotScan	50, 21, 10 mm	10, 3 a 1 mm	60, 36 ,28 nm
PRECITEC LR	6,5 mm	100 μm	3 nm

Pro měření pomocí kamery jsou zástupci uvedeni na Obr. 2. 22 vlevo je uveden zástupce od firmy Zeiss. Principem je osvětlení měřené součásti pomocí LED osvětlení a poté zobrazení osvětleného místa pomocí 2D světlo-citlivého CCD snímače. Vpravo na stejném obrázku je zástupce od firmy Hexagon.



Obr. 2. 22 Vlevo: ViScan; Vpravo: HP-C-VE Vision Sensor [16, 17]

Tab. 2. 2 Parametry ViScan a HP-C-VE Vision Sensor [17, 28]

	Pracovní vzdálenost	Měřicí rozsah
ViScan	75–90 mm	4,8 x 3,7 mm
HP-C-VE Vision Sensor	75 mm	6 x 5 mm

Laserové

Pro bezkontaktní měření lze dále využít laser skenery. Patří do kategorie laserových liniových snímačů, které využívají pro získání třetího rozměru triangulační metodu (princip vysvětlen v kapitole Triangulace). Využívají se pro přesné strojní součásti, tvarově složitější součásti a součásti malých rozměrů [18]. Zástupem laser skeneru od společnosti Zeiss je optický liniový senzor LineScan (Obr. 2. 23 vlevo). Od společnosti Hexagon je to laserový skener HP-L-10.6 (Obr. 2. 23 uprostřed).



Obr. 2. 23 Vlevo: LineScan; uprostřed: HP-L-10.6; vpravo Nikon LC15Dx [16, 17, 24]

Společnost Nikon metrology nabízí dva druhy laser skenerů. Prvním druhem je digitální laser skener Nikon LC15Dx (Obr. 2. 23 vpravo). Je to skener pro stacionární souřadnicové měřicí stroje a tím se vyznačuje svou přesností. Chyba snímání je 1,9 μm . Momentálně je to nejpřesnější skener od této společnosti [18, 24].

Tab. 2. 3 Parametry LineScan, HP-L-10.6, Nikon LC15Dx [24, 28]

	Pracovní vzdálenost	Šířka linie	Body/linie
LineScan	63, 94, 220 mm	25, 50, 80 mm	1280
HP-L-10.6	170 +/- 30 mm	25, 60, 124 mm	2001
LC15Dx	60 mm	18 mm	900

Rentgenové

Zástupce bezdotykového snímacího systému využívající rentgenového záření je ZEISS METROTOM (Obr. 2. 24) od společnosti Zeiss [16].



Obr. 2. 24 ZEISS METROTOM [16]

2.3 Nosič snímacího systému

Snímací systém je upevněn na CMM pomocí nosiče snímacího systému tzv. hlavy, která je upevněna na CMM na konci pinoly. Hlavy se dělí na pevné a otočné (indexovatelné) [29].

2.3.1 Pevná hlava

Poloha snímače v pevné hlavě je pevně orientovaná a bez možnosti natáčet snímací systém. Jediná pozice snímače je směrem dolů a měření je uskutečněno pohybem ve třech osách – osy CMM. Výhodou pevné hlavy oproti hlavě otočné je, že si nevňásíme do měření nepřesnosti. Nevýhodou tohoto systému je nižší produktivita vzhledem k nutnosti použít složitější snímač nebo sestavit konfiguraci dalších snímačů. Při sestavování konfigurace si musíme dávat pozor na její celkovou hmotnost, neboť u každé pevné hlavy je uvedena maximální možná hmotnost upnuté konfigurace. Dále musíme pečlivě zvážit volbu délky snímačů, aby konfigurace nebyla asymetrická.

Na Obr. 2. 25 je uveden příklad pevné hlavy od společnosti Zeiss. Umožňuje upnout konfiguraci snímačů o celkové hmotnosti 600 g a délce 800 mm. Také má schopnost pracovat s asymetrickou konfigurací. Při skenování snímáme rychlostí 200 bodů za sekundu s přesností 0,5 – 1,1 μm v závislosti na typu a velikosti souřadnicového stroje [16].



Obr. 2. 25 VAST gold [16]

2.3.2 Otočná (indexovatelná) hlava

Otočná hlava na rozdíl od hlavy pevné umožňuje obsluze měřit jedním snímačem v několika směrech, snímání je možné provádět v mnoha úhlech. Odpadá sestavování obtížných konfigurací snímačů. Polohování je možné ve dvou rotačních osách A a B. Natočení může být po 15° nebo 7,5°.

Rozlišujeme dva typy indexovatelných hlav:

- a) Manuální otočné hlavy
- b) Motorické otočné hlavy

Manuální otočné hlavy

Tento typ otočných hlav vyžaduje pro své nastavení manuální zásah operátora. Můžeme ho použít jak na manuálních měřicích strojích, tak na počítačově řízených, kdy se při každém potřebné změně nastavení úhlu systém zastaví a čeká na ruční nastavení změny pozice. Pro každou novou polohu snímače je vyžadována nová kalibrace. Je důležité, aby pozice kalibrační koule byla po celou dobu snímání neměnná, neboť by mohlo docházet k vnášení odchylek a následně k nepřesnému měření [15].

Na Obr. 2. 26 vlevo je uvedený zástupce od společnosti Renishaw. Je to manuální indexovatelná hlava MH20i. Tato hlava má možnost opakovatelného polohování ve dvou osách, kdy osa A se otáčí o 90° v rovině Z a osa B o $\pm 180^\circ$ v rovině X-Y. Polohu měníme o 15° a celkově můžeme nastavit 168 poloh. Hlava měří se s přesností opakovatelnosti polohování $1,5 - 2,5 \mu\text{m}$ (2σ) [13].

Opakovatelnost polohování znamená, že po provedení počáteční kalibrace můžeme snímač polohovat do další libovolné kalibrované polohy bez nutnosti kalibrace snímače. Ale nesmíme zapomenout, že i přesto si každou změnou polohování vnášíme do měření nepřesnost.



Obr. 2. 26 Vlevo: MH20i; vpravo: HH-MI-M [13, 17]

Na Obr. 2. 26 vpravo je manuální otočná hlava HH-MI-M od společnosti Hexagon. Je to otočná hlava se závitovým připojením M8 a možností nastavení do 168 poloh. Nastavení je v přírůstcích po 15° . Je zde zajištěná opakovatelnost polohování s přesností $1,5 \mu\text{m}$ [17].

Motorické otočné hlavy

Motorické indexovatelné hlavy umožňují automatické změny poloh sondy podle programu měření. Motorická hlava PH10M od společnosti Renishaw (Obr. 2. 27 vpravo) je určená k polohování sondy v některé ze 720 opakovatelných poloh. Polohování je

možné ve dvou rotačních osách A (0° až 150°) a B (-180° až 180°) (Obr. 2. 27 vlevo) v krocích po $7,5^\circ$. Tato hlava poskytuje přesnost polohování $0,4 \mu\text{m}$ (2σ) [13].



Obr. 2. 27 Vlevo: zobrazení os pro polohování; vpravo: PH10M [13]

Na Obr. 2. 28 vpravo je uvedena kontinuální otočná hlava od společnosti Hexagon, která umožňuje natočit sondu do libovolného polohy. Lze používat dlouhé nástavce, abychom měli plný přístup k měřené součásti. Navíc je vhodná pro použití s bezkontaktními senzory. Opakovatelnost polohování je 1×10^{-5} rad [17].



Obr. 2. 28 Vlevo: HH-ACW-43MW Kontinuální hlava; vpravo: otočná polohovací hlava RDS [16, 17]

Na Obr. 2. 28 vpravo je otočná polohovací hlava RDS od společnosti Zeiss. Tato hlava umožňuje snímání v některé z celkem 20 736 poloh. Krok pro nastavení je $2,5^\circ$. Kalibrace je nutná dle výrobce jen v několika prostorových úhlových polohách [16].

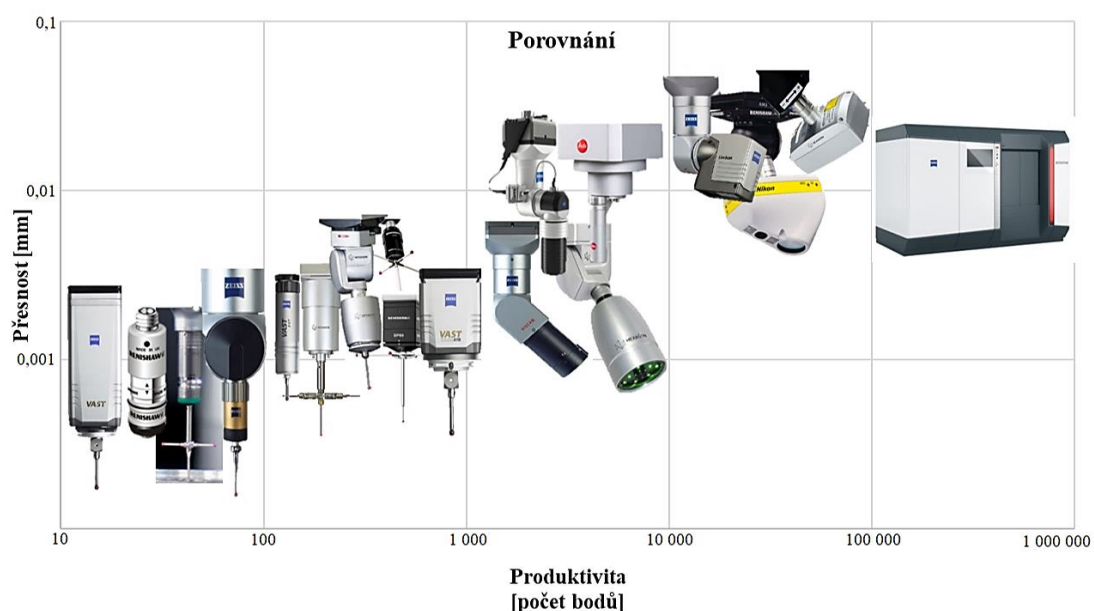
Zvláštní kategorii tvoří pětiosé snímací systémy. Umožňují souvislý pohyb doteku po dráze bez nutnosti odjezdu od povrchu z důvodu indexování. Tento systém umožňuje měření pouze dotykovými snímacími systémy, kdy dochází pouze k pohybu hlavy a ne k pohybu celé konstrukce CMM [13].

2.4 Porovnání

Základním rozdílem mezi dotykovým a bezdotykovým měřením je kontakt s měřeným povrchem, kdy senzor při dotykovém měření potřebuje fyzický kontakt se součástí, ale bezdotykový nikoli. Dalším rozdílem je počet snímaných bodů. U dotykových snímáme

v řádech několika bodů za sekundu, zatímco při použití bezdotykových snímačů je produktivita měření vyšší až v řádech sta tisíců za sekundu. Naproti tomu se ale se zvyšující se rychlostí snímání snižuje přesnost. U dotykových je přesnost v řádech tisíců milimetru, u bezdotykových v řádech setin. U měření bezdotykovými systémy nemá vliv na měření měřicí síla, korekce o poloměr kuličky jako je tomu u dotykových systémů. V porovnání z hlediska pořizovacích nákladů je pořízení bezdotykového měřicího systému finančně náročnější než pořízení systémů dotykových.

Na Obr. 2. 29 je porovnání dotykových a bezdotykových z hlediska závislosti přesnosti měření na produktivitě. Do porovnání jsou zahrnuty i kamerové systémy, ale nesmíme zapomenout, že snímání těmito systémy je přesné, ale vznikají pouze 2D obrazy.



Obr. 2. 29 Porovnání snímacích systémů v závislosti přesnosti měření na produktivitě měření

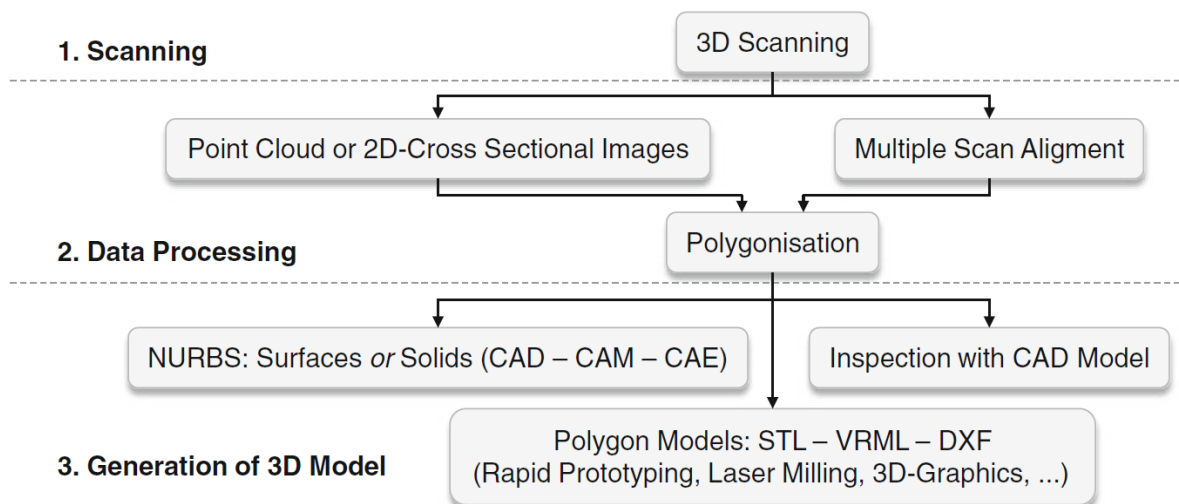
3 Popis postupu reverzního inženýrství

Důvodů, proč se využívají metody RE, je mnoho. Jedním důvodem může být situace, kdy máme produkt, potřebujeme ho vyrobit znovu, ale výrobce již neexistuje a my nemáme dostupnou ani výrobní dokumentaci. Nebo výrobce daného produktu stále existuje, ale produkt se již nevyrábí, CAD model k němu neexistuje a dostupná data jsou zastaralá. Dalším důvodem může být možnost pomocí metod RE analyzovat dobré a špatné vlastnosti produktů vyráběných konkurencí. RE můžeme uplatnit při kontrole kvality vyrobených součástí a při odstraňování a eliminování špatných vlastností výrobků [1].

3.1 Postup reverzního inženýrství

Obecný postup reverzního inženýrství se skládá ze tří fází (Obr. 3. 1):

1. Vlastní měření předmětu
2. Zpracování získaných dat
3. Vytvoření 3D modelu



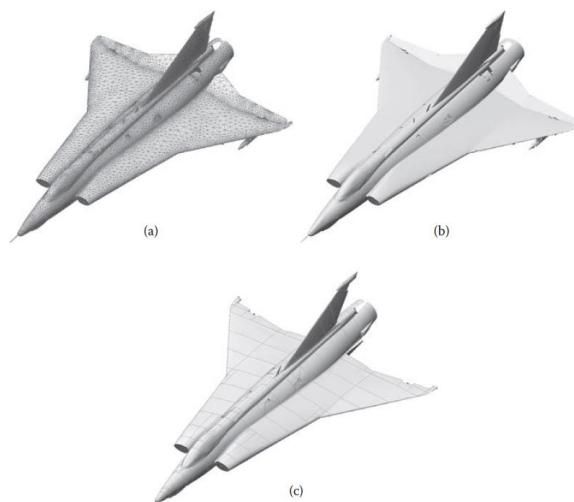
Obr. 3. 1 Obecný postup reverzního inženýrství [30]

3.1.1 Vlastní měření předmětu

Tato etapa je klíčová část reverzního inženýrství. Dochází k získání reálných dat součásti. Pro korektní dosažení všech potřebných informací musíme zvolit vhodný snímací systém a správnou strategii získání dat měřeného objektu. Dále si musíme připravit součást určenou pro měření a provést vlastní extrakci dat, kdy získáme aktuální informace popisující všechny geometrické prvky součásti. Výstupem této části je mrak bodů nebo 2D snímky. Mrak bodů je soubor bodů o souřadnicích X-Y-Z v prostoru [1, 3].

3.1.2 Zpracování dat

V této etapě pracujeme se získaným mrakem bodů, který importujeme, odstraníme body vzniklé šumem a zredukujeme počet bodů. K těmto dvěma úkolům máme k dispozici škálu předem definovaných filtrů. Je nutné vědět proč a za jakým účelem se jaký filtr používá, abychom ho správně aplikovali a dosáhli požadovaného a přesného výsledku. U některých případů je nutné mnohonásobné skenování, to je zaručené díky rotaci součásti. Výhodou je, že do výsledku nevchází chyby způsobené slučováním několika mraků bodů z různých skenování. Mrak bodů není přímo použitelný ve většině strojírenských aplikací. Výstupem této části je konvertovaný mrak bodů do vhodného formátu [1, 3].



Obr. 3. 2 a) Wireframe polygonální model; b) Polygonální povrchový model; c) NURBS model [1]

3.1.3 Vytvoření 3D modelu

Poslední část procesu RE je nejsložitější a nejkomplexnější částí procesu RE. Z importovaného a zpracovaného mraku bodů je nutné pomocí vhodných nástrojů a algoritmů vytvořit model, který co možná nejpřesněji prezentuje informaci popsanou vloženými daty. K tomu slouží softwary určené pro RE. Jedním z nich je software společnosti Zeiss ZEISS Reverse Engineering, jehož krátkému představení se práce věnuje později. Výstupem třetí fáze procesu RE je geometrický model v jednom z několika formátů jako je IGES, VDA, STL, DXF apod [1, 3].

3.2 Přesné aplikace

Abychom docílili přesných výsledků při využití metod RE, je nutné získat přesná data, se kterými budeme dále pracovat. K tomu, abychom dosáhli přesné akvizice dat, musíme vybrat vhodný snímací systém. V posledních letech je na trhu mnoho různých snímacích zařízení, která jsou dostupná v rozumných cenových relacích. Ale nesmíme zapomínat, že přesnost dat také z velké části záleží na spolehlivosti a preciznosti měřicích strojů.

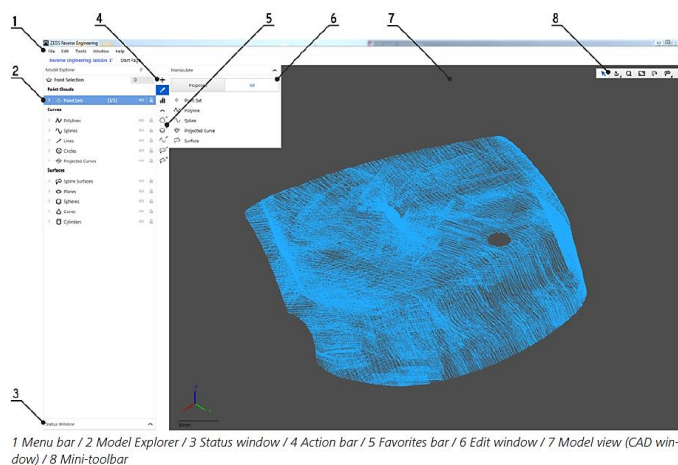
Na Obr. 2. 29 jsou uvedeny dostupné snímací systémy na trhu. Jsou uspořádány z hlediska produktivity, a hlavně přesnosti měření.

3.3 Příklady softwarů pro reverzní inženýrství

3.3.1 ZEISS Reverse Engineering

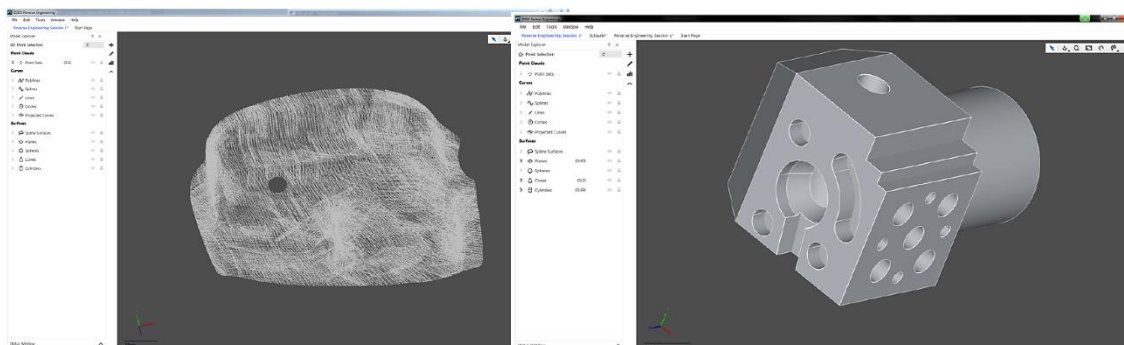
Jak jsem uvedla výše, pro reverzní inženýrství je potřebný odpovídající software určený pro převod naměřených dat ve 3D model. Jedním ze softwarů, které jsou dostupné na trhu, je software, který vyvinula společnost Zeiss. Je to software, se kterým budu pracovat v praktické části této diplomové práce. V následujících odstavcích bych chtěla v krátkosti představit postup práce s tímto softwarem.

Tento software nabízí uživateli přehledné rozhraní, s nímž můžeme pracovat i bez nutnosti podrobného zaškolení. Bez ohledu na vybranou technologii extrakce bodů nám software optimalizuje vytvořené body a připraví je pro další postup. Vzhledem k požadavkům na vysokou přesnost software používá pokročilé algoritmy, pomocí nichž docílíme přesného popisu povrchu. Na Obr. 3. 3 je zobrazeno uživatelské rozhraní pro práci v softwaru, kdy hlavní panel nabídek obsahuje přístup ke všem dostupným funkcím a nastavením, které software umožňuje [31].



Obr. 3. 3 Uživatelské rozhraní Zeiss [31]

Software umí pracovat se vstupními daty ve formátech TXT, STL, IGS atd. Na Obr. 3. 4 jsou uvedeny příklady importování vstupních dat - vlevo ve formátu TXT, kdy je vytvořen mrak bodů, a vpravo ve formátu IGES [31].



Obr. 3. 4 Vlevo: import dat ve formátu TXT; vpravo: import dat ve formátu IGES [31]

S takto importovanými daty můžeme dále pracovat, vytvářet elementy jako jsou plochy, roviny, křivky, válce, kužele apod. S takto vytvořenými elementy můžeme dále pracovat. Za pomoci nabízených konstrukcí a funkcí je můžeme rozšiřovat, posouvat atd. a také je můžeme analyzovat [31].

Tento software dále umožňuje samotné nasnímaní dat neznámého povrchu. Kdy po propojení se strojem můžeme buď samovolně vytvářet mrak bodů, nebo po nasnímaní několika hraničních bodů vytvořit obrys plochy a po nastavení parametrů spustit skenování. Nesmíme však zapomenout, že software neumí provést korekci o poloměr snímače v případě dotykového snímání. Získáváme tak data souřadnic středů snímače místo bodů dotyku. Korekci je nutné poté při zpracovávání bodů provést samostatně pomocí funkce offset [31].

Zpracovaná 3D data můžeme vyexportovat ve formátech IGS, IGES, STP, STEP. Mrak bodů můžeme vyexportovat ve formátu TXT, TSV, CSV [31].

3.3.2 Geomagic Wrap

Software Geomagic Wrap je nástroj k transformaci 3D naskenovaných dat importovaných/exportovaných souborů do 3D modelů vhodný pro reverzní inženýrství. Umožňuje uživatelům přetvářet rovnou nasnímaná data z mraků bodů, data z dotykových snímačů i importované 3D formáty (STL apod.) do 3D polygonálních sítí a povrchových modelů, které lze dále využít ve výrobě, pro analýzy apod. Klíčovými funkcemi tohoto softwaru jsou například [32]:

- Podpora použití bezdotykových i dotykových snímacích systémů
- Úprava mraku bodů s následným rychlým a přesným vytvářením polygonálních modelů

- Nástroje pro přesné povrchy umožňující lépe kontrolovat kvalitu a rozložení povrchu
- Extrakce křivek a složitých tvarů z polygonových těl pro konstrukci modelu z nasnímaných dat
- Export souborů ve formátech WRP, IGES, Step, dxf, stl atd.

3.3.3 Geomagic Design X

Geomagic Design X je software, který v sobě kombinuje historii tvorby v CAD se zpracováním dat z 3D skenování. To znamená, že parametrické modely jsou zcela kompatibilní s CAD softwarem, který máme k dispozici, a jsou editovatelné. Mezi hlavní funkce tohoto softwaru patří upravování mraků bodů získaných z 3D nasnímaných dat, převádět je na polygonovou síť a generovat přesné povrchy. Jednou z dalších funkcí je funkce přesného vytváření povrchu, která konvertuje organické tvary do přesných CAD modelů [32].

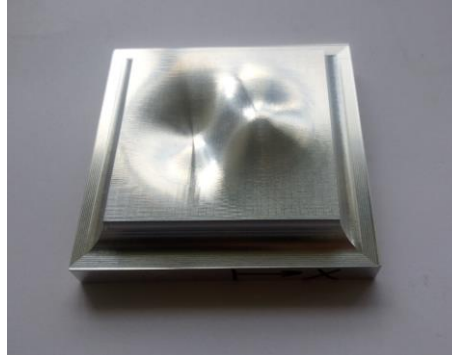
Na Obr. 3. 5 je porovnání softwarů od společnosti Geomagic – Geomagic Wrap a Geomagic Design X.

Porovnání produktů:	Geomagic Wrap	Geomagic Design X
Funkce:		
Skenování přímo do softwaru	✓	✓
Import bodů	✓	✓
Import sítě	✓	✓
Import CAD formátů	✓	✓
Inteligentní seskupování regionů sítě	✗	✓
Editace bodů (mazání, vzorkování, snižování šumů)	✓	✓
Základní editace sítě (vyplňování děr, úpravy a tvorba sítě, atd.)	✓	✓
Pokročilá editace sítě (brusný papír, tesání, atd.)	✓	✓
Zpracování velkých objemů dat	✗	✓
Generování 3D PDF	✓	✓
Automatická a přesná tvorba povrchů	✓	✓
Analýza odchylek sítě – CAD model	✓	✓
Inteligentní vkládání povrchů/těles/skic do CADu	✗	✓
Kompletní skicovací nástroje	✗	✓
Analýza přesnosti úrovně skic	✗	✓
Nástroje modelování těles	✗	✓
Natívním parametrický výstup do SolidWorks, NX, Inventor, Creo, Solid Edge	✗	✓
CAD modelování s historií tvorby	✗	✓
Renderování KeyShotem	✓	✓

Obr. 3. 5 Porovnání produktů Geomagic Wrap a Geomagic Design X [32]

4 Aplikace postupu na vybranou součást

V rámci experimentální části jsem aplikovala postup reverzního inženýrství, který je uvedený v kapitole 0, na součást obsahující obecnou tvarovou plochu (Obr.4.1). Součást je vyrobena z hliníkové slitiny EN AW 7075.



Obr.4.1 Zvolená součást s obecnou tvarovou plochou

Základní profil obecné tvarové plochy (Obr.4.1) obsahuje prohlubeň a výstupek. Základním úkolem této práce je postupně získat data této obecné tvarové plochy zvoleným snímacím systémem. Z naměřených dat vytvořím plochy.

Zvolené snímací systémy:

- Dotykový skenovací snímací systém
- Bezdotykový optický snímací systém – Bílé světlo
- Bezdotykový laserový snímací systém – Laser skener
- Bezdotykový rentgenový snímací systém – Počítačová tomografie

Jako referenční plochu pro vyhodnocení jsem zvolila plochu získanou dotykovým měřením. Vyhodnocování bude probíhat dvěma způsoby:

1. Způsobem je snímání plochy při nahodilém uspořádání bodů
2. Způsobem je snímání plochy při stejných souřadnicích bodů v ose x a y.

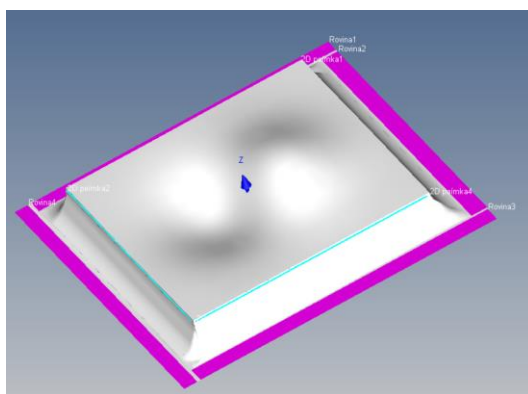
Výsledkem této experimentální části bude popsán postup získání a zpracování dat pro každý zvolený snímací systém a porovnání snímacích systémů z hlediska přesnosti nasnímání neznámé plochy.

4.1 Souřadný systém

Pro správné měření a kontrolu je nutné vyrovnání, tedy sestavení a stanovení souřadného systému. Ten bude u každého měření stejný, pouze získání elementů potřebných pro

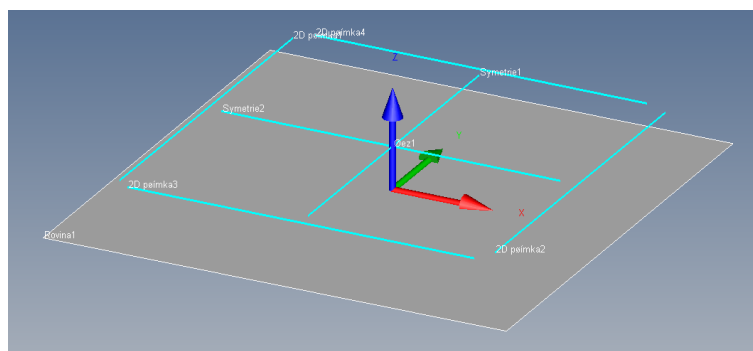
sestavení souřadného systému bude pro každý typ snímacího systému specifické. V této kapitole bych chtěla popsat stanovení a ověření souřadného systému v softwaru Calypso, které bude stejné pro všechna kontrolní měření.

Pro sestavení souřadného systému se nejprve na CAD modelu pomocí funkce „definovat prostorovou geometrii“ definuje rovina, tím se modelu odeberou v prostoru tři stupně volnosti. Dále se pomocí funkce „definovat přímku“ a tažením na každé straně modelu vytvoří 2D přímky. Mezi dvojicemi přímek se vytvoří symetrie, a nakonec řez mezi těmito dvěma symetriemi. Na Obr. 4. 2 jsou na součásti zobrazeny plochy pro sestavení souřadného systému. Fialovou barvou je označena rovina a světle modře je určená část pro definování 2D přímky.



Obr. 4. 2 Plochy pro sestavení souřadného systému

Následné sestavení souřadného systému je zobrazeno na Obr. 4. 3. Pro přesné nasnímání bylo nutné zvolit vhodnou strategii. Dráha pro snímání roviny je vytvořena pomocí lomené čáry, kdy se na rovině nasnímaly body a spojily liniemi. Samotné snímání bylo provedeno skenováním s krokem 0,1 mm při rychlosti 5 mm/s. 2D přímky byly také snímány skenováním při stejných parametrech.



Obr. 4. 3 Sestavení souřadného systému

4.2 Dotykový snímací systém

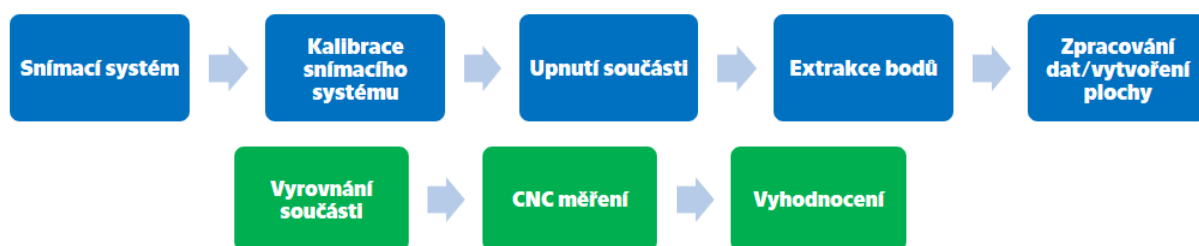
Pro tuto aplikaci jsem zvolila dotykový snímací systém s kuličkou z nitridu křemíku (Obr. 4. 4) místo klasického rubínu. Hliníková slitina při dotykovém měření může ulpívat na rubínu a my pak získáme nepřesné výsledky měření.



Obr. 4. 4 Dotykový snímací systém

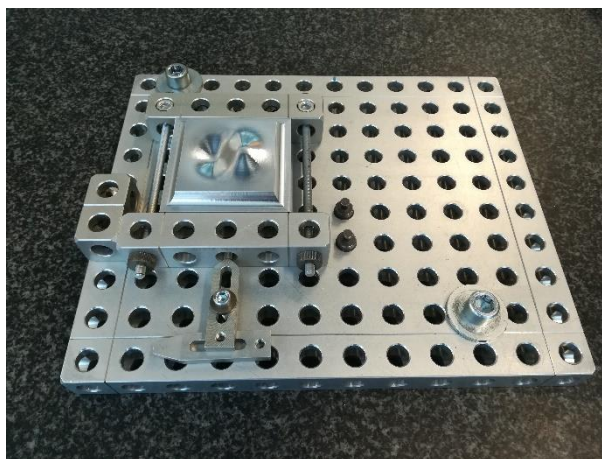
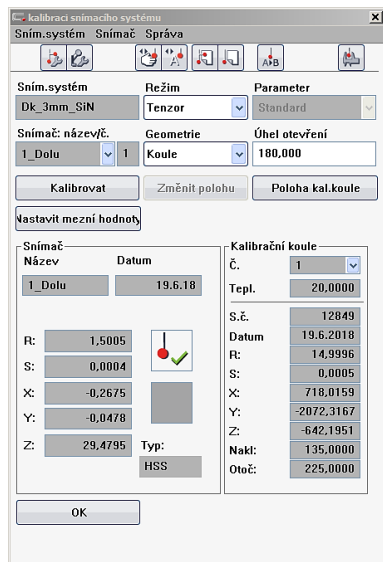
Měření neznámé tvarové plochy probíhalo na stroji UMC 1000 v laboratořích Zeiss Fakulty strojní ČVUT.

Postup snímání je schematicky zobrazen na (Obr. 4. 5). Modrou barvou je zobrazen postup měření pro každý snímací systém. Zelenou barvou je zobrazen postup zpřesňování plochy.



Obr. 4. 5 Postup měření

Prvním bodem měření (Obr. 4. 5) byla volba a sestavení snímacího systému (Obr. 4. 4). Druhým krokem byla kalibrace. Nejprve jsem zaměřila polohu kalibrační koule a následně kalibrovala snímací systém. Výsledkem kalibrace bylo zjištění odchylky snímače a průměr snímacího doteku (Obr. 4. 6 vlevo).



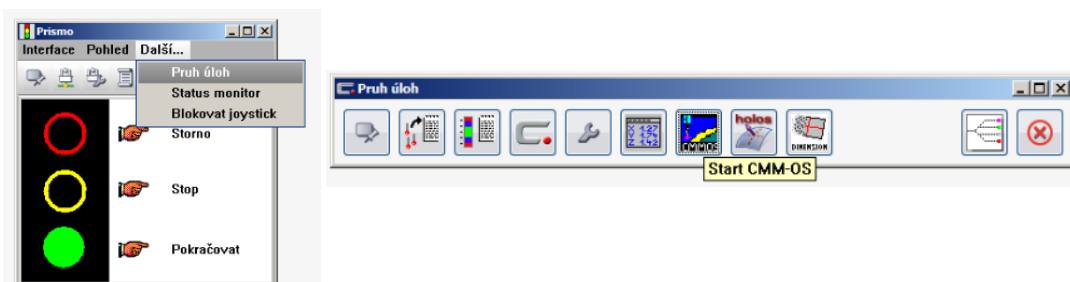
Obr. 4. 6 Vlevo: výsledky kalibrace; vpravo: upnutí součásti

Třetím krokem je upnutí součásti. Jelikož potřebujeme přístup seshora pro nasnímání plochy a z boku v horní části pro vyrovnání, je součást fixována pomocí prvků upínací stavebnice v dolní části. Upnutí součásti je zobrazeno na Obr. 4. 6 vpravo.

Čtvrtým krokem je samotná extrakce bodů, která bude probíhat dvěma způsoby. První způsob snímání bodů byl realizován v softwaru Zeiss Reverse Engineering (dále jen ZRE). Jedná se o software primárně určený pro reverzní inženýrství pracující s mrakem bodů, a neslouží primárně pro měření součástí, nicméně umožňuje realizaci omezeného snímání bodů v předem definovaných rastrech na rovině. Druhým způsobem je nasnímání bodů přímo pomocí softwaru Calypso. Jedná se o metrologický software dodávaný ke strojům Zeiss, který slouží zároveň pro programování a řízení CMM.

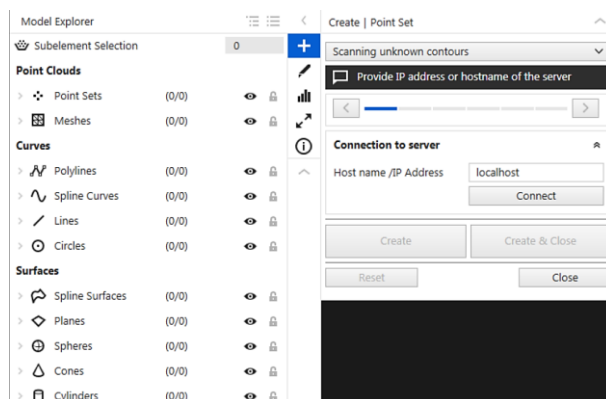
4.2.1 Získání plochy pomocí softwaru Zeiss Reverse Engineering

Prvním bodem je přepnutí se přes pruh úloh ze softwaru Calypso do softwaru ZRE, abychom mohli snímat body. Odkaz na pruh úloh se nachází v semaforu (Obr. 4. 7). Druhým bodem je zapnutí samotného softwaru Zeiss Reverse Engineering X64 1.6.



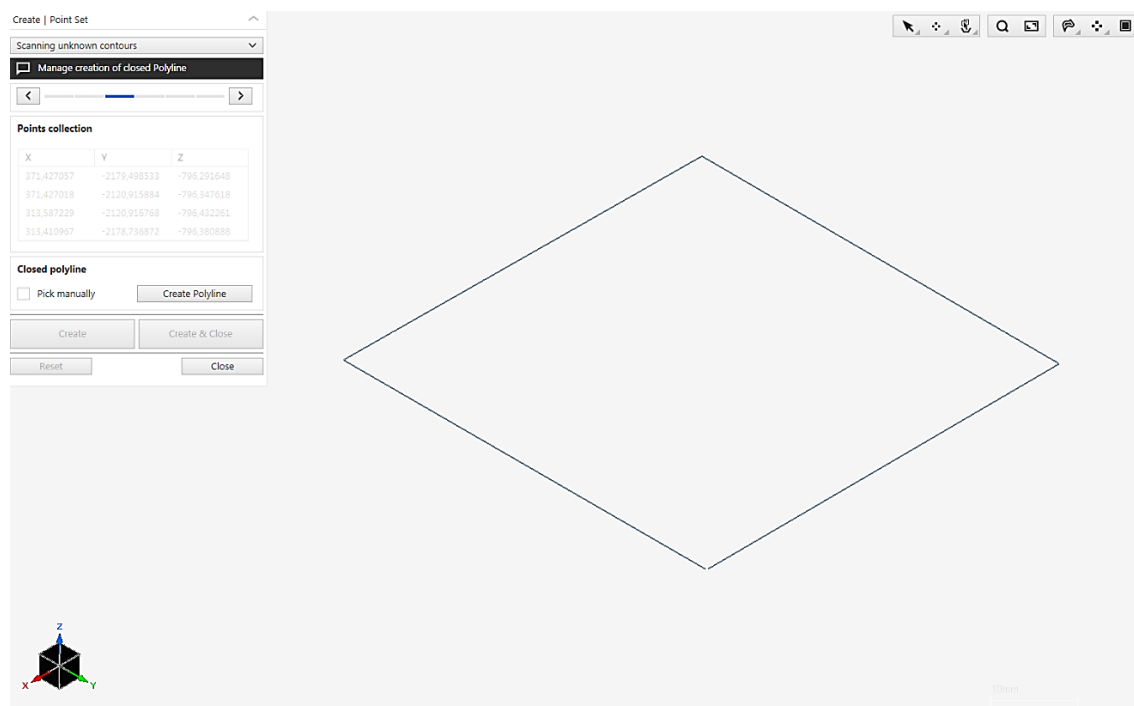
Obr. 4. 7 Vlevo odkaz na pruh úloh; Vpravo přepnutí přes pruh úloh

Do nového projektu vytvořím množinu bodů pomocí možnosti skenování neznámých tvarů (Obr. 4. 8). Pro následné skenování je nutné se propojit se strojem. Pokud je software ZRE nainstalovaný na stejném PC jako software Calypso, propojení proběhne bez problémů. Jinak je nutné mít platnou licenci. Jakmile dojde k propojení, je možné pokračovat v dalším nastavení kliknutím na šipku doprava.



Obr. 4. 8 Postup vytváření nového mraku bodů

Nyní jsem manuálně nasnímala čtyři body co nejvíce v rozích plochy, kterou chci snímat. Mezi těmito body se vytvořil obrys této plochy (Obr. 4. 9).

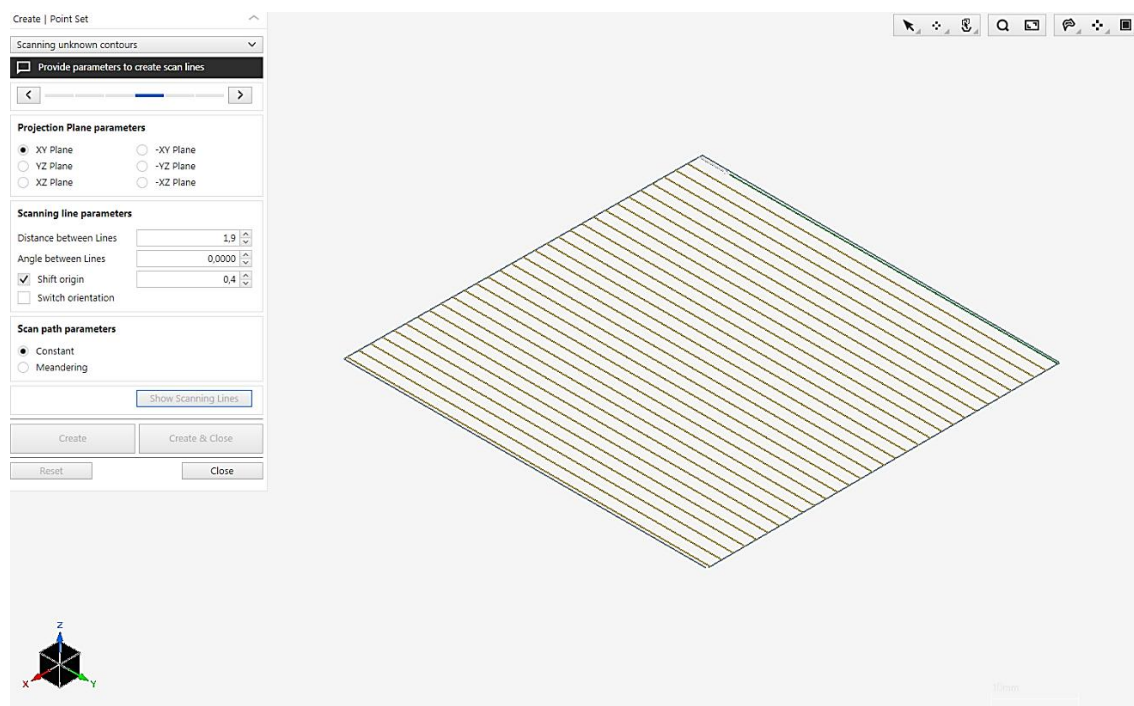


Obr. 4. 9 Definování neznámého prostoru pro měření

Pro skenování je potřeba vytvořit dráhu skenování. Nejprve je nutné definovat rovinu snímání a poté vzdálenost mezi jednotlivými liniemi. Je nutné, aby linie byly rovnoměrně rozprostřeny po měřeném povrchu a co nejvíce se přibližovaly co nejvíce okraji vytvořeného obrysu. Pokud tomu tak není, je tu možnost posunout počátek skenování, tedy první linii, která je značena zelenou barvy. Dojde k lineárnímu posunutí všech vytvořených linií. V poslední řadě je nutné nastavit způsob skenování. První možností je

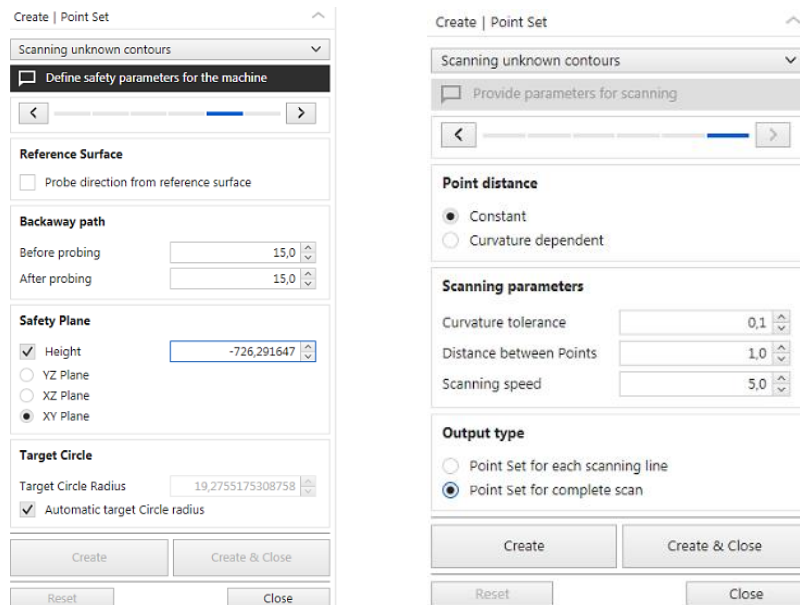
konstantní, kdy snímač začne snímání vždy od stejné hrany. To znamená, že se snímač na konci linie vzdálí do bezpečné vzdálenosti, přejede rychloposuvem na začátek další linie a započne snímání. Druhou možností je meandrovité snímání. To znamená, že snímač se na konci linie nevzdaluje od povrchu. Linie jsou spojeny tzv. meandry.

V mé aplikaci jsem definovala jako rovinu snímání rovinu XY. Vzdálenost mezi liniemi jsem volila 1,9 mm a využila jsem možnosti posunutí počátku o 0,4 mm, abych měla co nejvíce linie u okraje měřené plochy. Způsob snímání jsem volila konstantní. Všechny tyto parametry s vytvořenými liniemi jsou ukázány na Obr. 4. 10.



Obr. 4. 10 Parametry skenování – rovina skenování, vzdálenost linií

Aby nedocházelo ke kolizím, nastavuje výška odjezdu před a po skenování, bezpečnostní rovina a výška v jaké se nachází. Výška se počítá od souřadnice posledního bodu. V případě mé aplikace jsem nastavila bezpečnostní odjezd před snímáním na 15 mm a po snímání také na 15 mm. Bezpečnostní rovina je rovina XY a je ve výšce $-726,5$ mm, vše viz Obr. 4. 11 vlevo.

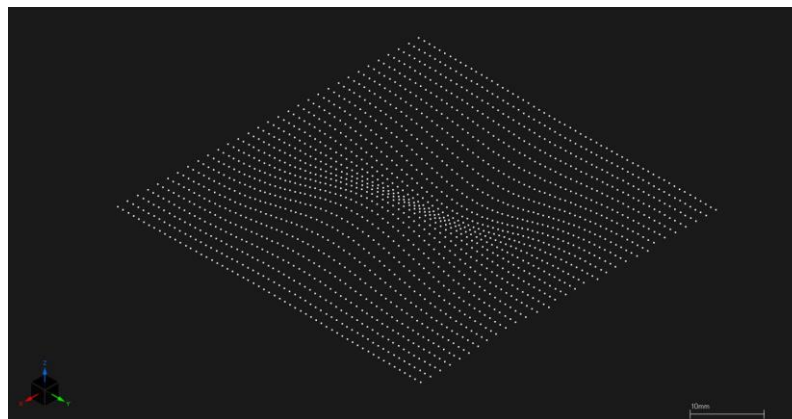


Obr. 4. 11 Parametry skenování

Vzdálenost, po jaké dochází k zaznamenání bodu, můžeme nastavit buď jako konstantní, tedy, že k sejmutí bodu bude docházet v pravidelných vzdálenostech, nebo může být závislá na zakřivení plochy. To znamená, že při mírném zakřivení budou body snímány ve větších vzdálenostech a při zvětšujícím se zakřivení bude docházet ke zkracování vzdáleností a body se budou snímat v kratších intervalech. Další parametry skenování, které se v této záložce nastavují, jsou „Curvature tolerance“, která se nastavuje, pokud volíme vzdálenost bodů v závislosti na zakřivení, poté parametr vzdálenost mezi body a rychlost skenování. Nakonec si volíme, zda chceme nasnímané body zvlášť pro každou linii nebo dohromady pro všechny linie.

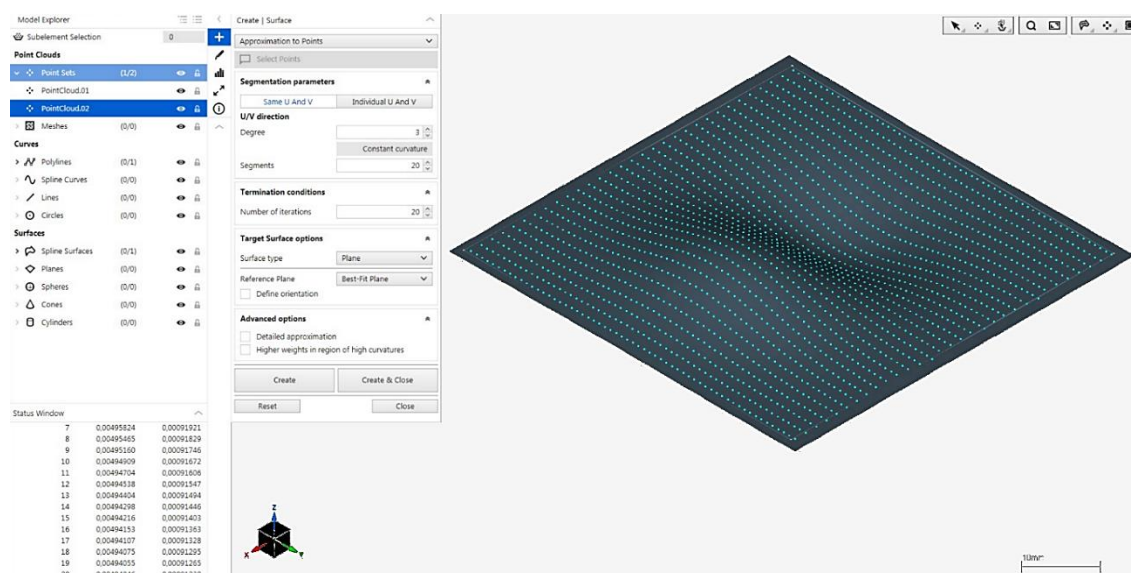
V mé aplikaci jsem volila konstantní vzdálenost, která je mezi jednotlivými body 1 mm. Rychlost skenování jsem nastavila na 5 mm/s a zvolila jsem možnost uložení všech bodů do jednoho souboru. Toto nastavení je ukázáno na Obr. 4. 11 vpravo.

Po nastavení všech zmíněných parametrů klikneme na možnost vytvořit, čímž spustíme samotné CNC snímání. Jakmile se skenování skončí, objeví se na obrazovce softwaru nasnímané body naznačující tvar plochy (Obr. 4. 12).



Obr. 4. 12 Nasnímané body

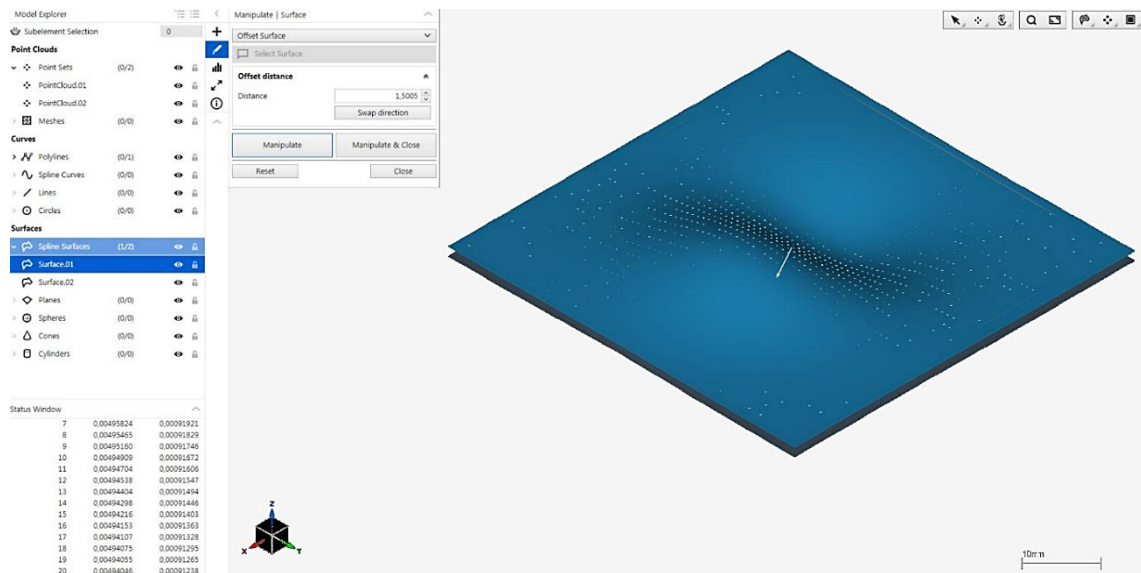
Z nasnímaného mraku bodů vytvořím plochu se stejnými parametry ve směru U a V. Kombinaci parametrů vytváření plochy volím tak, aby maximální odchylka a střední vzdálenost byly co nejmenší (Obr. 4. 13).



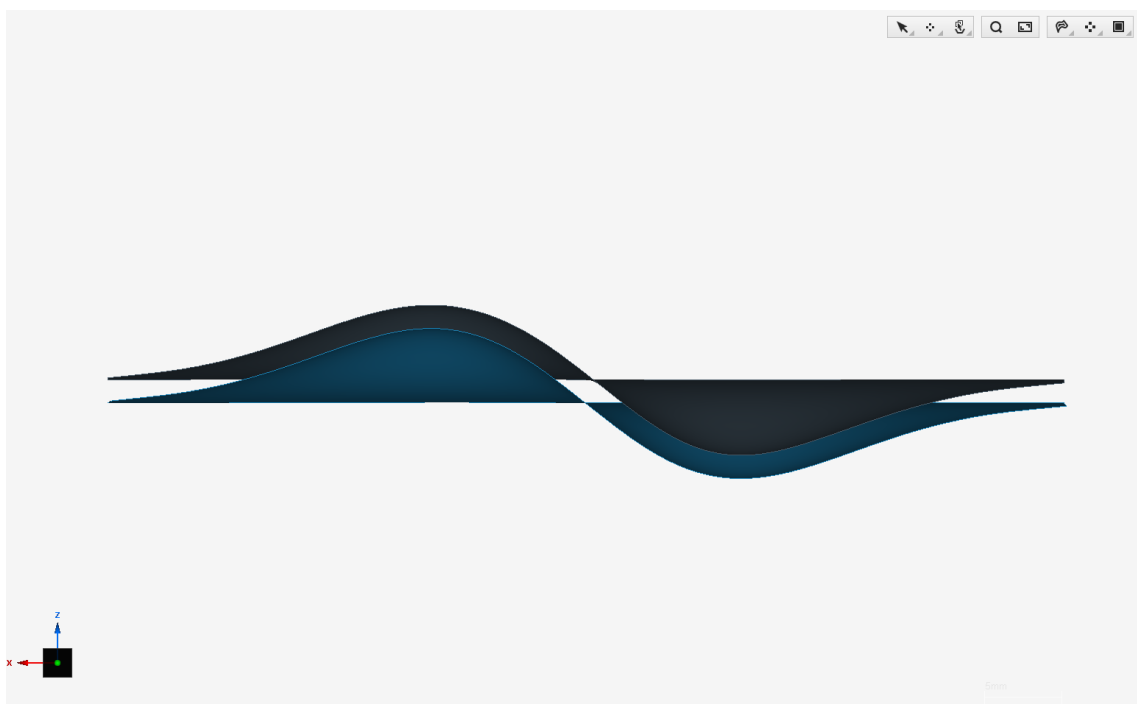
Obr. 4. 13 Vytvoření plochy

Pokud neznámý tvar plochy zaznamenáváme prostřednictvím softwaru ZRE, získáváme jako výsledné souřadnice souřadnice středů snímače místo souřadnic bodů dotyku. To je hlavní nevýhoda tohoto softwaru, pokud měříme dotykovým snímacím systémem. Proto musíme provést korekci o poloměr snímače, jehož hodnotu zjistíme z výsledků kalibrace (Obr. 4. 6).

Korekce se provede posunutím plochy ve směru normály o hodnotu poloměru snímače pomocí funkce „Offset“, vytvoří se ekvidistantní plocha (Obr. 4. 14). Na Obr. 4. 15 je zobrazen řez plochy původní a modře řez plochy ekvidistantní.

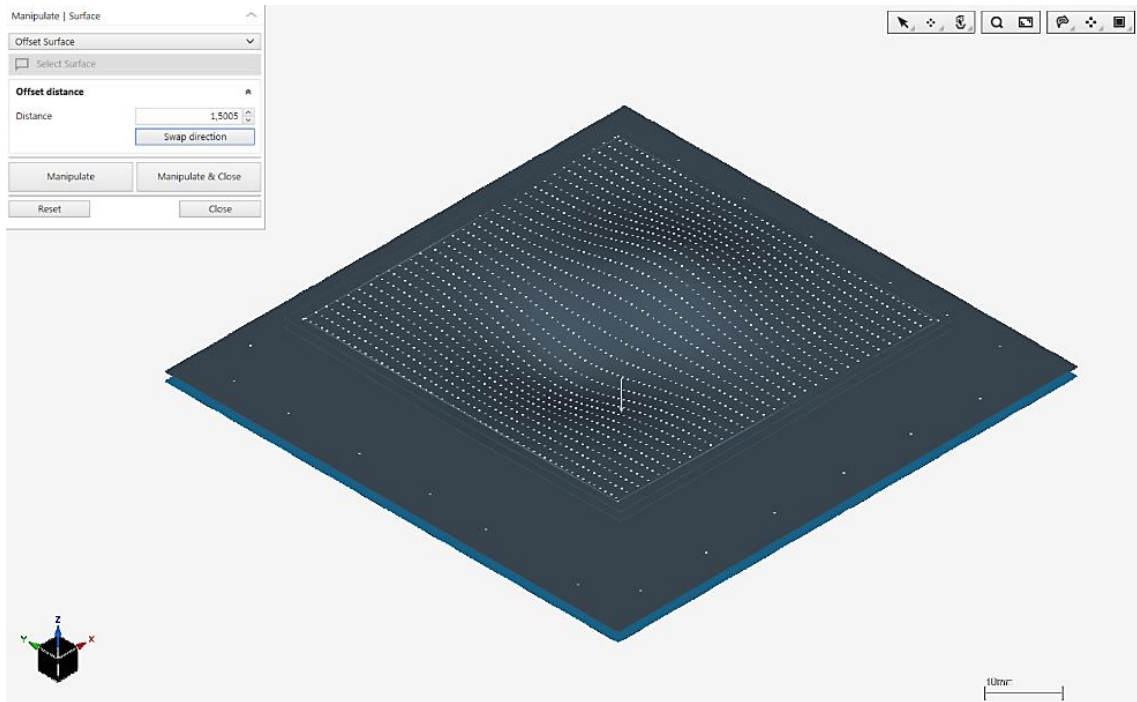


Obr. 4. 14 Vytvoření ekvidistantní plochy



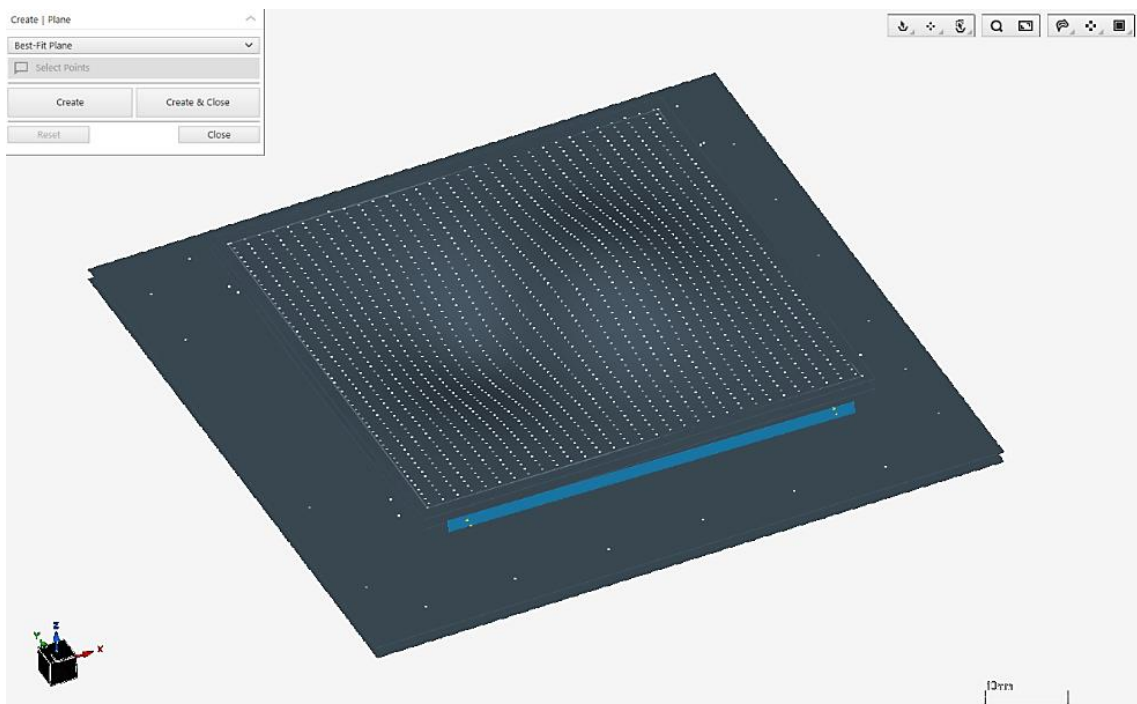
Obr. 4. 15 Řez původní a ekvidistantní plochy

Nyní je nutné nasnímat plochy pro sestavení souřadného systému znázorněné na Obr. 4. 2. Nejprve nasnímáme rovinu. Opět vytvoříme jako u předešlé plochy množinu bodů pomocí funkce snímání neznámých kontur (Obr. 4. 8). Po propojení se strojem začneme manuálně snímat body. Z každé strany ve směru osy Z sejmeme několik bodů, snažíme se o rovnoměrné rozložení. Místo vytvoření obrysu zvolíme možnost „Pick manually“ a vytvoříme mrak bodů, ze kterého vytvoříme rovinu. U takto vytvořené roviny je nutné provést korekci o poloměr snímače posunutím roviny ve směru normály o poloměr snímače. Z takto nasnímaných bodů vytvoříme rovinu, u které je opět nutné udělat korekci o poloměr snímače posunutím roviny ve směru normály (Obr. 4. 16).



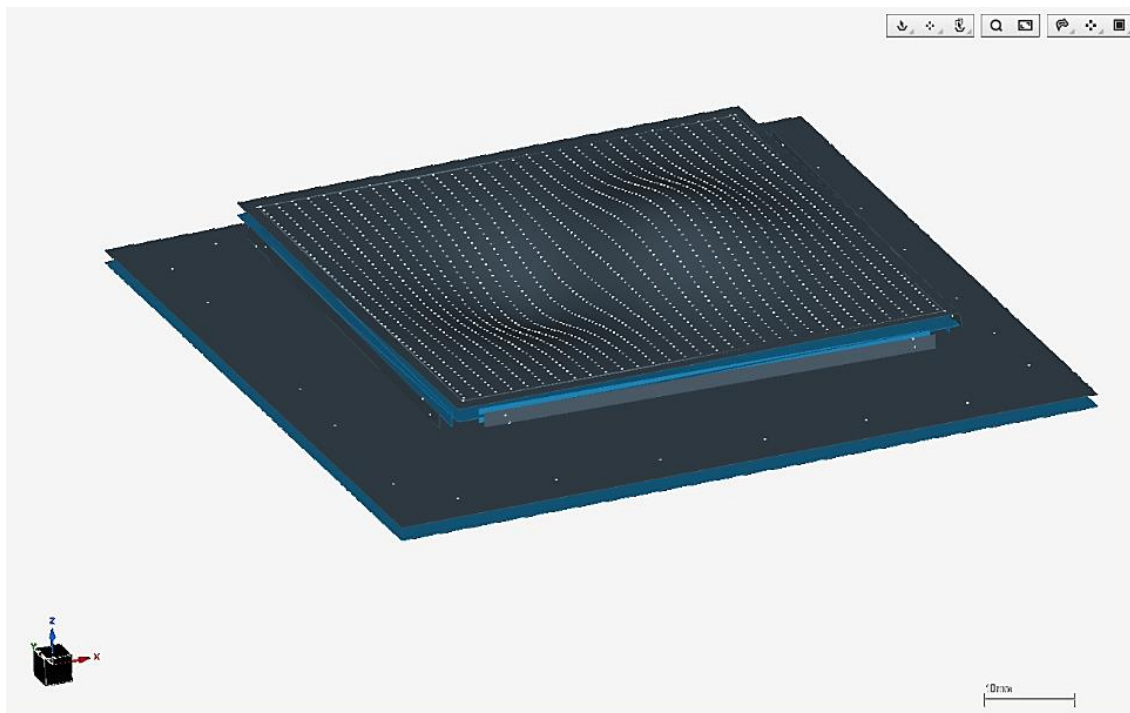
Obr. 4. 16 Posunutí roviny ve směru normály

Pro vyrovnání je nutné nasnímat i plochy pro konstrukci 2D přímek. Postupovat budeme stejně jako u snímání bodů na rovině. Vytvoříme množinu bodů pomocí funkce snímání neznámých kontur (Obr. 4. 8) a po propojení se strojem manuálně snímáme body, ale tentokrát ve směrech os X a Y s konstantní hodnotou v ose Z. Po posledním snímání bodu zvolíme možnost „Pick manually“. Z nasnímaných bodů vytvoříme z každé strany rovinu (Obr. 4. 17). Celkově vzniknou čtyři roviny, které se opět z důvodu korekce posunou o poloměr snímače ve směru normály.



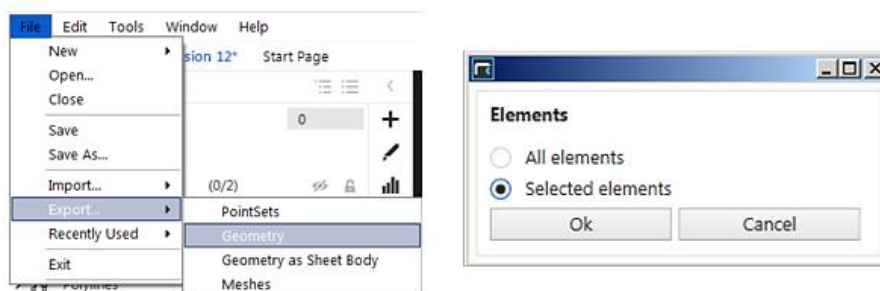
Obr. 4. 17 Vytvoření roviny

Všechny plochy, pro které se snímaly body, aby se mohly vytvořit, jsou zobrazené na Obr. 4. 18. Modře zvýrazněné plochy jsou plochy posunuté o poloměr snímače ve směru normály. Nyní jsou vytvořené všechny plochy potřebné pro další zpřesňující náměry.



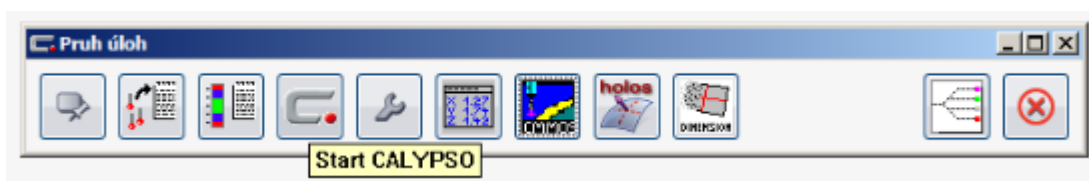
Obr. 4. 18 Vytvořené a posunuté plochy

Dalším postupem je vyexportování těchto vybraných ploch ve formátu *igs, který bude sloužit pro vložení ploch jako CAD modelu do softwaru Calypso. V levém sloupci se vyberou plochy, které potřebujeme vyexportovat, a v menu se zvolí možnost „Export geometry“ (Obr. 4. 19).

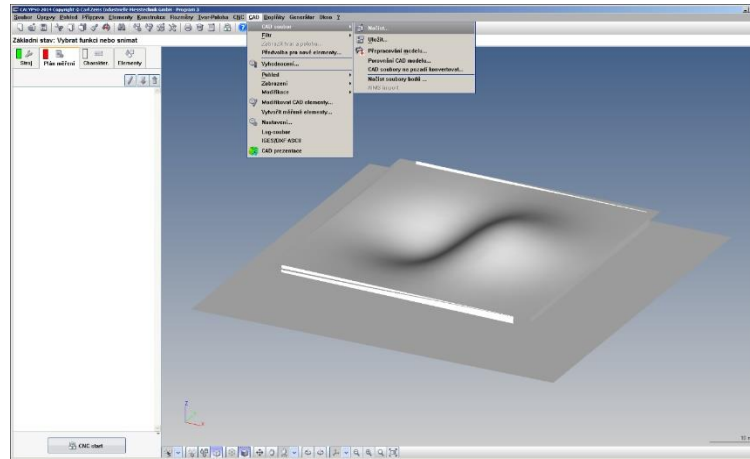


Obr. 4. 19 Exportování ploch

Vyexportováním vznikl CAD model, který se vloží do softwaru Calypso. Nejprve je nutné přepnout se přes pruh úloh zpět ze softwaru ZRE do softwaru Calypso (Obr. 4. 20)



Obr. 4. 20 Přepnutí zpět do softwaru Calypso



Obr. 4. 21 Načtený CAD model

Nyní se načte CAD model (Obr. 4. 21), který obsahuje geometrie pro vyrovnání a plochu určenou pro měření. Postupem uvedeným v kapitole Souřadný systém sestavíme souřadný systém.

Pro samotné měření vrchní plochy jsme si vytvořili nový měřený element „obecná tvarová plocha“. Dráha byla vygenerována z dat ze souboru, které byly předem připraveny.

V režimu simulace se načel soubor s vyexportovanou plochou z ZRE ve formátu *.igs. do softwaru Calypso. Vytvořil se nový měřený element „obecná tvarová plocha“ s generováním dráhy z plochy v rastru. Délka i šířka rastru byla konstantní hodnota 29 a poslední parametr vzdálenost od okraje byl nastaven na 2 mm. Nechalo se proběhnout měření v simulaci, ze kterého jsme získali data, která byla vyexportována a vložena do excelu. V ose X a Y jsme zaokrouhlili hodnoty na celá čísla.

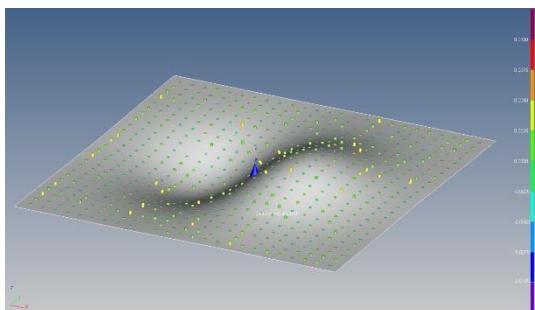
Nyní se z tohoto souboru s vytvořenými daty vygenerovaly dráhy pro obecnou tvarovou plochu. Načtené body se promítly na měřenou plochu jako jmenovité hodnoty a provedlo se CNC měření, které probíhalo ve spínacím režimu. Jak jsem již uvedla výše, měření ve spínacím režimu je časově náročnější, ale je dosaženo přesnějších výsledků.

Získané výsledky vyexportujeme do textového souboru a importujeme jako mrak bodů do softwaru ZRE pro vytvoření přesnější plochy. U této nově vytvořené plochy se již nebude provádět korekce o poloměr snímače, protože již pracujeme s dotykovými body. Tuto plochu vyexportujeme ve formátu *.igs a vložíme do softwaru Calypso. Vytvoříme nový měřený element „obecná tvarová plocha“ a dráhu vygenerujeme opět ze stejných dat ze souboru jako v předešlém měření. Pro získání odchylky tvaru vytvoříme

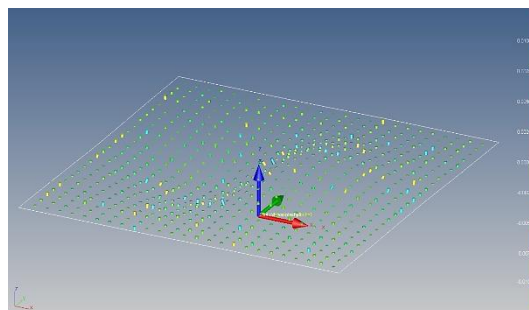
charakteristiku „profil plochy“ a provedeme CNC měření ve spínacím režimu. Výsledky měření jsou graficky zobrazeny na Obr. 4. 23. Na Obr. 4. 24 vlevo je zobrazeno rozložení odchylek naměřených hodnot.

Tuto plochu proměříme ještě jednou. Tentokrát bude dráha generována z plochy s rastrem o šířce a délce 25 se vzdáleností od okraje 2 mm. Tím zaručíme nahodilé uspořádání bodů, které budeme porovnávat s měřením ve stejných bodech. CNC měření bude probíhat také ve spínacím režimu. Grafický výsledek měření je zobrazen na Obr. 4. 22 a na Obr. 4. 24 vpravo je zobrazeno rozložení odchylek naměřených hodnot.

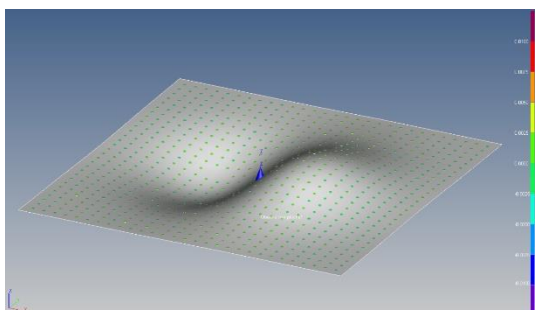
Vyhodnocování u obou způsobů probíhá k připravenému souřadnému systému.



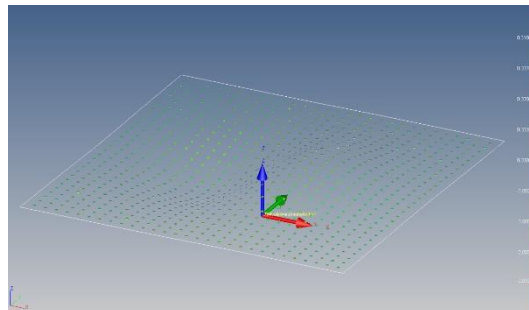
Obr. 4. 22



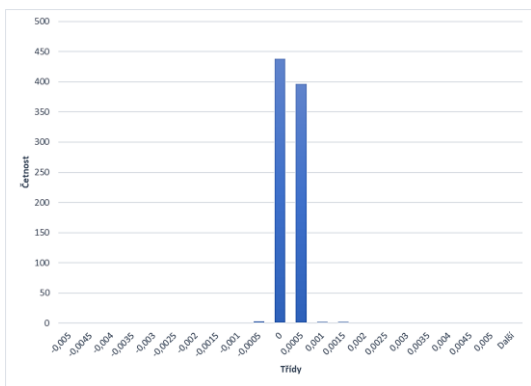
Grafické vyhodnocení v náhodných bodech



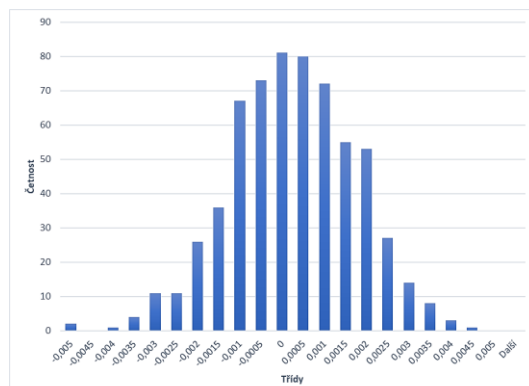
Obr. 4. 23



Grafické vyhodnocení ve stejných bodech



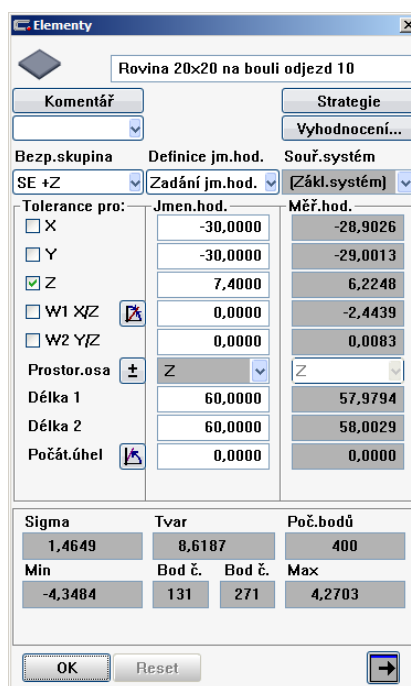
Obr. 4. 24



Rozložení odchylek: vlevo ve stejných bodech; vpravo v náhodných bodech

4.2.2 Získání plochy pomocí softwaru Calypso

Měření začíná sestavením souřadného systému. Elementy, které jsou potřebné pro sestavení souřadného systému, jsou rovina a 4 2D přímky. Na rovině umístěné na součásti manuálně sejmeme v rozích čtyři body a software automaticky rozpozná rovinu. Poté sejmutím vždy dvou bodů (počátečního a koncového) umístěných z každé strany součásti ve stejné hladině Z definujeme 4 2D přímky. Z těchto elementů se postupem uvedeným v kapitole Souřadný systém sestaví souřadný systém.



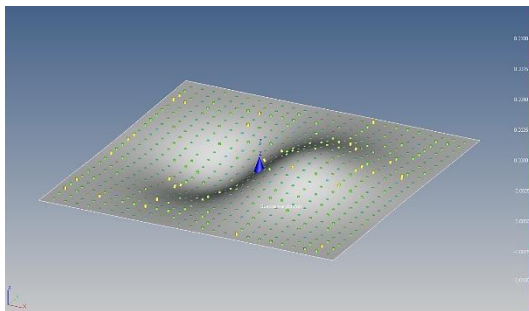
Obr. 4. 25 Editování elementu rovina

Body plochy budeme snímat pomocí elementu rovina v definovaném rastru. Sejmeme čtyři body v rozích a vložíme element rovina. Element je nutné editovat, protože vznikly nepatrné odchylky a vložená rovina se naklonila (Obr. 4. 25). Strategii snímání roviny je snímání jednotlivých bodů v rastru o délce a šířce 20 bodů. Vzhledem k tomu, že měříme neznámý povrch, je nutné nastavit vyšší hodnotu odjezdu, bezpečnostní roviny a zvýšit vyhledávací posuv, to znamená posuv, kdy snímač jede sníženou rychlostí, aby nenarazil v plné rychlosti a síle na povrch součásti. Mohlo by dojít ke zničení snímače, porušení součásti. Vyhledávací posuv zadáváme v plánu měření → editor plánu měření. Nyní spustíme CNC měření. Po ukončení měření vyexportujeme body. Jelikož jsme snímali neznámý povrch, není provedena korekce na poloměr snímače. Ta se provede až vytvořením ekvidistantní plochy v softwaru ZRE. Nyní proto nebudou exportovány dotykové body, ale středy. Tyto body nyní importujeme jako mrak bodů do softwaru ZRE, vytvoříme z nich plochu a z této plochy posunutím o poloměr snímače vytvoříme ekvidistantu. Tuto plochu poté vyexportujeme ve formátu *.igs. pro vložení zpět do softwaru Calypso pro další zpřesňující měření.

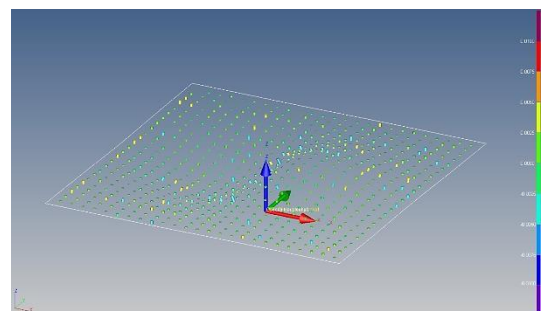
Tentokrát plochu budeme měřit elementem obecná tvarová plocha, jejíž dráha je generována z předem připravených dat, které jsem již výše popisovala. Po měření jednotlivých bodů vyexportujeme tentokrát již dotykové body a importujeme opět jako mrak bodů do softwaru ZRE pro vytvoření přesnější plochy. Vytvořenou plochu exportujeme opět ve formátu *igs a vložíme do softwaru Calypso pro kontrolní měření. Pro první kontrolní měření vytvoříme nový měřený element obecná tvarová plocha. Dráha plochy bude vygenerována z dat ze souboru jako v předešlém měření. Pro získání odchylky vložíme charakteristiku Profil plochy a spustíme CNC měření. Grafické výsledky měření jsou uvedeny na Obr. 4. 27. Rozložení odchylek naměřených hodnot je uvedeno na Obr. 4. 28.

Pro druhé kontrolní měření vložíme opět nový měřený element obecná tvarová plocha, ale dráha bude generována z plochy v rastru s konstantní šířkou a délkou o počtu 25 bodů se vzdáleností od okraje 2 mm. Vložíme charakteristiku Profil plochy a spustíme CNC měření. Grafické výsledky měření jsou uvedeny na Obr. 4. 26 a rozložení odchylek je poté zobrazeno na Obr. 4. 28 vlevo.

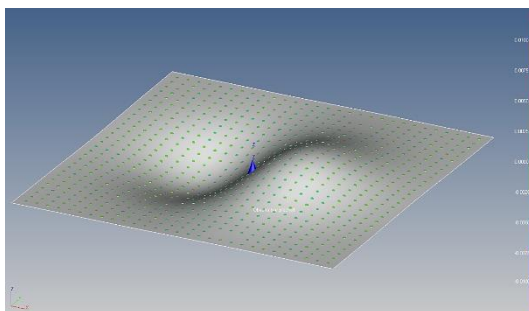
Vyhodnocení obou způsobů je realizováno k připravenému souřadnému systému.



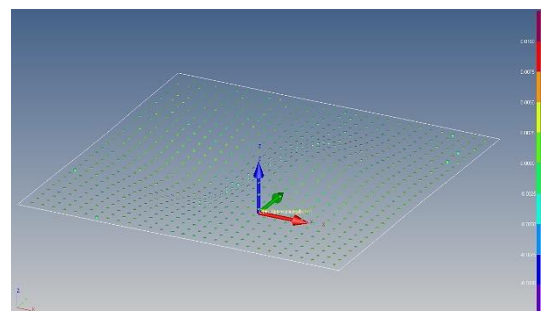
Obr. 4. 26



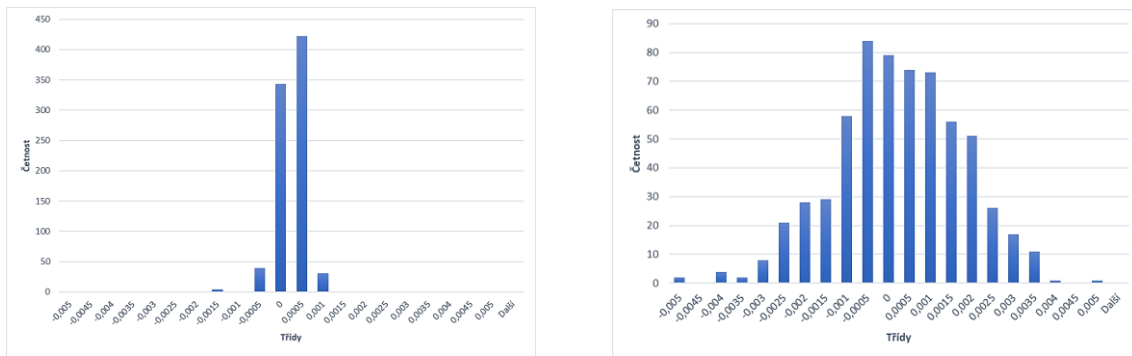
Grafické vyhodnocení v náhodných bodech



Obr. 4. 27



Grafické vyhodnocení ve stejných bodech

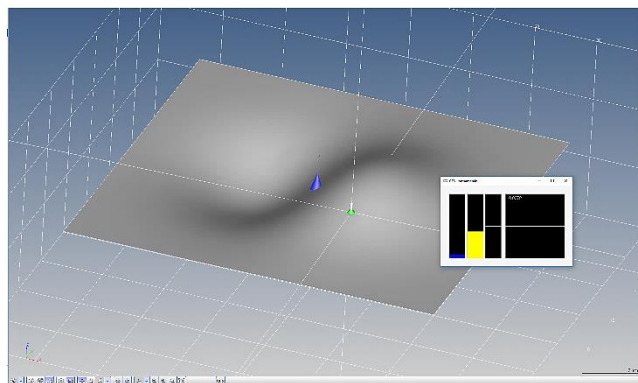


Obr. 4. 28 Rozložení odchylek naměřených hodnot: vlevo ve stejných bodech; vpravo v náhodných bodech

4.3 Bílé světlo

Druhým použitým snímacím systémem bude optický snímací systém – Bílé světlo. Princip měření bílým světlem je vysvětlen v kapitole Měření pomocí bílého světla.

Upneme součást a měření začneme sestavením souřadného systému. Jelikož bílým světlem můžeme snímat pouze ve směru osy Z, použijeme pro nasnímání elementů pro souřadný systém dotykový snímač. Nasnímáme plochy určené pro souřadný systém (Obr. 4. 2) a sestavíme souřadný systém způsobem, jaký je uvedený v kapitole Souřadný systém. Pro měření importuji poslední plochu ve formátu *igs z měření v Calypsu. Pro měření pomocí bílého světla vytvořím nový měřený element obecná tvarová plocha s dráhou generovanou z plochy. Body budou rozprostřeny v rastru 60 x 60 se vzdáleností od okraje 2 mm. Z důvodu možnosti rychlejšího snímání pomocí bezdotykových snímacích systémů si můžeme dovolit nasnímat více bodů než u dotykového měření. Snímání této plochy bude provedeno snímacím systémem CFS 3 mm. CFS je značení bílého světla a 3 mm značí měřicí rozsah. Bezpečnostní vzdálenost a bezpečnostní odjezd nastavíme na 0. U měření bílým světlem se bezpečnostní data nepoužívají. Snímání bude probíhat rychlostí 10 s délkou kroku 0,5 mm. Spustíme CNC měření. Nejprve se nasnímá vše potřebné pro souřadný systém pomocí dotykového snímače. Po dokončení snímač odložíme a „upneme“ snímač CFS → přepnutí do režimu měření bílým světlem. V CAD souboru se objeví kříž s válečkem uprostřed. Pokud je zelený, jsme v měřicím rozsahu 3 mm (Obr. 4. 29). Spustíme CNC měření obecné tvarové plochy. Po spuštění je nutné nastavit další parametry. Jelikož neznáme optimální, necháme výchozí nastavení. Po ukončení měření vyexportujeme naměřené body a importujeme do softwaru Calypso pro kontrolní měření na souřadnicovém měřicím stroji dotykovým snímačem.

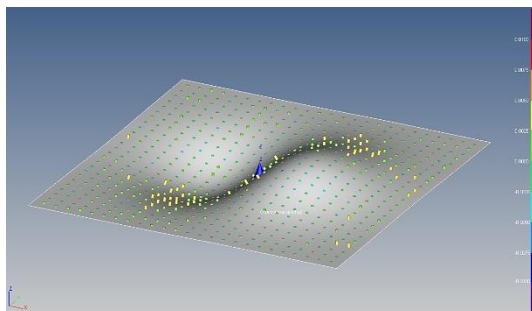


Obr. 4. 29 Potvrzení měření v měřicím rozsahu

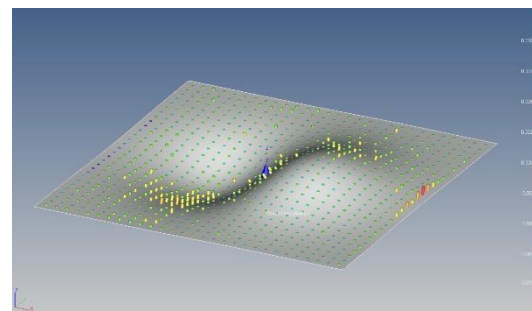
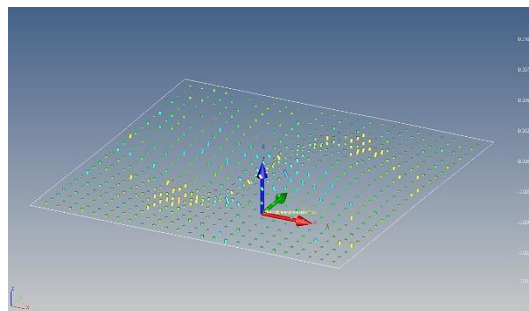
Pro první kontrolní měření vložíme nový element obecná tvarová plocha s dráhou generovanou z dat ze souboru. Pro získání odchylky vložíme charakteristiku Profil plochy a spustíme CNC měření ve spínacím režimu. Grafické vyhodnocení je uvedeno na Obr. 4. 31 a rozložení odchylek naměřených hodnot je uvedeno na Obr. 4. 32 vlevo.

Pro druhý způsob kontrolního měření opět vytvoříme nový element obecná tvarová plocha s dráhou generovanou z plochy v rastru s konstantní šířkou a délkou o počtu 25 bodů se vzdáleností od okraje 2 mm. Vložíme charakteristiku Profil plochy a spustíme CNC měření. Grafické vyhodnocení je uvedeno na Obr. 4. 30 a rozložení odchylek naměřených hodnot je uvedeno na Obr. 4. 32 vpravo.

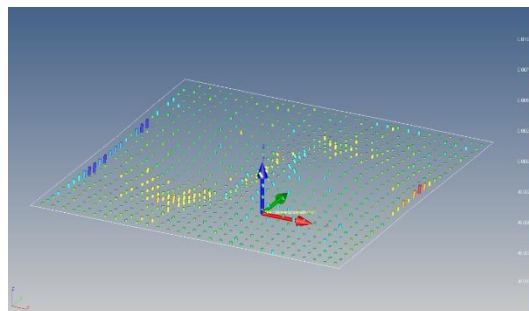
Vyhodnocení obou způsobů je k připravenému souřadnému systému.

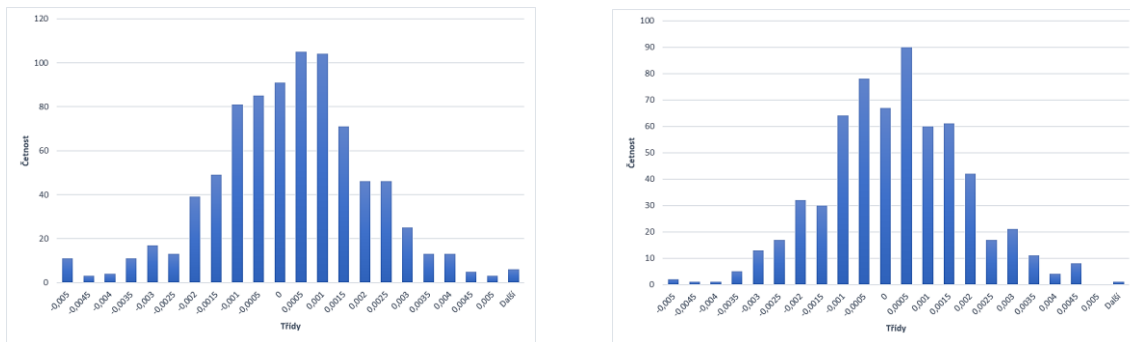


Obr. 4. 30 Grafické vyhodnocení v náhodných bodech



Obr. 4. 31 Grafické vyhodnocení ve stejných bodech



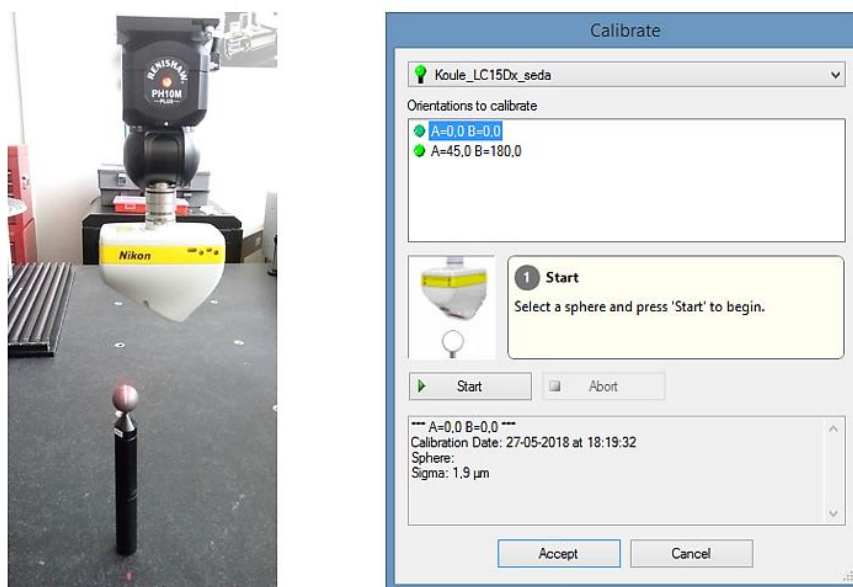


Obr. 4. 32 Rozložení odchylek naměřených hodnot: vlevo ve stejných bodech; vpravo v náhodných bodech

4.4 Laser skener

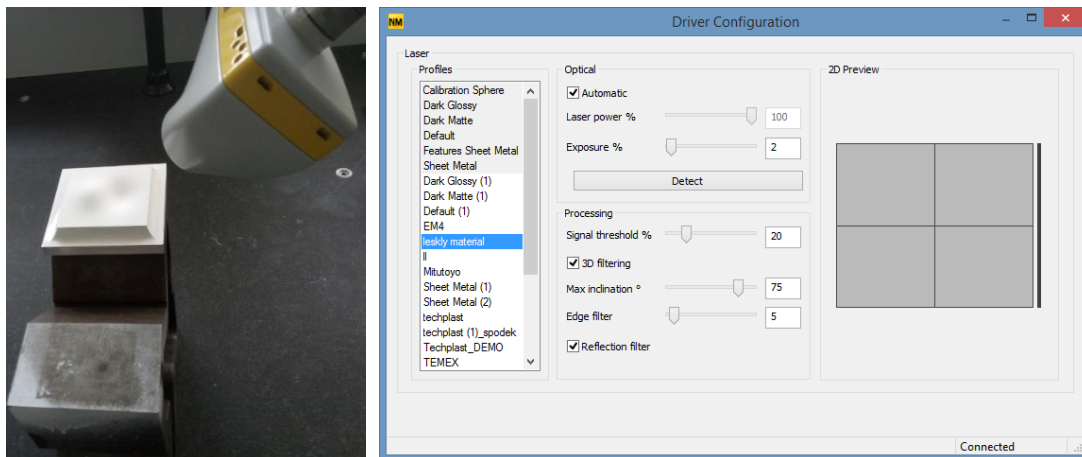
Třetím snímacím systémem je laserový snímací systém – laser skener. Tento snímací systém pracuje na principu triangulace (viz kapitola Triangulace).

Postup měření laser skenerem je stejný jako u předcházejících. Prvním bodem je kalibrace. Rozdílem je typ kalibrační koule, která je v tomto případě matná. Postup kalibrace a její výsledek jsou zobrazeny na Obr. 4. 33.



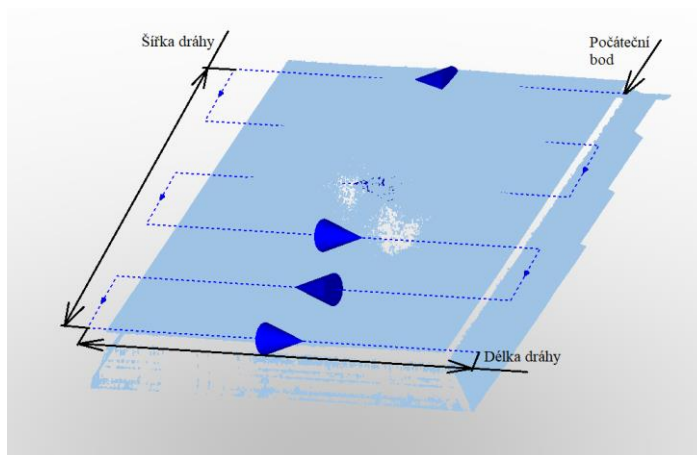
Obr. 4. 33 Kalibrace laser skeneru

Jelikož je měřený povrch lesklý, což je největší problém při měření laserovými snímacími systémy, je nutné ho zmatnit. Docházelo by k odrazům paprsků a mohli bychom mít nepřesné výsledky měření. Povrch nastříkáme rovnoměrnou vrstvou zmatňujícího spreje a součást upneme (Obr. 4. 34 vlevo). Pro samotné měření je nutné nastavit parametry laserového paprsku. Prvním parametrem je intenzita laserového paprsku a druhým doba expozice. Oboje se nastavuje podle stupnice 0-100 %. Nastavení pro tuto aplikaci je uvedeno na Obr. 4. 34 vpravo.



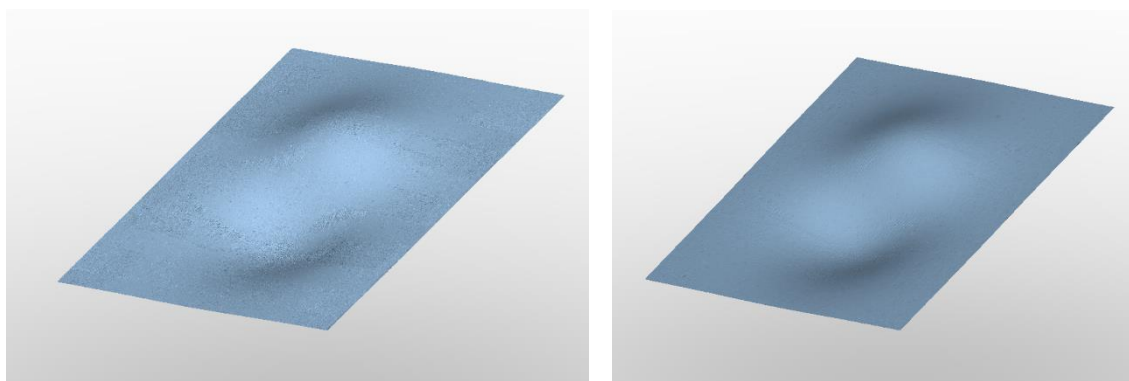
Obr. 4.34 Vlevo: upnutí součásti; vpravo: parametry laserového paprsku

Dráha skeneru (Obr. 4.35) je definována počátečním bodem, délkou a šířkou skenovací dráhy a je vždy umístěna ve středu délky paprsku, který je 100 mm. Dráha je generována tak, aby došlo k překrytí paprsků o 5 mm. Je to z důvodu, aby měl software při vykreslování plochy dostupné informace o zakřivení a mohl plochu plynule při vykreslování navázat. Vzdálenost mezi laserovými paprsky je 0,04 mm.



Obr. 4.35 Dráha skeneru

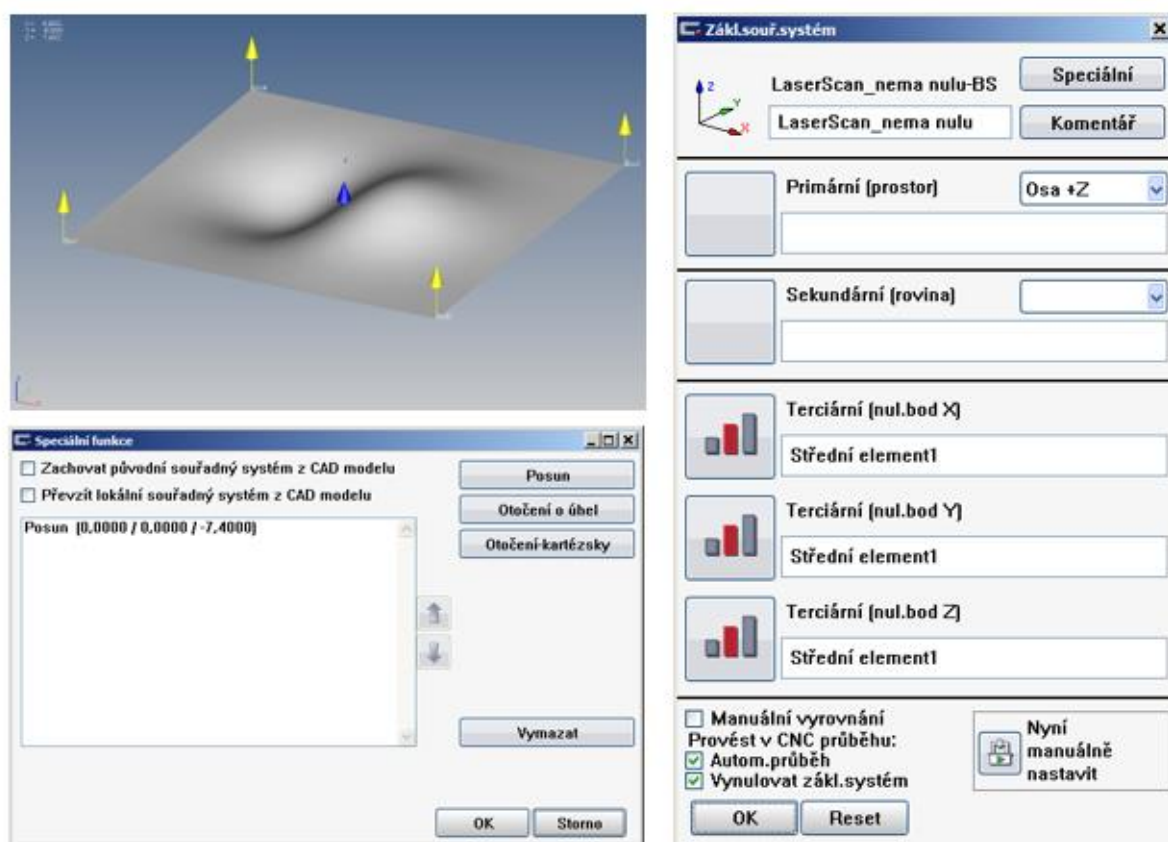
Po definování potřebných parametrů je provedeno samotné snímání. Snímání bude probíhat ve dvou pozicích. Nejprve bude pozice hlavy $A = 0^\circ$ a $B = 0^\circ$, druhé snímání bude v pozici $A = 45^\circ$ a $B = 180^\circ$. Po snímání vznikl mrak bodů zobrazený na Obr. 4.36 vlevo.



Obr. 4.36 Vlevo: mrak bodů; vpravo: stereolitografická síť

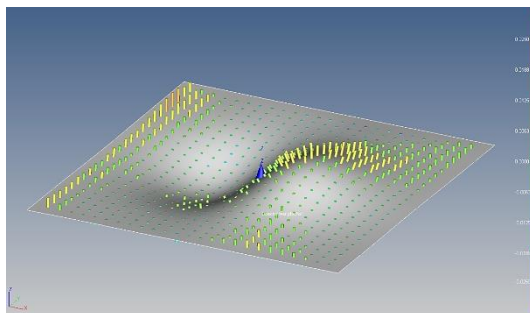
Pro odstranění nežádoucích odlesků a vzdálených bodů z mraku bodů byl použit filtr dle křivosti. To znamená, že software v závislosti na křivosti a námi zvolené maximální a minimální vzdálenosti dvou sousedních bodů odstraní nežádoucí body. Minimální vzdálenost je zvolena 0,01 mm a maximální 1 mm. A z vyfiltrovaného mraku bodů software vykreslí stereolitografickou síť (Obr. 4. 36 vpravo). Nasnímaný a vyfiltrovaný mrak bodů importujeme do softwaru ZRE a vytvoříme plochu, kterou vyexportujeme a načteme do softwaru Calypso.

Při nastavení následného kontrolního měření se vyskytly dva problémy. Jelikož součást nebyla upnuta ve stejné poloze jako při měření předcházejícími snímacími systémy, byla špatně orientovaná osa Z. Tento problém byl odstraněn otočením okolo osy Z o 180°. Druhý problém vznikl tím, že nebyly nasnímány plochy potřebné pro sestavení souřadného systému. Proto jsme si ho museli uměle sestavit tím, že jsme manuálně snímali čtyři body, co nejvíce v rozích plochy a z těchto bodů vytvořili střední hodnotu. Zjistili jsme, v jaké hodnotě se pohybuje souřadný systém v ose Z, a o tuto hodnotu jsme provedli ofset. Souřadný systém pro kontrolní měření plochy nasnímané laser skenerem je uvedeno na Obr. 4. 37.

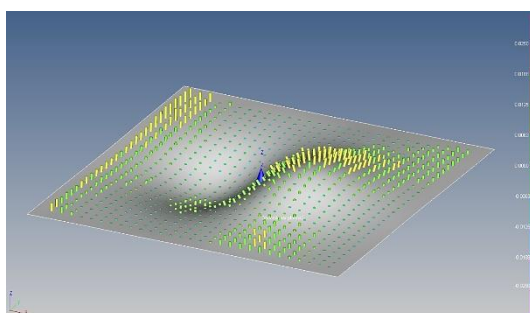
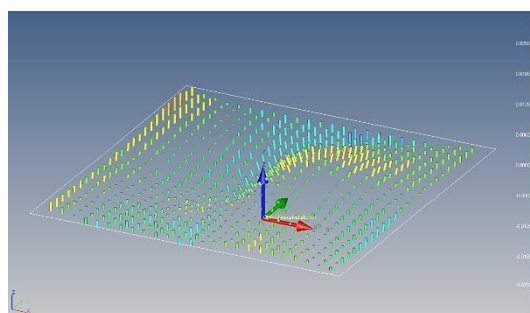


Obr. 4. 37 Souřadný systém

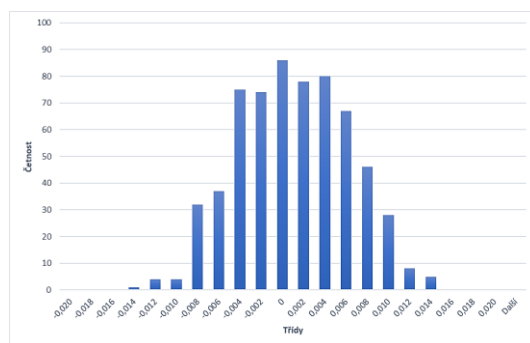
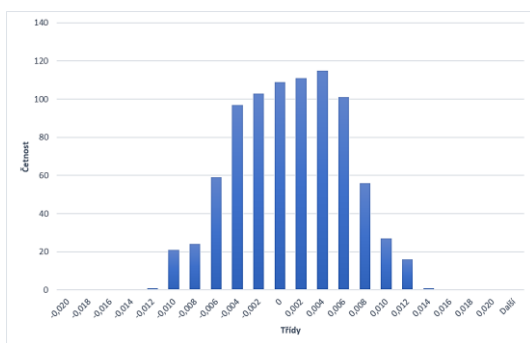
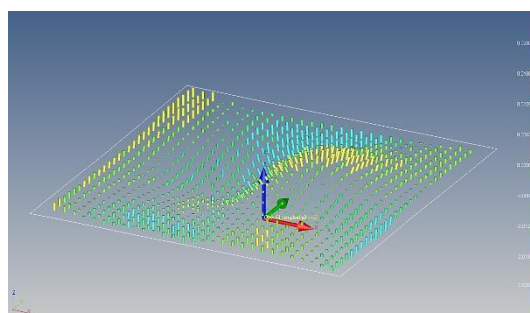
Tento model s uměle vytvořeným souřadným systémem uložíme a vložíme do plánu měření s připraveným souřadným systémem. Vytvoříme nový měřené element obecná tvarová plocha a provedeme dvě měření. Nejprve s dráhou generovanou z připraveného souboru dat a poté s dráhou v rastru s konstantní šířkou a délkou o počtu 25 bodů a vzdáleností od okraje 2 mm. Výsledky měření jsou uvedeny na Obr. 4. 38 a Obr. 4. 39 a rozptyl odchylek naměřených hodnot na Obr. 4. 40.



Obr. 4. 38 Grafické vyhodnocení v náhodných bodech



Obr. 4. 39 Grafické vyhodnocení ve stejných bodech



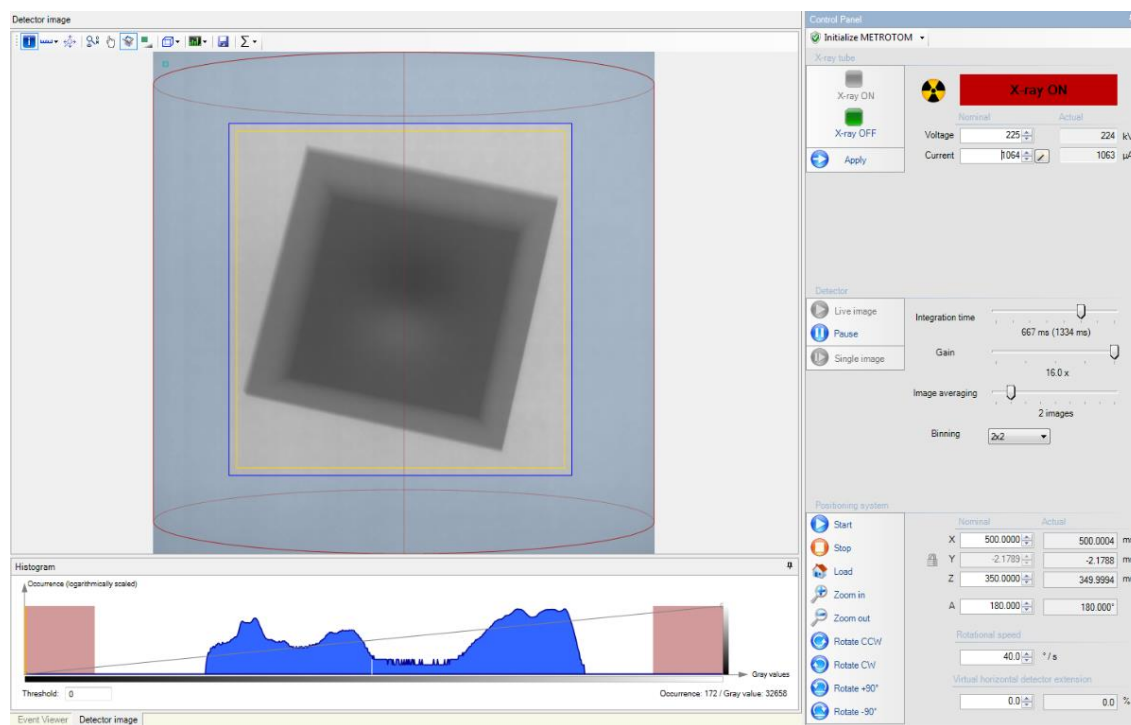
Obr. 4. 40 Rozložení odchylek naměřených hodnot: vlevo ve stejných bodech; vpravo: v náhodných bodech

4.5 Počítačová tomografie

Čtvrtým snímacím systémem je rentgenový snímací systém – počítačová tomografie. Princip počítačové tomografie je uveden v kapitole Počítačová tomografie.

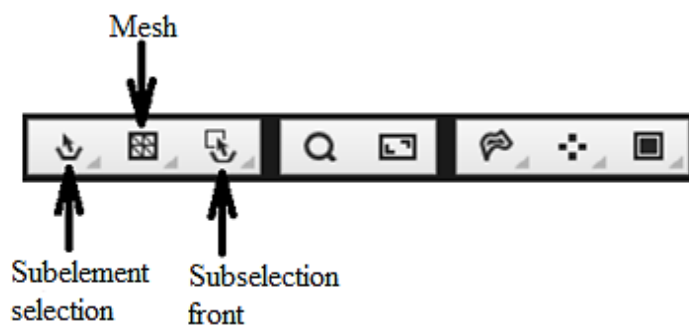
Pro měření za pomoci počítačové tomografie je nutné součást upnout v materiálu s nízkou hustotou, aby šel snadno prozářit. My jsme upnuli součást do polystyrenu. Součást musela být upnuta tak, aby žádná hrana nebyla ve vodorovné či svislé poloze. Všechny hrany musely být trochu nakloněné, aby bylo co nejvíce paprsků soustředěno skrz součást na detektor a nedocházelo k jejich rozptylu.

Parametry nastavení jsou rozděleny do třech částí. V první části týkající se rentgenové trubice nastavujeme velikost rentgenového proudu. Druhá část se týká detekce obrazu. Třetí část je zaměřena na poziční parametry, kde nastavujeme pozici rotačního stolu v ose X a v ose Z, tak aby na detektoru byla zachycena celá součást. Parametry nastavení pro danou součást jsou uvedeny na Obr. 4. 41. Dále je nutné zvolit filtr pro odstranění nízkenergetických složek rentgenového záření. My jsme volili filtr z mědi o tloušťce 1,5 mm.

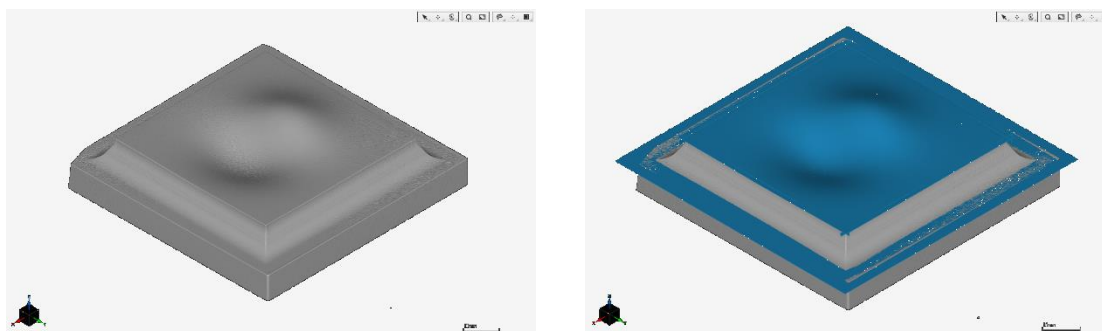


Obr. 4. 41 Parametry detekce obrazu

Nyní proběhne samotné nasnímání snímků, ze kterých vyexportujeme stereolitografickou síť a importujeme ji do softwaru ZRE (Obr. 4. 43 vlevo). Pomocí kombinace tlačítek (Obr. 4. 42) vybereme horní plochu a plochy potřebné pro sestavení souřadného systému (Obr. 4. 43 vpravo).

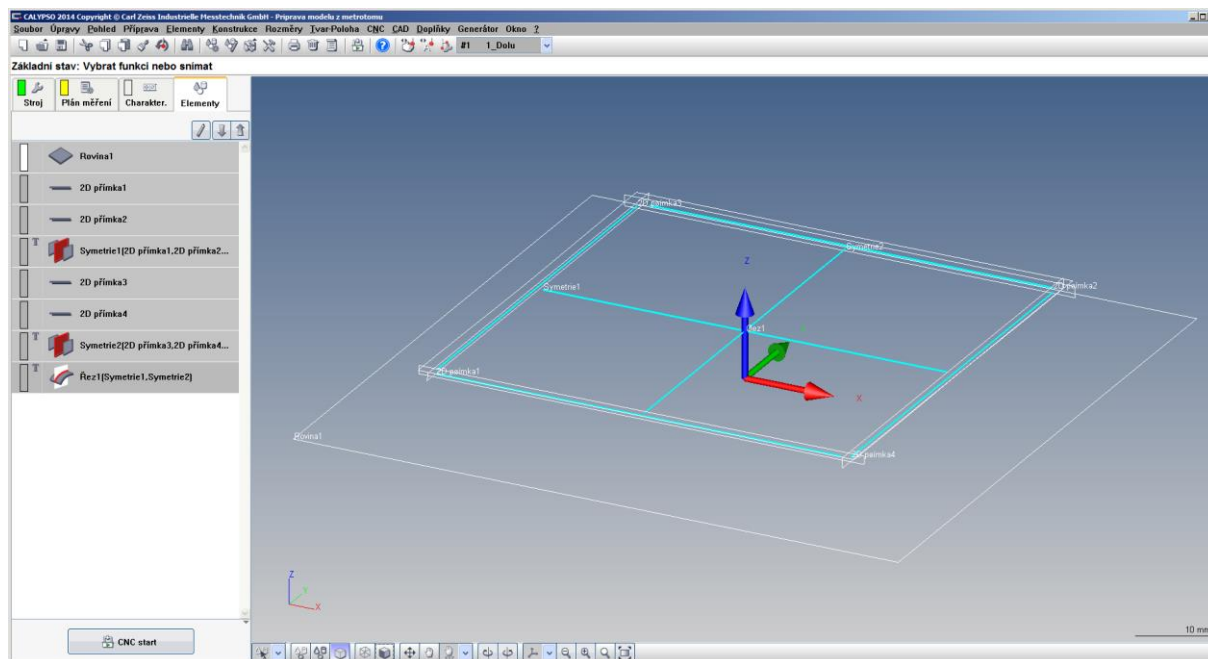


Obr. 4. 42 Kombinace tlačítek pro výběr



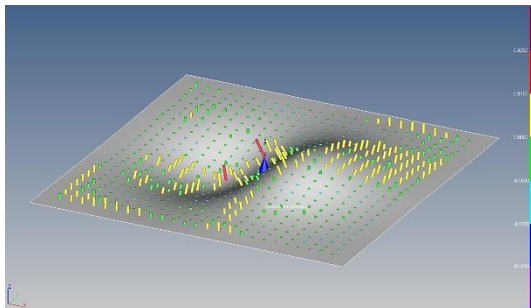
Obr. 4. 43 Vlevo: importovaná data z CT do ZRE; vpravo: plochy pro vyexportování

Vyexportované plochy vložíme do softwaru Calypso a budeme postupovat tak jako u získávání plochy pomocí softwaru ZRE. Vytvoříme souřadný systém vytvořením 2D přímek na ploškách pod hlavní plochou a vložením elementu rovina (Obr. 4. 44). Postup sestavení byl stejný jako v kapitole Souřadný systém.

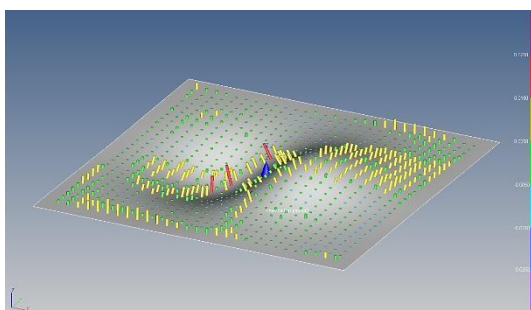
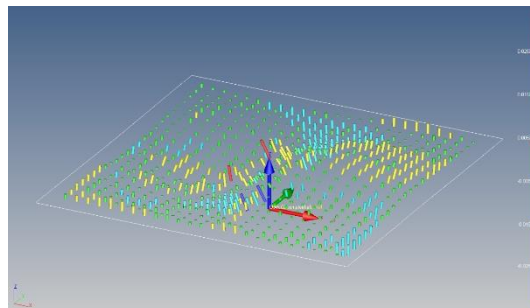


Obr. 4. 44 Souřadný systém

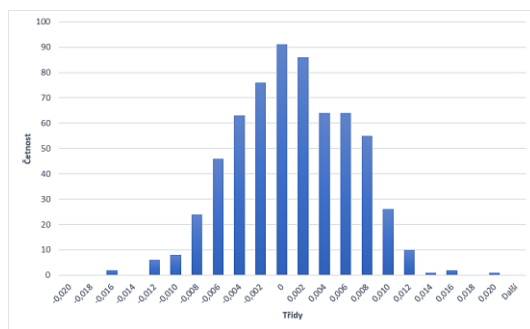
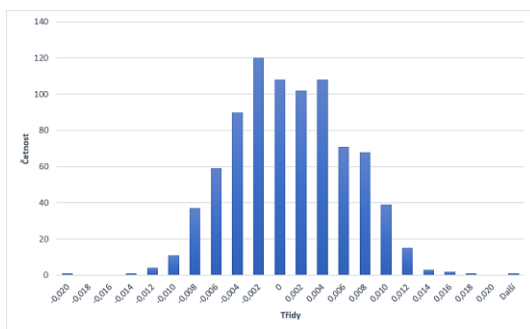
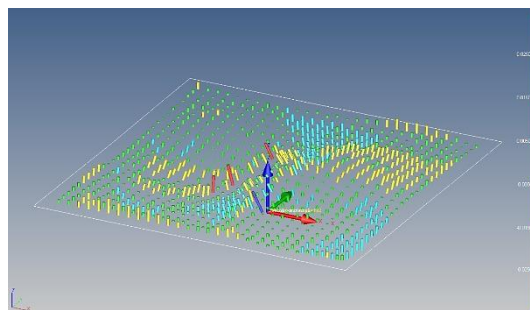
Snímání hlavní plochy bude probíhat pomocí elementu obecná tvarová plocha. První měření probíhá po dráze generované ze souboru dat a druhé měření probíhá v rastru o konstantní šířce a délce 25 bodů a vzdáleností od okraje 2 mm. Grafické výsledky měření jsou zobrazeny na Obr. 4. 45 a Obr. 4. 46 a rozložení odchylek naměřených hodnot je zobrazeno na Obr. 4. 47.



Obr. 4. 45 grafické vyhodnocení v náhodných bodech



Obr. 4. 46 Grafické vyhodnocení ve stejných bodech



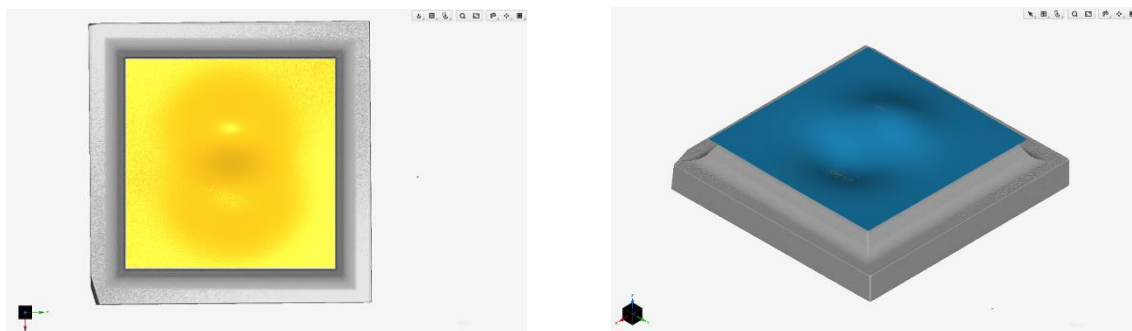
Obr. 4. 47 Rozložení odchylek naměřených hodnot: vlevo ve stejných bodech; vpravo v náhodných bodech

4.6 Konstrukční operace v ZRE

Celé množství prvků nejde na součástech změřit přímo (sražení, přechodové radiusy, hrany součásti), ale je potřeba je vytvořit pomocí konstrukčních operací. Práce s programem ZRE je zjednodušeně a obecně popsána v kapitole ZEISS Reverse Engineering. V této kapitole bych chtěla prakticky představit některé funkce tohoto softwaru. K praktické ukázce použiji mrak bodů získaný nasnímáním dané součásti

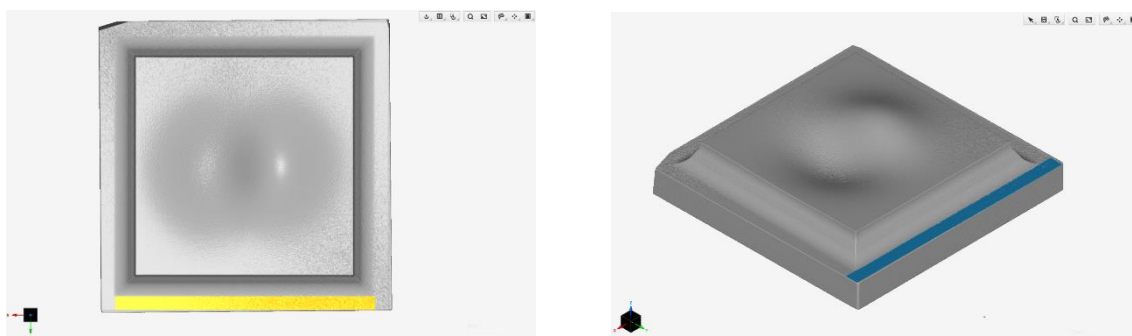
pomocí počítačové tomografie (Obr. 4. 43 vlevo) a pokusím se samotnou součást zrekonstruovat.

Pro vytvoření ploch nejprve vyberu body pomocí kombinace tlačítek uvedených na Obr. 4. 42 a klávesy CTRL. Ilustrace je ukázána na výběru bodů pro vytvoření obecné tvarové plochy (Obr. 4. 48 vlevo).



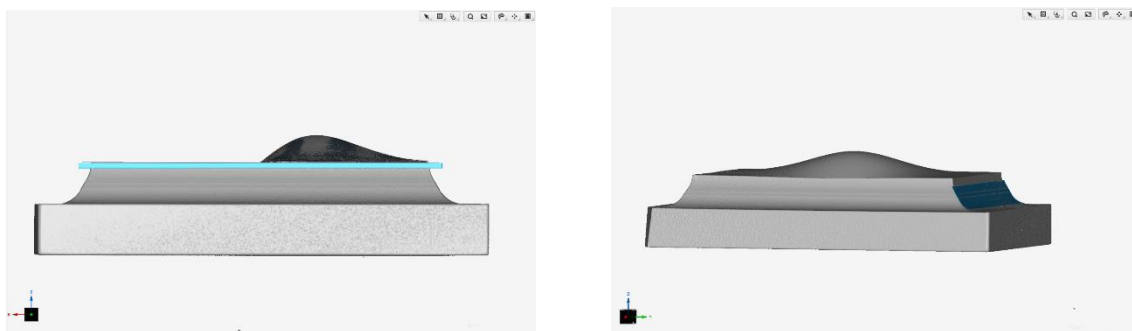
Obr. 4. 48 Vlevo: výběr bodů; Vpravo: vytvořená plocha

Z takto vybraných bodů jsem vytvořila pomocí funkce „Create“ plochu o daných parametrech (Obr. 4. 48 vpravo). Dále pomocí stejné kombinace tlačítek vybereme body pro vytvoření roviny (Obr. 4. 49 vlevo) a pomocí funkce „Create“ vytvoříme rovinu (Obr. 4. 49 vpravo), která bude sloužit pro vytvoření souřadného systému.



Obr. 4. 49 Vlevo: výběr bodů; vpravo: vytvoření roviny

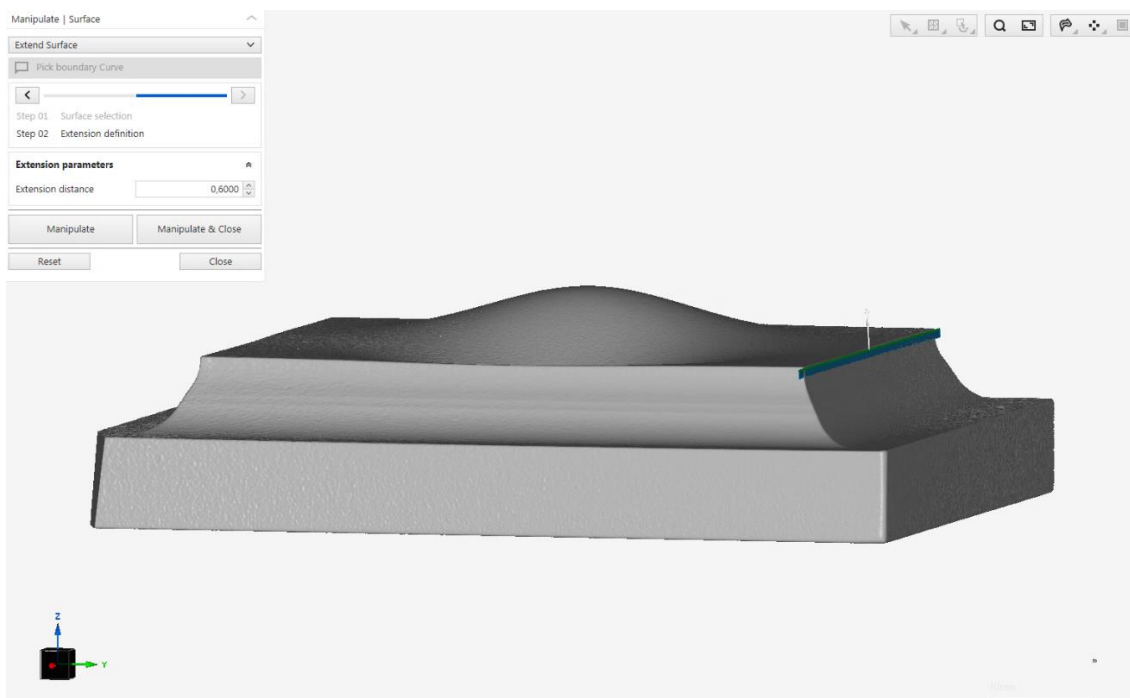
Stejným způsobem vytvoříme ještě jednu rovinu pro souřadný systém a poté obecnou tvarovou plochu.



Obr. 4. 50 Vlevo: vytvoření roviny; vpravo: vytvoření plochy

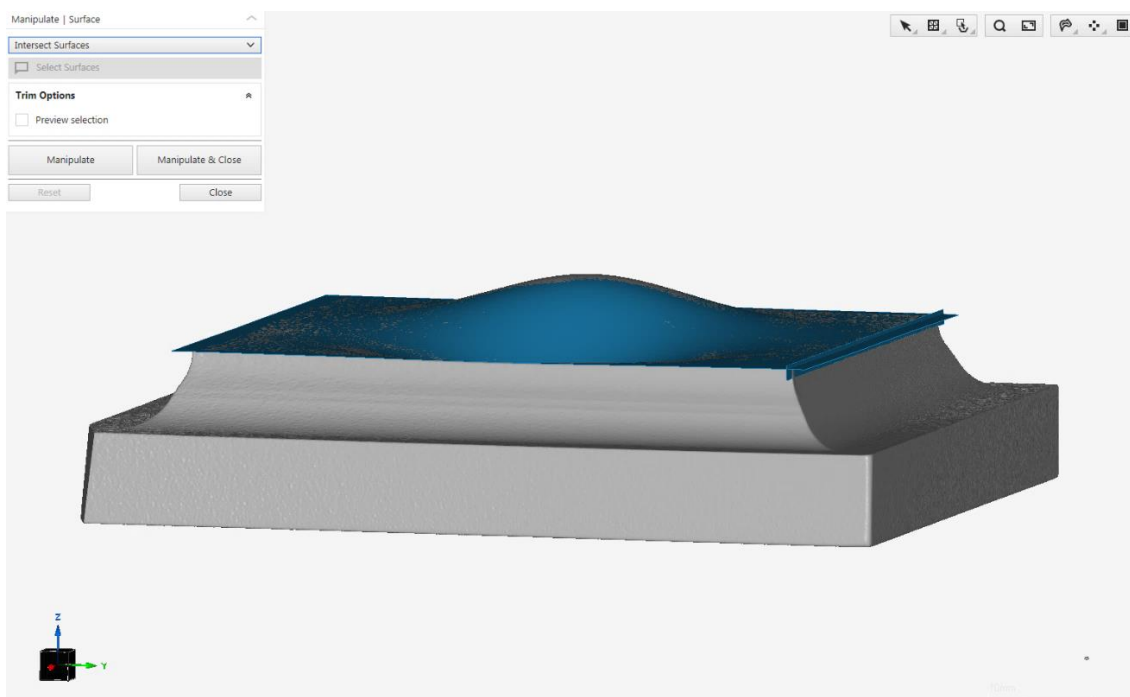
První funkcí, kterou použiji pro rekonstrukci, je funkce „Extend Surface“. Tato funkce je vhodná pro využití tam, kde je potřeba zkrátit nebo rozšířit vybranou plochu. Vyberu

hranu plochy, kterou chci rozšířit, a plochu rozšířím o zvolenou hodnotu. Zde bude rozšíření plochy sloužit k ořezání horní obecné tvarové plochy, tak aby plocha nepřesahovala přes okraj. Funkce je znázorněna na Obr. 4. 51.



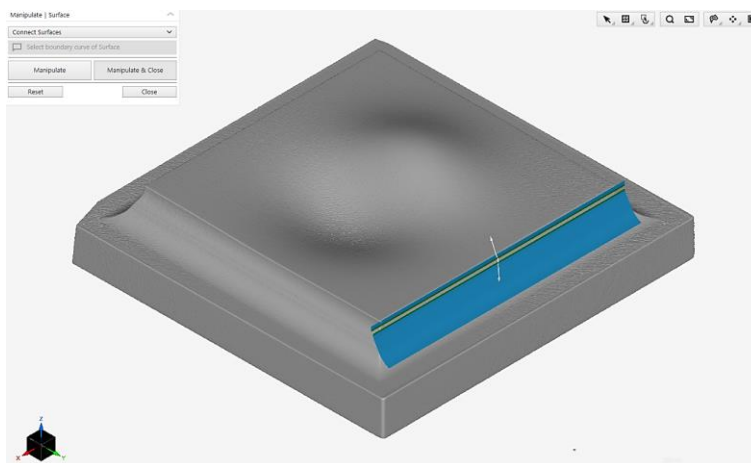
Obr. 4. 51 Rozšíření plochy „Extend Surface“

Pro ořezání plochy využijí funkci „Intersect Surfaces“. Vyberu dvě plochy – tu kterou chci ořezat a tu, podle které budu ořezávat a potvrdím. Funkce je znázorněna na Obr. 4. 52.

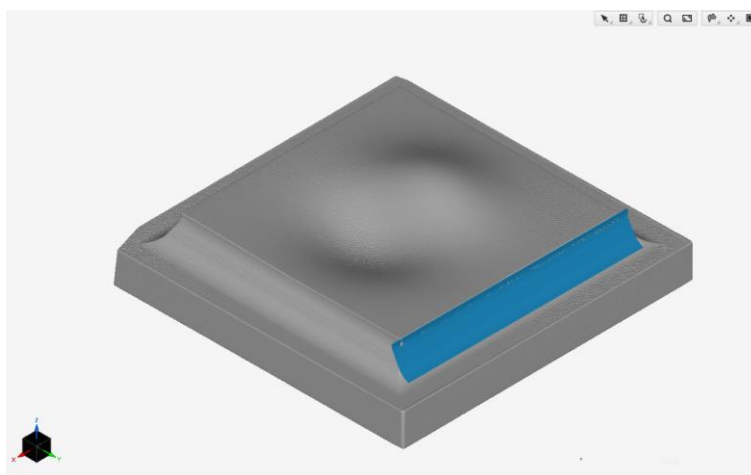


Obr. 4. 52 Ořezání plochy „Intersect Surfaces“

Vytvořené plochy (Obr. 4. 48 vpravo, Obr. 4. 49 vpravo, Obr. 4. 50) spojíme mezi sebou pomocí funkce „Connect Surfaces“. Označíme vždy hranu dvou ploch, které chceme propojit a potvrdíme. Plochy se spojí (Obr. 4. 54).

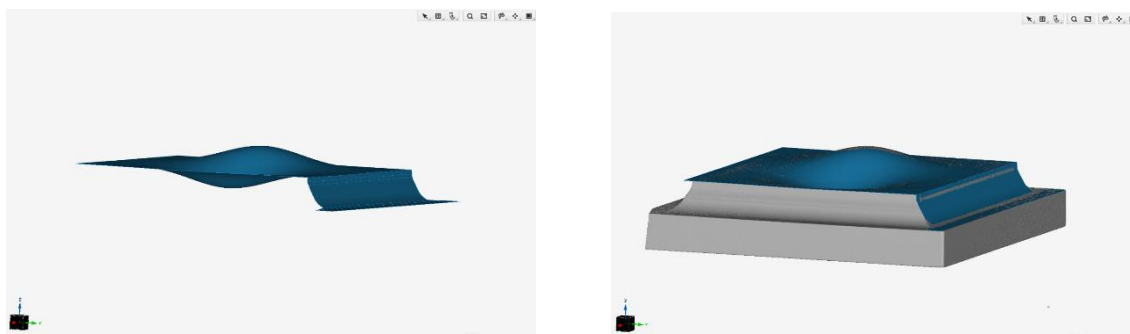


Obr. 4. 53 Spojení ploch „Connect Surface“



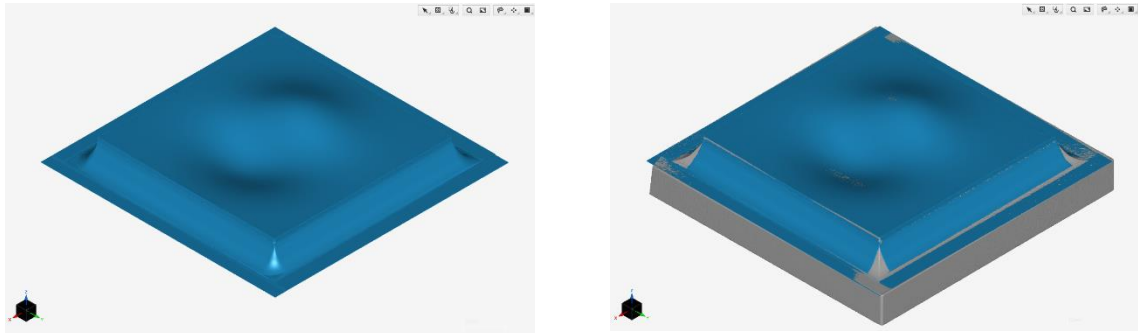
Obr. 4. 54 Spojené plochy

Stejným způsobem propojíme plochy na Obr. 4. 49 vpravo a Obr. 4. 54 a poté ještě s obecnou tvarovou plochou, kterou jsme v předchozích krocích ořezali na požadovaný rozměr. Po těchto propojeních vznikne spojitá plocha uvedená na Obr. 4. 55



Obr. 4. 55 Spojitá plocha části modelu po zrekonstruování

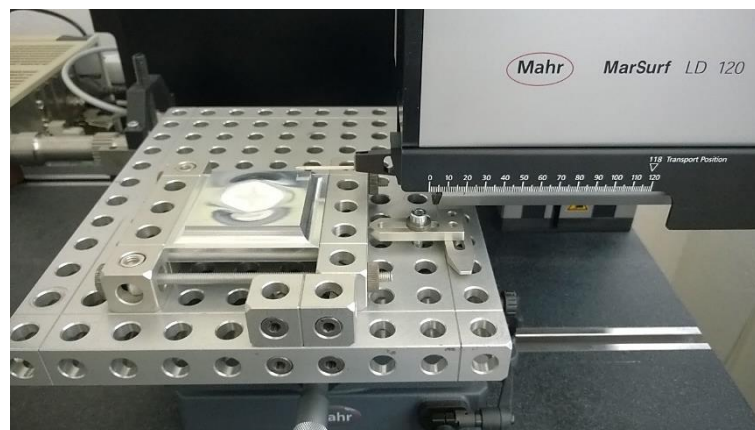
S pomocí těchto funkcí jsem zrekonstruovala model součásti, který je zobrazený na Obr. 4. 56. Z obrázku je patrné, že rohy součásti jsou pro rekonstrukci veliký problém.




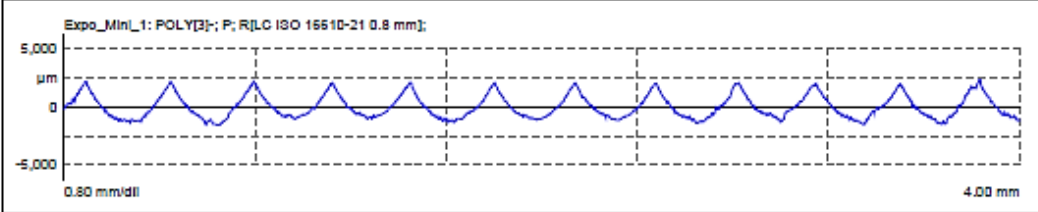
Obr. 4. 56 Zrekonstruovaný model

4.7 Měření drsnosti

Pro objektivní vyhodnocení bylo nutné změřit drsnost povrchu dané součásti (Obr.4.1). Povrch součásti je periodický, základní délka pro vyhodnocení byla zvolena podle parametru R_{sm} . Přístroj, na kterém byl povrch měřen, je MarTalk. Protokol z měření drsnosti je uveden na Obr. 4. 58.



Obr. 4. 57 Měření drsnosti

	MarWin 10.00-21 SP 3	Expo_Mini_1 Úloha: "Drsnost"	2.7.2018 1 15:07:31 Kontrolor: Vladimír Šulc Podpis:
	Díl: Expo_Mini_1	Číslo výkresu:	Krok obrábění:
MarSurf LD 120			
Komentář:			
Měřicí přístroj: MarTalk Posuvová jednotka: DriveUnit.LD 120 Snímač: LD B 4-10-2 7144		Lt: 5.60 mm Ls: 2.50 μm VB: +/-5953.0 μm Vt: 0.20 mm/s Body: 11198	
			
Parametry drsnosti - Expo_Mini_1: POLY[3]-; P; R[LC ISO 16610-21 0.8 mm];			
Ra	0,842 μm	0,000	0,000
Rz	3,582 μm	0,000	0,000
R Sm	337,800 μm	0,000	0,000

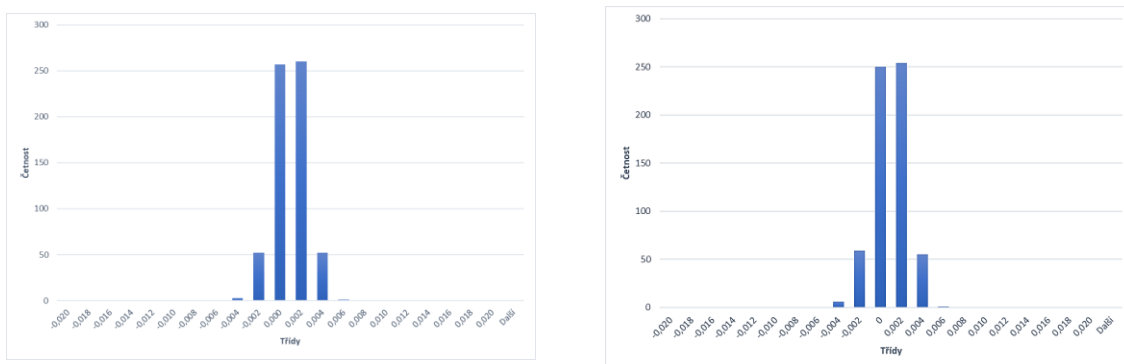
Obr. 4. 58

Protokol z měření drsnosti

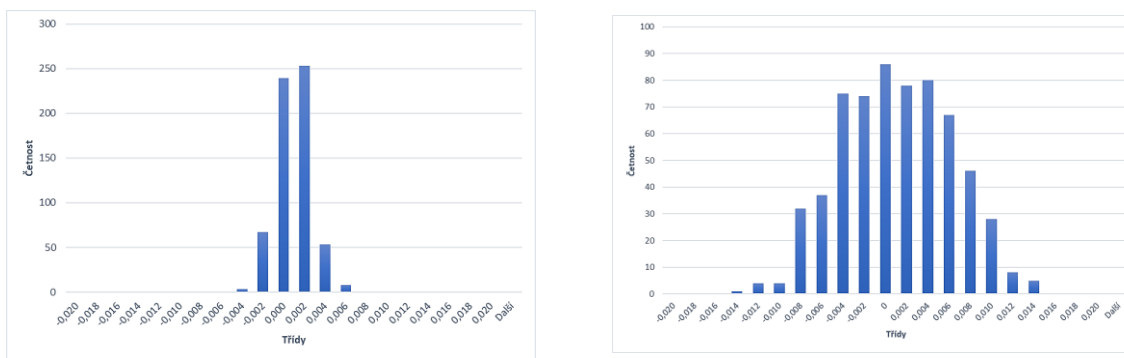
4.8 Vyhodnocení

Vyhodnocení praktické části bude vzhledem k přesnosti jednotlivých snímacích systémů použitých pro rekonstrukci zadané obecné tvarové plochy a vzhledem k času potřebného pro nasnímání.

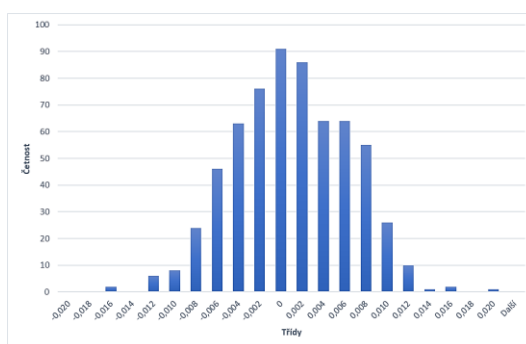
Pro objektivní vyhodnocení přesnosti a názornému zobrazení je nutné odchylky naměřených dat zobrazit v jednotném měřítku. Měření v náhodných bodech, tedy v rastru s konstantní šířkou a délkou 25 bodů a vzdáleností od okraje 2 mm, je nutné navíc vyhodnotit s ohledem na stav měřeného povrchu. Protokol o měření drsnosti je uveden na Obr. 4. 58. Na následujících obrázcích jsou uvedena rozložení odchylek pro všechny snímací systémy s kontrolním měřením v náhodných bodech.



Obr. 4. 59 Vyhodnocení dotkový snímací systém: vlevo: ZRE; vpravo: Calypso



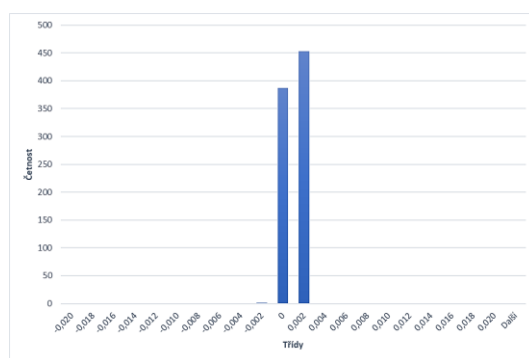
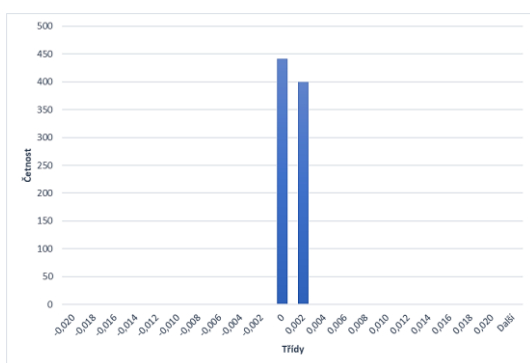
Obr. 4. 60 Vyhodnocení: vlevo: bílé světlo; vpravo: laser skener



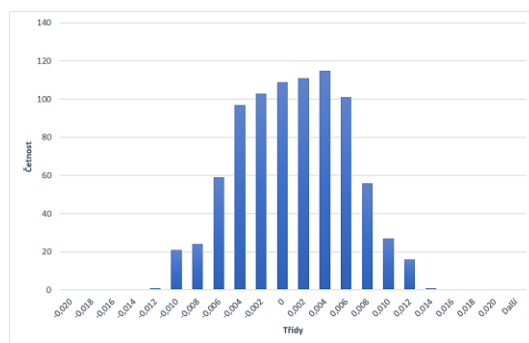
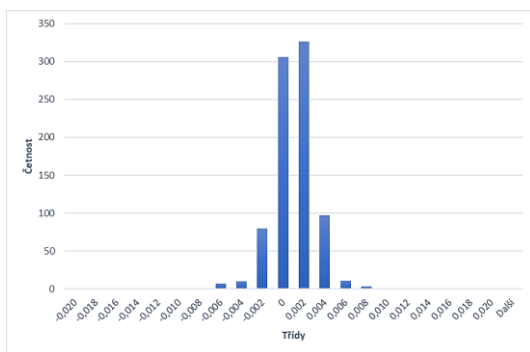
Obr. 4. 61 Vyhodnocení: počítačová tomografie

Z rozložení odchylek je patrné, že nejpřesnější nasnímání neznámé plochy je pomocí dotykového snímacího systému, kdy se přesnost pohybuje v řádech tisícín. S podobnou přesností snímá i bezdotykový snímací systém – bílé světlo. Snímání pomocí laser skeneru a počítačové tomografie je o řád horší než předcházející, ale produktivnější. Získáváme více bodů v jednom okamžiku. V případě počítačové tomografie získáváme navíc i informace o vnitřní stavbě měřené součásti. Na všechna snímání má vliv stav povrchu. Ten má u této zadané součásti periodický profil. Jsou na něm patrné dráhy po nástroji.

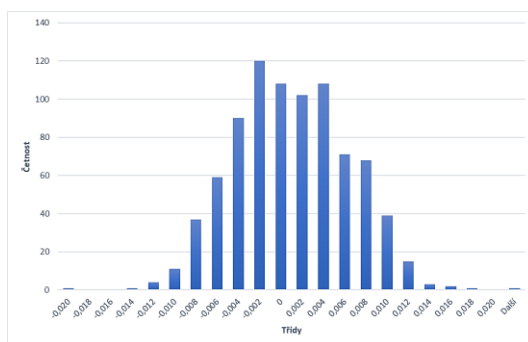
V případě ideálního spojitého povrchu by rozložení odchylek naměřených hodnot vypadalo následovně:



Obr. 4. 62 Vyhodnocení dotykový snímací systém: vlevo: ZRE; vpravo: Calypso



Obr. 4. 63 Vyhodnocení: vlevo: bílé světlo; vpravo: laser skener



Obr. 4. 64 Vyhodnocení: počítačová tomografie

Kontrolní měření probíhala ve stejných bodech, kdy dráha obecné tvarové plochy byla generována vždy ze stejných dat ze souboru.

Časy potřebné pro samotná snímání neznámé obecné tvarové plochy jsou uvedeny v následující Tab. 4. 1. Nesmíme ale opomenout čas potřebný pro přípravu měření, který u každého snímacího systému je cca 10 minut. Další zpřesňující a kontrolní měření již trvají stejnou dobu, neboť se prováděla stejným snímacím systémem – dotykovým. Liší se jen v délce doby měření plochy, jejíž dráha byla generována z dat ze souboru a doby měření, kdy dráha byla vytvářena z plochy v rastru s konstantní délkou a šířkou 25 bodů a vzdáleností od okraje 2 mm. Délka měření plochy s dráhou generovanou ze souboru dat byla 40 minut a pro druhou plochu s konstantním rastrem byla 30 minut.

Tab. 4. 1 Doba samotného snímání

	Doba samotného snímání [min]	
	ZRE	Calypso
Dotykové snímání	15	33
Bílé světlo	6	
Laser skener	8	
Počítačová tomografie	30	

Do časové náročnosti je nutné také započítat čas zpracování dat v softwaru ZRE. Celkovou časovou náročnost práce v tomto softwaru nemůžeme objektivně vyhodnotit, protože jsme se softwarem pracovali bez zaškolení, pouze na základě dostupného manuálu a laicky řečeno metodou „pokus omyl“. Po zorientování v programu a zjištění jeho možných funkcí, které trvalo po několik týdnů, se čas potřebný pro importování dat do softwaru, zpřesnění plochy a vyexportování pro kontrolní měření snížil na cca 15 minut. Samotné zrekonstruování plochy (Obr. 4. 56) z mraku bodů získaného měřením pomocí počítačové tomografie trvalo přibližně 4 hodiny.

Závěr

Tato práce měla za cíl zaměřit se na aplikaci reverzního inženýrství v oblastech, kde se kladou vysoké požadavky na přesnost.

Abychom mohli pochopit základní myšlenku práce, bylo nutné nejprve představit samotný pojem reverzní inženýrství. Tímto úkolem se zabývá teoretická část práce. Jsou zde představeny cíle a hlavní důvody užití reverzního inženýrství. Ve druhé části jsou uvedeny možné aplikace této technologie v různých oblastech.

Druhá kapitola se zabývá senzory využívanými pro akvizici měřených dat a je zde uvedeno základní rozdělení sensorů. Ke každému dělení je vysvětlen princip snímání bodů, vhodnost aplikace a ke konci jsou představeny senzory, které se pro dané kategorie snímacích systémů vyskytují na trhu. V závěru kapitoly je uvedeno porovnání dotykových a bezdotykových sensorů. Jelikož je práce zaměřena na aplikaci dané technologie v oblastech s vysokými požadavky na přesnost, je nutné vědět, který senzor je vhodné použít pro dosažení přesných výsledků. Proto je ke konci této kapitoly uveden graf, kde jsou představené senzory porovnány z hlediska přesnosti a rychlosti, se kterými jsou schopny snímat měřená data.

Ve třetí kapitole je popsán postup reverzního inženýrství, který se skládá ze třech fází. Ty jsou v práci samostatně představeny. Ke konci kapitoly jsou uvedeny programové nástroje, které se využívají pro reverzní inženýrství i s funkcemi, které je vhodné využít.

V závěru práce byly dosud získané poznatky o technologii reverzního inženýrství aplikovány na vybranou součást. Pro akvizici dat byly z přehledu snímacích sensorů uvedených ve druhé kapitole vybrány čtyři, pomocí kterých byla postupně nasnímaná obecná tvarová plocha na zadaném objektu. Nasnímaná data byla poté zpracována a byly z nich vytvořeny plochy. Každou plochu zvlášť jsme proměřili. Výsledkem byly zjištěné odchylky od plochy nasnímané vybraným snímacím systémem, zjištění s jakou přesností vybrané snímací systémy měří a jak velkou časovou dotaci na měření potřebujeme. Vyhodnocení této části je uvedeno před závěrečnou kapitolou.

Při volbě vhodné sensoriky pro snímání je nutné zohlednit vlastnosti snímaného objektu, které tvoří významné hledisko pro správný výběr senzoru pro přesnou akvizici dat. Z porovnání snímacích systémů, a i z vyhodnocení experimentální části s ohledem na

vlastnosti snímaného objektu vyplývá, že nejpřesnější pro postup reverzního inženýrství v aplikacích vyžadující přesnost je dotykový snímací systém. Ten je však pomalý. Pokud bychom vyžadovali rychlejší měření, museli bychom zvolit bezdotykový snímací systém a přijmout riziko méně přesného měření.

Seznam použitých zdrojů

- [1] RAJA, Vinesh. a Kiran J. FERNANDES. *Reverse engineering: an industrial perspective*. London: Springer, c2008. ISBN 978-1-84628-855-5.
- [2] MCDONALD, Julia A., Chris J. RYALL a David I. WIMPENNY. *Rapid Prototyping Casebook*. London: Professional Engineering Publishing, 2001. ISBN 1 86058 076 9.
- [3] WANG, Wego. *Reverse Engineering Technology of Reinvention*. Hoboken: CRC Press, 2010. ISBN 9781439806319.
- [4] Le, Chi Hieu & Vander Sloten, Jos & T Hung, L & Khanh, L & Soe, Shwe & Zlatov, Nikolay & Phuoc, Le & D Trung, P. (2018). *Medical Reverse Engineering Applications and Methods*.
- [5] RŮŽIČKA, Pavel, Eren PEHLIVAN a Jiří ČERNÝ. *Aditivní technologie v medicínských aplikacích*. České vysoké učení technické v Praze, 2015.
- [6] KALEEV, A. A. a kol. *Application of reverse engineering in the medical industry*. [online]. [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/240/1/012030/pdf>
- [7] GIBSON, Ian. *Advanced manufacturing technology for medical applications: reverse engineering, software conversion, and rapid prototyping*. Hoboken, NJ, USA: J. Wiley, c2005. ISBN 0-470-01688-4.
- [9] LULIĆ, Zoran, Rudolf TOMIĆ, Petar ILINČIĆ, Goran ŠAGI a Ivan MAHALEC. Application of Reverse Engineering Techniques in Vehicle Modifications. STJEPANDIĆ, Josip, Georg ROCK a Cees BIL, ed. *Concurrent Engineering Approaches for Sustainable Product Development in a Multi-Disciplinary Environment* [online]. London: Springer London, 2013, 2013-8-10, s. 921-932 [cit. 2018-07-14]. DOI: 10.1007/978-1-4471-4426-7_78. ISBN 978-1-4471-4425-0. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4471-4426-7_78
- [10] Prodrive Speeds Ferrari Wing Development With Reverse Engineering & CFD Software. *3D Systems* [online]. c2018 [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: <https://ru.3dsystems.com/customer-stories/prodrive-speeds-ferrari-wing-development-reverse-engineering-cfd-software>
- [11] Application Example: Reverse Engineering: Aerospace: Digitizing of a Full Scale Falcon 20 "Zero G" Jet Aircraft. *GOM* [online]. [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: https://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/falcon_EN.pdf

- [12] Application Example: Reverse Engineering: Aerospace: Upgrade of a BLACK HAWK Helicopter. *GOM* [online]. [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: https://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/helicopter_EN.pdf
- [13] *Renishaw* [online]. c2001-2018 [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/1030.aspx>
- [14] EDITED BY ROBERT J. HOCKEN & PAULO H. PEREIRA. *Coordinate measuring machines and systems*. 2nd ed. Boca Raton, Fla: CRC Press, 2012. ISBN 9781420017533.
- [15] FLACK, D. CMM probing. *Measurement Good Practice Guide No. 43*. 2014. ISSN 1368-6550.
- [16] *Zeiss* [online]. [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/corporate/home.html>
- [17] *Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. c2018 [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ>
- [18] KOPTIŠ, Michal. *Využití snímacího systému laser scanneru pro aplikace reverzního inženýrství*. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [19] *CALYPSO: Návod k obsluze*. Verze 2017. 2017.
- [20] MACHÁČEK, Pavel. 2014. Návrh metodiky měření geometrických specifikací výrobků pomocí prostorového skenování. Praha. Disertační práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Rudolf DVOŘÁK, CSc
- [21] MCCANN, Shawn. *3D Reconstruction from Multiple Images* [online]. [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: http://cvgl.stanford.edu/teaching/cs231a_winter1415/prev/projects/CS231a-FinalReport-sgmccann.pdf
- [22] Photogrammetry. *Clemson University* [online]. [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: <https://www.clemson.edu/centers-institutes/conservation/equipment/photogrammetry.html>
- [23] KÁKONA, Jakub. *Vysílač pro laserový dálkoměr* [online]. Praha, 2012 [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: http://www.mlab.cz/WebSVN/filedetails.php?repname=MLAB&path=%2FDesigns%2FLaser_pulser%2FDOC%2Flaserovy_vysilac.pdf. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. Vedoucí práce Prof. Ing. Ivan Procházka, DrSc.
- [24] *Nikon Metrology NV* [online]. c2017 [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: <https://www.nikonmetrology.com/en-gb/>

- [25] OPAT, Jan. *Vybrané metody měření tvaru a deformace ploch a jejich rekonstrukce* [online]. Praha, 2015 [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: <http://gama.fsv.cvut.cz/~cepek/proj/dp/2015/jan-opat-dp-2015.pdf>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Novák, Ph.D.
- [26] *Optické metody měření 3D objektů* [online]. [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html#kap2.2>
- [27] *Multisenzorové souřadnicové měřící stroje WERTH*. Werth Messtechnik GmbH.
- [28] Zeiss Industrial Metrology Full Catalog. [online]. [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/catalogs/browse/10042749-18827/zeiss-industrial-metrology/>
- [29] CHRISTOPH, Ralf a Hans Joachim NEUMANN. *Multisenzorová souřadnicová měřící technika*. Uherské Hradiště: PRIMA Bilavčák, 2008.
- [30] *Concurrent engineering in the 21st century*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2015. ISBN 978-3-319-13775-9.
- [31] *ZEISS Reverse Engineering: Operating instructions*. Version 1.2. 2015.
- [32] *Reverzní inženýrství a kontrola* [online]. [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: <http://solicad.com/o/reverzni-inzenyrstvi-kontrola>

Seznam obrázků

Obr. 1. 1	Rozsah reverzního inženýrství [2].....	10
Obr. 1. 2	Úrovně procesu vývoje softwaru [3].....	11
Obr. 1. 3	Vizualizace anatomie: vlevo: data z MRI; uprostřed: počítačový model; vpravo: fyzický model [5].....	12
Obr. 1. 4	Vlevo: vyvíjení nového prototypu pinzety; vpravo: nový prototyp [6].....	12
Obr. 1. 5	Využití metod MRE ve stomatologii [4, 5].....	12
Obr. 1. 6	Vlevo: Snímky lebky z CT; vpravo: 3D rekonstrukce, model implantátu [7].....	13
Obr. 1. 7	Nahoře vlevo: snímání zadních dveří a rámu; nahoře vpravo: CAD model zadních dveří a rámu; dole: nový mechanismus otevírání zadních dveří [9].....	14
Obr. 1. 8	Využití v RE pro simulaci v aerodynamickém tunelu [10].....	14
Obr. 1. 9	Skenování pomocí systému ATOS II (strukturované bílé světlo) a získaný mrak bodů [11].....	15
Obr. 1. 10	Vlevo: Údaje o typu křídla pro kontrolu symetrie a zrcadlení; vpravo: pozice pro umístění vztlakových klapky a vzduchové brzdy [11].....	16
Obr. 1. 11	Black Hawk helikoptéra (rozměry: 15,4 m x 2,4 m x 2,3 m) [12].....	16
Obr. 1. 12	Vlevo: získaná data z optického skenování; vpravo: vytvořený CAD model z naskenovaných dat [12].....	16
Obr. 2. 1	Základní rozdělení snímacích systémů.....	17
Obr. 2. 2	Zobrazení nominálního průměru doteku, odchylky jeho průměru a úchylky tvaru koule [13].....	18
Obr. 2. 3	Vlevo: připevnění doteku ke dřívku; vpravo: umístění snímacího doteku ve sférické misce [13].....	19
Obr. 2. 4	Korekce o poloměr snímače [19].....	20
Obr. 2. 5	Princip spínací kinematické sondy [13].....	21
Obr. 2. 6	Schéma tenzometrického snímacího systému [15].....	21
Obr. 2. 7	Vlevo: TP20; Vpravo: TP200 [13].....	22
Obr. 2. 8	Vlevo: spínací dotykový senzor RST-P; vpravo: spínací doteková sonda HP-THD [16, 17].....	22
Obr. 2. 9	Analogový skenovací systém Zeiss [15].....	23
Obr. 2. 10	Vlevo: pasivní senzor VAST XXT; vpravo: aktivní senzor VAST XT gold [16].....	24
Obr. 2. 11	Zleva: HP-S-X5, HP-S-X3, SP80, SP600M [13,17].....	24
Obr. 2. 12	Triangulační schéma: a) 1 CCD kamera; b) 2 CCD kamery [1].....	26
Obr. 2. 13	Různé vzory použité při proužkové projekci [1].....	27
Obr. 2. 14	Fotogrammetrie [22].....	28
Obr. 2. 15	Měření vzdálenosti laserovým impulsem principem TOF [1].....	29
Obr. 2. 16	Laser radar MV331/351 [24].....	29
Obr. 2. 17	Princip optické interferometrie [26].....	30
Obr. 2. 18	Princip měření zaostřeným bílým světlem.....	31
Obr. 2. 19	Analýza obrazu [27].....	32
Obr. 2. 20	Princip počítačové tomografie [1].....	33
Obr. 2. 21	Vlevo: ZEISS DotScan; Vpravo: PRECITEC Lateral Resolution [16, 17].....	33
Obr. 2. 22	Vlevo: ViScan; Vpravo: HP-C-VE Vision Sensor [16, 17].....	34
Obr. 2. 23	Vlevo: LineScan; uprostřed: HP-L-10.6; vpravo Nikon LC15Dx [16, 17, 24].....	35
Obr. 2. 24	ZEISS METROTOM [16].....	35
Obr. 2. 25	VAST gold [16].....	36
Obr. 2. 26	Vlevo: MH20i; vpravo: HH-MI-M [13, 17].....	37
Obr. 2. 27	Vlevo: zobrazení os pro polohování; vpravo: PH10M [13].....	38

Obr. 2. 28	Vlevo: HH-ACW-43MW Kontinuální hlava; vpravo: otočná polohovací hlava RDS [16, 17]	38
Obr. 2. 29	Porovnání snímacích systémů v závislosti přesnosti měření na produktivitě měření	39
Obr. 3. 1	Obecný postup reverzního inženýrství [30]	40
Obr. 3. 2	a) Wirframe polygonální model; b) Polygonální povrchový model; c) NURBS model [1]	41
Obr. 3. 3	Uživatelské rozhraní Zeiss [31]	42
Obr. 3. 4	Vlevo: import dat ve formátu TXT; vpravo: import dat ve formátu IGES [31]	43
Obr. 3. 5	Porovnání produktů Geomagic Wrap a Geomagic Design X [32]	44
Obr. 4.1	Zvolená součást s obecnou tvarovou plochou	45
Obr. 4. 2	Plochy pro sestavení souřadného systému	46
Obr. 4. 3	Sestavení souřadného systému	46
Obr. 4. 4	Dotykový snímací systém	47
Obr. 4. 5	Postup měření	47
Obr. 4. 6	Vlevo: výsledky kalibrace; vpravo: upnutí součásti	48
Obr. 4. 7	Vlevo odkaz na pruh úloh; Vpravo přepnutí přes pruh úloh	48
Obr. 4. 8	Postup vytváření nového mraku bodů	49
Obr. 4. 9	Definování neznámého prostoru pro měření	49
Obr. 4. 10	Parametry skenování – rovina skenování, vzdálenost linií	50
Obr. 4. 11	Parametry skenování	51
Obr. 4. 12	Nasnímané body	52
Obr. 4. 13	Vytvoření plochy	52
Obr. 4. 14	Vytvoření ekvidistantní plochy	53
Obr. 4. 15	Řez původní a ekvidistantní plochy	53
Obr. 4. 16	Posunutí roviny ve směru normály	54
Obr. 4. 17	Vytvoření roviny	54
Obr. 4. 18	Vytvořené a posunuté plochy	55
Obr. 4. 19	Exportování ploch	55
Obr. 4. 20	Přepnutí zpět do softwaru Calypso	55
Obr. 4. 21	Načtený CAD model	56
Obr. 4. 22	Grafické vyhodnocení v náhodných bodech	57
Obr. 4. 23	Grafické vyhodnocení ve stejných bodech	57
Obr. 4. 24	Rozložení odchylek: vlevo ve stejných bodech; vpravo v náhodných bodech	57
Obr. 4. 25	Editování elementu rovina	58
Obr. 4. 26	Grafické vyhodnocení v náhodných bodech	59
Obr. 4. 27	Grafické vyhodnocení ve stejných bodech	59
Obr. 4. 28	Rozložení odchylek naměřených hodnot: vlevo ve stejných bodech; vpravo v náhodných bodech	60
Obr. 4. 29	Potvrzení měření v měřicím rozsahu	61
Obr. 4. 30	Grafické vyhodnocení v náhodných bodech	61
Obr. 4. 31	Grafické vyhodnocení ve stejných bodech	61
Obr. 4. 32	Rozložení odchylek naměřených hodnot: vlevo ve stejných bodech; vpravo v náhodných bodech	62
Obr. 4. 33	Kalibrace laser skeneru	62
Obr. 4. 34	Vlevo: upnutí součásti; vpravo: parametry laserového paprsku	63
Obr. 4. 35	Dráha skeneru	63
Obr. 4. 36	Vlevo: mrak bodů; vpravo: stereolitografická síť	63
Obr. 4. 37	Souřadný systém	64

Obr. 4. 38	Grafické vyhodnocení v náhodných bodech.....	65
Obr. 4. 39	Grafické vyhodnocení ve stejných bodech	65
Obr. 4. 40	Rozložení odchylek naměřených hodnot: vlevo ve stejných bodech; vpravo: v náhodných bodech	65
Obr. 4. 41	Parametry detekce obrazu	66
Obr. 4. 42	Kombinace tlačítek pro výběr.....	67
Obr. 4. 43	Vlevo: importovaná data z CT do ZRE; vpravo: plochy pro vyexportování	67
Obr. 4. 44	Souřadný systém	67
Obr. 4. 45	grafické vyhodnocení v náhodných bodech.....	68
Obr. 4. 46	Grafické vyhodnocení ve stejných bodech	68
Obr. 4. 47	Rozložení odchylek naměřených hodnot: vlevo ve stejných bodech; vpravo v náhodných bodech	68
Obr. 4. 48	Vlevo: výběr bodů; Vpravo: vytvořená plocha.....	69
Obr. 4. 49	Vlevo: výběr bodů; vpravo: vytvoření roviny	69
Obr. 4. 50	Vlevo: vytvoření roviny; vpravo: vytvoření plochy	69
Obr. 4. 51	Rozšíření plochy „Extend Surface“	70
Obr. 4. 52	Ořezání plochy „Intersect Surfaces“	70
Obr. 4. 53	Spojení ploch „Connect Surfacec“	71
Obr. 4. 54	Spojené plochy.....	71
Obr. 4. 55	Spojité plocha části modelu pro zrekonstruování	71
Obr. 4. 56	Zrekonstruovaný model	72
Obr. 4. 57	Měření drsnosti	72
Obr. 4. 58	Protokol z měření drsnosti	73
Obr. 4. 59	Vyhodnocení dotkový snímací systém: vlevo: ZRE; vpravo: Calypso ..	74
Obr. 4. 60	Vyhodnocení: vlevo: bílé světlo; vpravo: laser skener	74
Obr. 4. 61	Vyhodnocení: počítačová tomografie	74
Obr. 4. 62	Vyhodnocení dotkový snímací systém: vlevo: ZRE; vpravo: Calypso ..	75
Obr. 4. 63	Vyhodnocení: vlevo: bílé světlo; vpravo: laser skener	75
Obr. 4. 64	Vyhodnocení: počítačová tomografie	75

Seznam tabulek

Tab. 2. 1	Parametry ZEISS DotScan a PRECITEC LR [17, 28].....	34
Tab. 2. 2	Parametry ViScan a HP-C-VE Vision Sensor [17, 28].....	34
Tab. 2. 3	Parametry LineScan, HP-L-10.6, Nikon LC15Dx [24, 28].....	35
Tab. 4. 1	Doba samotného snímání	76