

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

VYUŽITELNOST REVERZNÍHO INŽENÝRSTVÍ PRO
DIGITALIZACI A ÚPRAVU STROJNÍCH SOUČÁSTÍ

DIGITALIZATION AND MODIFICATION MACHINE PARTS USING
REVERSE ENGINEERING

AUTOR: Bc. David Čermák

STUDIJNÍ PROGRAM: Výrobní inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Jan Šimota

PRAHA 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Čermák Jméno: David Osobní číslo: 473429
Fakulta/ústav: Fakulta strojní
Zadávající katedra/ústav: Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Studijní program: Výrobní inženýrství
Specializace: Bez specializace

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Využitelnost reverzního inženýrství pro digitalizaci a úpravu strojních součástí

Název diplomové práce anglicky:

Digitization and modification machine parts using reverse engineering

Pokyny pro vypracování:

1. Metody pro získání dat pro reverzní inženýrství - výhody, nevýhody, využitelnost
2. Vliv jednotlivých metod skenování na přesnost získaných dat
3. Problematika digitalizace dat a následná úprava objemového modelu
4. Porovnání vybraných metod RE na zkušební dílci - tvorba plánu měření, úprava dat, export a vytvoření výkresové dokumentace

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Šimota ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání diplomové práce: 15.03.2022

Termín odevzdání diplomové práce: 29.07.2022

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Jan Šimota
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

Diplomant bere na vědomí, že je povinen 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 studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Abstrakt

Diplomová práce ve své teoretické části nabízí řešení na téma reverzního inženýrství, především se pak zabývá různými metodami akvizice bodů a digitalizace součástí. Konkrétně popisuje princip fungování souřadnicových měřících strojů, výpočetní tomografie a optických metod digitalizace. Ve své praktické části práce nabízí řešení úkolu reverzního inženýrství na konkrétní součásti – náboji do kola studentské formule, včetně analýzy součásti, digitalizace a následné úpravy dat. Práce nabízí porovnání metod výpočetní tomografie a souřadnicového měření, výstupem práce je CAD upravitelný model náboje a výrobní výkres.

Klíčová slova

Reverzní inženýrství, digitalizace, souřadnicové měřící stroje, výpočetní tomografie, převod dat, polygonizace, parametrizace, Zeiss Prismo, Zeiss Metrotom, CAD softwary

Abstract

In its theoretical part, the thesis offers a research on the topic of reverse engineering. In particular it deals with different methods of point acquisition and part digitalization. Specifically, it describes the principle of coordinate measuring machines, computed tomography and optical methods for digitalization. In its practical part, the diploma thesis offers a solution to a reverse engineering problem on a specific component – a hub for a student formula wheel, including component analysis, digitalization and subsequent data editing. The thesis offers a comparison of coordinate measurement method and computed tomography, and the output of the diploma thesis is a CAD editable model of the wheel hub and a production drawing.

Keywords

Reverse engineering, digitalization, coordinate measuring machines, computed tomography, data conversion, polygonization, parametrization, Zeiss Prismo, Zeiss Metrotom, CAD software

Poděkování

Tímto děkuji p. Ing. Janu Šimotovi za vedení a odbornou pomoc v řešení problémů při tvorbě této práce. Dále děkuji ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie ČVUT v Praze za možnost využití všech zařízení potřebných pro praktickou část této diplomové práce a studentům z projektu FEE eFormula ČVUT za zapůjčení náboje použitého v praktické části této práce.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk.....	9
Úvod.....	11
Cíle práce	11
Teoretická část:.....	12
1 Reverzní inženýrství	12
1.1 Využití.....	12
1.2 Princip.....	15
2 Metody digitalizace	21
2.1 Zisk digitálního modelu součásti	21
2.2 Souřadnicové měřicí stroje	21
2.2.1 Snímací systémy a uspořádání CMM.....	22
2.2.2 Přesnost a využití digitalizace pomocí CMM	40
2.3 Výpočetní tomografie.....	41
2.3.1 Princip	42
2.3.2 Přesnost výstupních dat	45
Praktická část:	48
3 Popis snímané součásti.....	48
4 Digitalizace konkrétní součásti.....	52
4.1 Digitalizace pomocí CT.....	52
4.2 Digitalizace pomocí CMM	61
4.2.1 Digitalizace s využitím CAD modelu.....	62
4.2.2 Digitalizace přímo pomocí CMM	70
4.3 Digitalizace pomocí konturografu	76
5 Převod dat do upravitelného formátu	81
5.1 Použití automatické konverze dat.....	81

5.1.1	SolidWorks 2019	81
5.1.2	Autodesk Fusion 360.....	82
5.1.3	Autodesk Meshmixer.....	85
5.1.4	PTC Creo.....	87
5.2	Přemodelování.....	88
6	Vyhodnocení a diskuse	94
	Závěr.....	103
7	Bibliografie.....	104
	Seznam obrázků	108
	Seznam tabulek	112
	Seznam grafů	113
	Seznam příloh.....	114

Seznam použitých symbolů a zkratk

RE	Reverse engineering (reverzní inženýrství)
CAD	Computer aided design (počítačově podporované projektování)
CAM	Computer aided manufacturing (počítačem podporovaná výroba)
SW	Software
F1	Motoristický závod Formule 1
CMM	Coordinate measuring machine (souřadnicový měřicí stroj)
CT	Computed tomography (výpočetní tomografie)
TXT	Textový formát souboru, tento formát je výstupem výpočetní tomografie
ASCII	American Standard Code for Information Interchange, v textu reprezentuje formát výstupních dat
STL	Stereolithography, formát popisující geometrii povrchu objektu pomocí trojúhelníkové sítě
STEP	Formát 3D objektů v CAD
NURBS	Non-uniform rational basis spline (nástroj pro generování složitých křivek v počítačové grafice)
3D	Three dimensional (trojrozměrný)
LED	Light-Emitting Diode (světelná dioda)
CCD	Charge-Coupled Device (elektronická součástka pro snímání obrazu)

U [kV]	Kilovolt (tisícinásobek základní jednotky elektrického napětí)
I [μA]	Mikroampér (Miliardtina základní jednotky elektrického proudu)
X [mm]	Vzdálenost snímaného objektu od zdroje v prostředí výpočetního tomografu
v [°/s]	Rychlost otáčení otočného stolu CT ve stupních za sekundu
HW	Hardware
B	Byte (bajt) jednotka kapacity počítačové paměti, odvozeniny použité v této práci jsou kB (kilobajt), MB (megabajt), GB (gigabajt)

Úvod

Reverzní inženýrství je obor, který se s inženýrským pokrokem, inovacemi a novými postupy pojí již několik desítek let. V době rapidního technického pokroku během minulého století bylo reverzní inženýrství využíváno pro získání konkurenční výhody prakticky ve všech technických oborech od zbrojního po spotřební průmysl. Nyní může tento obor nabídnout výhodu ve zefektivnění (zrychlení) výrobních procesů či v archivaci a obnovení dat.

Základním stavebním kamenem reverzního inženýrství je akvizice dat. V dnešní době je akvizicí dat myšleno jejich efektivní přenesení do digitální podoby. Se stále rostoucím zájmem o digitální prostor se dá předpokládat, že bude digitalizace a reverzní inženýrství stále častějším tématem.

Tato práce nabízí pohled na principy reverzního inženýrství, uvádí nejčastěji používané metody digitalizace, jejich využití, výhody a nevýhody. V praktické části je provedeno reverzní inženýrství hliníkového náboje do kola studentské závodní formule. Metody akvizice dat pomocí výpočetní tomografie a dotykového souřadnicového měření použité v praktické části jsou kombinací, pomocí které je dosaženo upravitelného CAD modelu náboje a výkresové dokumentace. Souřadnicový měřicí stroj a průmyslové CT jsou navíc stroje, kterými disponuje většina velkých firem v oblasti strojírenství, jelikož se běžně využívají pro kontrolu součástí.

Cíle práce

Cílem této práce je v teoretické části přiblížit problematiku reverzního inženýrství, popsat metody pro získání dat, určit jejich výhody, nevýhody a uvést využití jednotlivých metod. Dále je cílem práce představit problematiku digitalizace dat a následných úprav objemového modelu. V praktické části je cílem provést reverzní inženýrství na konkrétní součásti – náboji do kola formule. Vytvořit upravitelný model a výkresovou dokumentaci.

Teoretická část:

1 Reverzní inženýrství

1.1 Využití

Reverzní inženýrství (z anglického reverse engineering – RE) je proces analyzování již existujícího předmětu, s cílem pochopení jeho funkce a následného převedení (naskenování) předmětu do upravitelného digitálního formátu. [1]

Převedení součásti do digitální podoby (digitalizace) má velké spektrum výhod, které jsou podstatou RE. Vytvořením přesné digitální kopie existujícího předmětu, kterým může být například strojní součást, získáme možnost opětovného vytvoření součásti. Dále možnost doplnění chybějící dokumentace, např. výkresu, či CAD modelu. V CAD podobě můžeme daný předmět upravovat podle potřeby našeho využití a tím vytvořit předmět, který sice vychází z naskenované součásti, ale může být funkčně i vizuálně pouze podobný. Zároveň je možné využití programů umožňujících topologické optimalizace pro zvýšení tuhosti či odlehčení dílu. Dalším strojírenským využitím RE je oprava částečně zdeformovaných objektů. Existuje jen málo technických odvětví, ve kterých by RE nemělo své místo. Například v kombinaci s medicínou se RE využívá pro výrobu kloubních implantátů. [1] [2] V oblasti stavebnictví a architektury slouží například k archivaci umění (vytvoření modelů historických budov, soch atp.). V architektuře je RE využíváno pro modelování např. stavebních parcel, což umožní mnohem detailnější a efektivnější přípravu nových projektů. [2]

Mezi další oblasti využití patří informační technologie, kde dochází k vylepšování či obnově hardwaru, jako například pevné disky, ale i softwaru pro potřeby ochrany proti virům. Digitalizace je velice oblíbená i ve filmovém a herním průmyslu, kde dochází k vytvoření digitálních dvojčat různých objektů, či postav.

Jedno z neznámějších použití reverzního inženýrství lze vyzorovat v období druhé světové války, kdy se jednotlivé strany snažily okopírovat vojenskou techniku nepřítele. Známým příkladem RE po druhé světové válce je vývoj Sovětského bombardéru Tupolev Tu-4 (vpravo), který byl silně inspirován americkým letounem B-29 (vlevo). Viz obrázek 1. [1] [2] [3]



Obrázek 1: B-29 Superfortress bomber (vlevo), Tupolev Tu-4 bomber (vpravo) [1] [33]

Reverzní inženýrství může znamenat velkou konkurenční výhodu nejen v průmyslu, ale i v oblasti sportu. Příkladem může být kauza z roku 2020, kdy došlo k „okopírování“ vozu F1. Stáj Racing Point (na obr. 2 vpravo) se nechala silně inspirovat závodními prvky Mercedesu a mezinárodní automobilová federace jí vyměřila peněžní trest 10,5 milionu korun a ztrátu 15 bodů v hodnocení poháru. Přesto bylo v tomto případě využití reverzního inženýrství tak účinné, že stáj Racing Point zaznamenala úspěšnou sezónu. [4]



Obrázek 2: Vlevo monopost stáje Mercedes, vpravo inspirovaný monopost stáje Racing point
UPRAVENO [4]

Hlavními výhodami RE oproti konvenčnímu vývoji dílu je:

- Zjednodušení celého procesu vývoje nového dílu
- S tím spojená úspora peněz a zkrácení doby vývoje
- Není třeba výkresová dokumentace
- Možnost použití poškozeného dílu
- Možnost opětovného využití 3D modelu

Nevýhodou je možné porušení legislativy, konkrétně zákona č. 221/2006 Sb. O vymáhání práv z průmyslového vlastnictví. [1]

1.2 Princip

Reverzní inženýrství se dá rozdělit dle cíle daného procesu na volné a přesné. Při volném inženýrství jde především o vytvoření věrohodného modelu daného objektu. Typickým příkladem by byla renovace sochy. Naopak u přesného reverzu nás již zajímají veškeré detaily. Cílem přesného RE je vytvoření co nejpřesnější kopie objektu, tedy včetně dodržení například drsností povrchu. V praxi to znamená, že v průběhu jednotlivých procesů RE je třeba brát větší ohled například i na odlehlé hodnoty. Velikou roli v přesném RE hraje přesnost metody akvizice bodů a dále zvolené parametry při aproximaci polygonové sítě. (viz dále). [1] [4]

Jak již bylo zmíněno celý postup RE ve strojírenství začíná u reálného fyzického výrobku. V první řadě je potřeba pochopit funkci daného výrobku, případně prozkoumat jeho vnitřní mechanismy tak, aby výsledek RE splňoval původní funkci. Dalším krokem je rozměrová analýza dílu, provádí se měření klíčových částí výrobku. K tomuto měření se v dnešní době využívají technologie 3D skenování, které inženýrům umožňují získat údaje o výrobku a automaticky je zaznamenat do databází. Mezi nejčastěji používané metody 3D skenování patří laserové skenery, souřadnicové měřicí stroje (CMM), výpočetní tomografy (CT) a digitalizátory se strukturovaným světlem. Právě zvolená metoda skenování dat (data acquisition method) značně ovlivňuje přesnost získaných dat. [4]

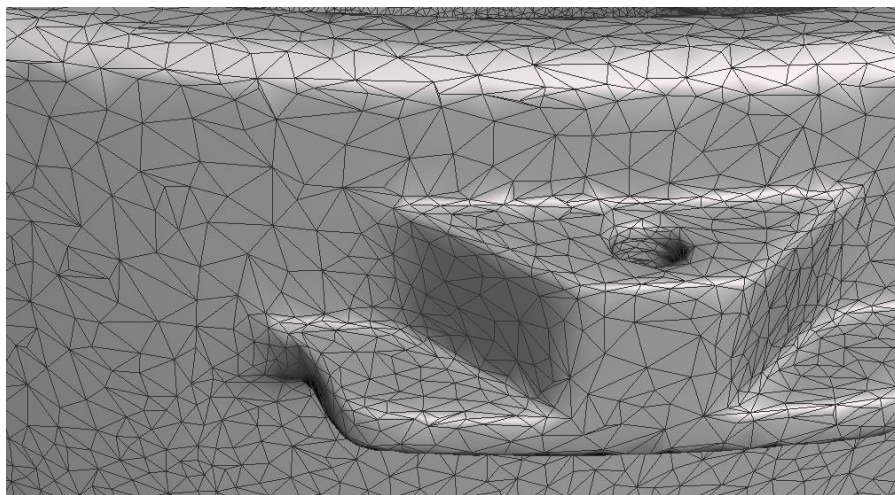
Zaznamenáním všech relevantních dat o daném výrobku pomocí skenovacích metod vzniká tzv. mrak bodů. Surový mrak bodů je textový soubor ve formátu ASCII, obsahující hodnoty x,y,z pro každý snímaný bod. Tento formát však neumožňuje další práci s daty, proto je potřeba převést mrak bodů do formátu STL. Převedením mraku bodů je v kontextu RE myšleno spojení mraku bodů do STL polygonové sítě (polygonizace) a následná filtrace tohoto mraku. [5] Preciznost práce s daty a správná konverze dat do příslušných formátů je pro přesnost RE stejně důležitá jako samotná akvizice bodů.

Polygonizace

Při polygonizaci dochází ke spojování (meshování) sousedních bodů tak, aby vznikaly trojúhelníky. Proces polygonizace je ovlivňován dvěma parametry: minimální vzdáleností dvou bodů, které budou považovány za bod jeden a maximální vzdálenost dvou bodů, které se ještě mohou vzájemně spojit. Proces polygonizace je realizován pomocí softwaru instalovaného s přístroji určenými pro akvizici (snímání) mraku bodů. Po softwarové polygonizaci, kterou některé SW provedou automaticky po sejmutí mraku bodů, následuje fáze zpřesnění dat. Tato data jsou již převedena na formát STL, který popisuje geometrii skenovaného objektu pomocí trojúhelníkových ploch. Každý takový trojúhelník je definován souřadnicemi vrcholů x , y , z a normálovým vektorem k objektu.

Zpřesněním je myšlena například segmentace, ta umožňuje seskupení či naopak oddělení dat (mraku bodů). Většina SW v dnešní době využívá automatické přístupy k polygonizaci, založené na automatickém přizpůsobení povrchu, umožňují však i manuální úpravu bodové sítě. [5]

Paralelním procesem mezi akvizicí bodů a jejich spojením do trojúhelníkové sítě je filtrace mraku bodů. Filtrace mraku bodů znamená odstranění nežádoucích bodů, jelikož mrak bodů je obvykle až příliš hustý. K filtraci slouží např. volba rovnoměrného odstupu mezi body – většinou volena vzhledem ke křivosti povrchu výrobku. Vznikající STL model je tedy



Obrázek 3: Příklad polygonové sítě

zjednodušeně možné popsat jako upravený mrak bodů pospojovaný do trojúhelníkové sítě, která kopíruje povrch daného výrobku. Zvýšený počet trojúhelníků by přineslo přesnější aproximaci povrchu, ale vedlo by ke zvětšení velikosti souboru. Hustota trojúhelníků a příklad polygonové sítě je na obr. 3. Na rozdíl od surově naměřených dat je formát STL použitelný pro různé inženýrské aplikace.

Pro potřeby volného reverzního inženýrství je možno soubor v tomto formátu využít pro výrobu součásti (nahrát do CAM softwaru). Samotný název formátu STL je odvozen od procesu rychlého prototypování stereolitografie (dnes již označován SLA). Při práci s formátem STL si je třeba uvědomit, že tento soubor popisuje pouze geometrii povrchu objektu, bez jakýchkoliv dalších údajů. Proto může dojít k obtížím při importu STL souborů do CAM (např. u příliš velkého množství trojúhelníků). Pokud chceme k informaci o geometrii povrchu součásti přidat další specifikace jako např. texturu povrchu musíme převést data do formátu CAD pomocí parametrizace. [5] [1]

Parametrizace

Již zmíněným důvodem zařazení parametrizace jsou omezené možnosti úpravy STL modelu a možnost další korekce dat. Cílem parametrizace je vytvoření CAD parametricky definovaného modelu, případně objektově definovaného CAD modelu.

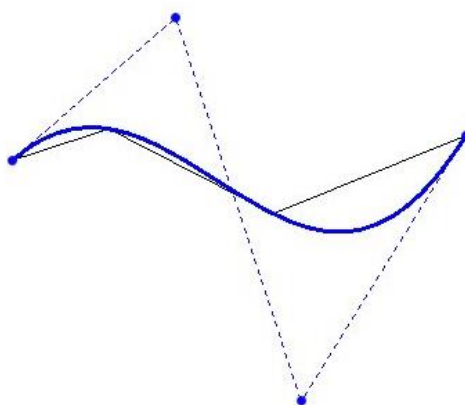
Ve formátu CAD je již možné modely upravovat či vytvářet výkresovou dokumentaci. CAD je zároveň vhodnější digitální formát výrobku pro export do CAM programu (např. pro 3D tisk, obrábění atd.) a následnou realizaci výroby. [1] [6] [5]

Při přesném RE je parametrický model součástí téměř nutností, k jeho vytvoření slouží dvě metody modelování:

- Detekce geometrických tvarů z polygonové sítě (např. rovina, koule, kužel, válec atd.)
- Využití geometrického modelování NURBS (Non-uniform rational B spline)

Při detekci geometrických tvarů z polygonové sítě dochází k převodu naskenovaného povrchu (mraku bodů) na základní geometrické tvary. Příkladem může být nahrazení trojúhelníkové sítě díry válcem. Tuto funkci umožňuje naprostá většina CAD softwarů (Inventor, Solidworks, PTC Creo). Tyto SW jsou zároveň schopny samy detekovat jednotlivé povrchy a navrhnout uživateli vhodnou parametrizaci. Daná plocha je poté definována matematickým předpisem. [7] [8]

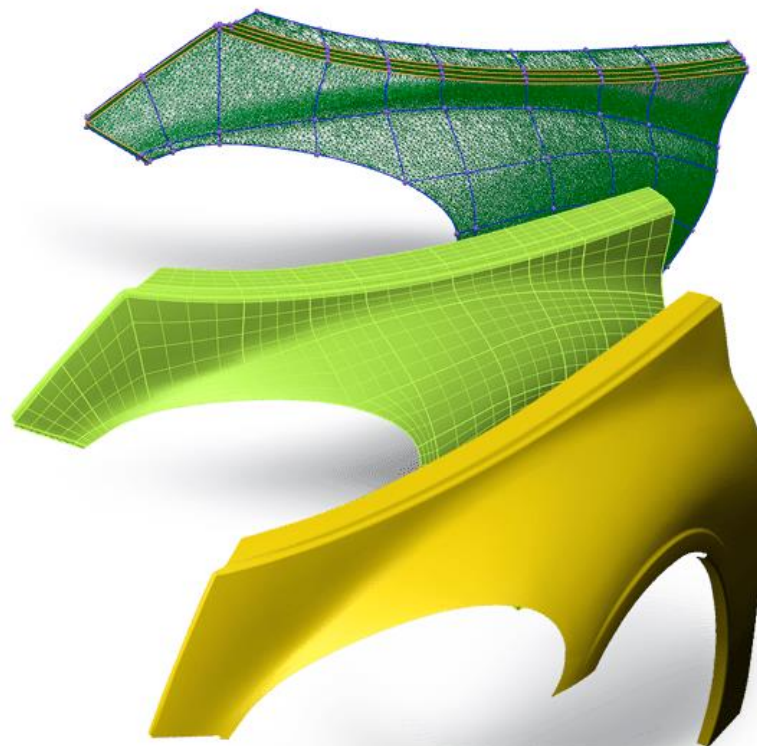
Při parametrizaci geometricky složitějších tvarů, či obecně ploch, které nejsme schopni nahradit základními matematickými objekty, se využívá metoda geometrického modelování NURBS. Tato metoda je založena na publikaci z poloviny minulého století, kdy Francouz Pierre Bézier, který pracoval jako inženýr ve společnosti Renault, přišel s křivkou-„spline“, která je reprezentována řídícími body na křivce (obr. 4). Pomocí této křivky bylo možné přesně reprezentovat volné tvary jako např. hrany karoserie automobilu, dnes je tato křivka označována jako Bézierova křivka nebo B spline.



Obrázek 4: Bézierova křivka – B spline [34]

Nonuniform rational B-spline (NURBS plochy) jsou zobecněním Bézierovy křivky. Jedná se o matematické reprezentace 3D geometrie schopné popsat jakýkoliv tvar. NURBS je metoda založena na definování hraničních křivek a následné aproximaci povrchu. Plocha je po aproximaci, na rozdíl od trojúhelníkové sítě, spojitá a přesně matematicky definovaná. NURBS křivku definují kontrolní body s různou vahou, pořadí a uzlové vektory. NURBS povrchy jsou v dnešní době velice rozšířené i v počítačové grafice a mimo jiné jsou základní metodou pro import a export dat do CAD či CAM.

Příklad NURBS plochy a geometrického modelování v SW PolyWorks je zobrazen na obrázku 5. Shora mrak bodů, uprostřed vytvořený „Mesh“ (trojúhelníková síť), dole přesný model plochy.



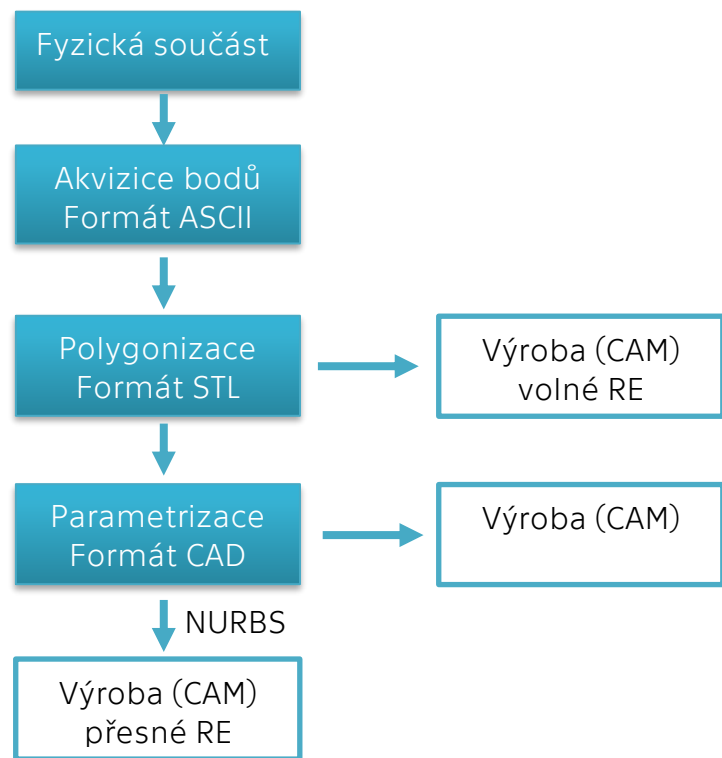
Courtesy of InnovMetric

Obrázek 5: Příklad vizuálního vzhledu mraku bodů, polygonové sítě a parametricky definovaného objektu [35]

Výhodou NURBS ploch je, že se nejedná o funkci jednoho SW, ale o funkci téměř všech SW v oblasti RE, a tudíž zde existuje možnost přesouvat model mezi různými programy modelování. Parametrický model výrobku nám

zároveň umožní opravu chyb modelu. Softwary umožňující práci s NURBS plochami jsou např. Rhino, Blender, Geomagic, Zeiss reverse engineering, GOM Inspect či PTC Creo. [1] [7] [8]

Schéma postupu RE je zobrazeno níže:



2 Metody digitalizace

2.1 Zisk digitálního modelu součásti

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, digitalizace součásti je proces, při kterém je fyzická součást převedena (nasnímána) do podoby virtuálních dat. Není podmínkou, že pro vytvoření digitálního modelu (mraku bodů) je vždy potřeba skenovat celou součást. Při RE u rotačních součástí nám například stačí digitalizovat pouze opakující se profil součásti. Některé softwary, ve kterých se dále digitalizovaná součást zpracovává, vyžadují pouze mrak nasnímaných bodů, další poté pracují s trojúhelníkovou sítí. Existuje zde i možnost digitalizace založená na exportu křivek v částečných řezech, to se využívá především u tvarově jednoduchých součástí, u kterých nám stačí přesné změření pouze několika segmentů. Obecně lze snímací metody rozdělit na dotykové a bezdotykové. Jednotlivé metody se však liší i svou přesností, cenou potřebného vybavení a možnostmi povrchového či podpovrchového snímání. Digitalizace se kromě potřeb RE využívá i při povrchové kontrole dílu či pro rapid prototyping. Metody využívané v RE kopírují metody pro metrologii (obecně stejný princip naměření součásti, rozdílem je následná práce s daty). [1] [9]

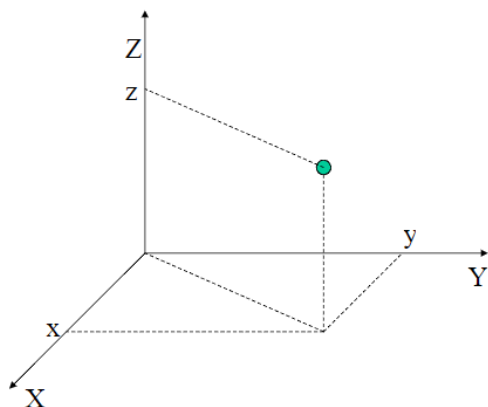
2.2 Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí stroje (dále CMM z anglického Coordinate Measuring Machine) využívají pro digitalizaci bodů z fyzické součásti tzv. snímací systémy. Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly metody digitalizace lze rozdělit na metody dotykové a bezdotykové. U dotykových metod je virtuální bod nasnímán pomocí dotyku sondy snímacího systému s povrchem fyzické součásti. Existují však i metody, při kterých není přímý kontakt snímacího systému s fyzickou součástí nutný, v tom případě se jedná o bezdotykovou metodu digitalizace.

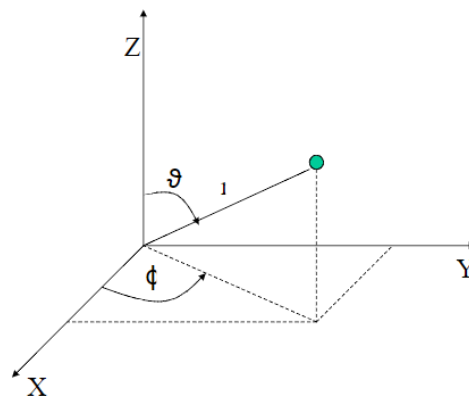
2.2.1 Snímací systémy a uspořádání CMM

Snímací systémy CMM jsou, jak již bylo zmíněno, zařízení, pomocí kterých převádíme dané fyzické elementy do digitální podoby (CMM je při měření propojeno s příslušným SW, ve kterém můžeme v reálném čase sledovat nasnímané body). Stavba snímacího systému je závislá na typu uspořádání CMM. Obecně rozlišujeme dva typy uspořádání a to:

- Kartézsky uspořádané CMM – využívá kartézský souřadný systém (na obr. 6), body v tomto systému jsou určeny prostorovými souřadnicemi x , y , z . V tomto souřadném systému je zvolen počátek, od kterého software určuje polohu snímače v každé ose (s mikrometrovou přesností).
- Nekartézsky uspořádané CMM – využívá sférický souřadný systém (obr. 7), poloha bodu je určena radiusvektorem a dvěma úhly. Radiusvektor představuje vzdálenost bodu od počátku souřadného systému. [10]



Obrázek 6: Kartézský souřadný systém [36]

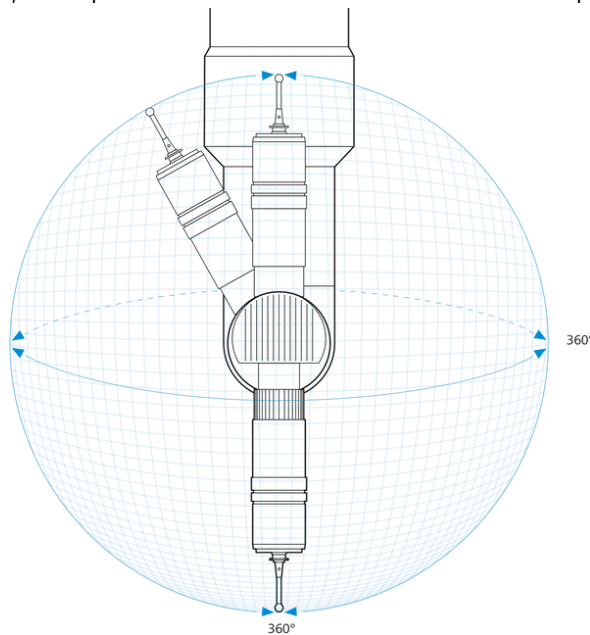


Obrázek 7: Sférický souřadný systém [36]

V praktické části této práce byl pro digitalizaci dílu použit Kartézsky uspořádané CMM Mostového typu, existují však další typy využívající kartézské uspořádání jako např. Výložníkový typ vhodný například jako kontrolní zařízení přímo ve výrobě, portálový typ vhodný pro měření objemných konstrukcí (díky velkému rozsahu pracovního prostoru) či stojanový typ. [11] [12]

Mostový typ

Typický mostový typ CMM umožňuje pohyb sondy podél tří, navzájem kolmých os. V každé ose se nachází senzor, který určuje polohu sondy snímače. V tomto uspořádání se mezi CMM a snímačem bodů nachází tzv. hlava umístěná na konci pinoly (část stroje určující pohyb v ose Z). U moderních zařízení je možné umístit otočnou hlavu, která nám umožní provést snímání ve více úhlech a polohách. Otočná hlava na obr.8 umožňuje natáčení s krokem 2,5 stupně a může snímat až ve 20 736 polohách. [13] [14]



Obrázek 8: Otočná hlava stroje Zeiss Prismo [15]

U kontaktního snímače rozdělujeme bodové či skenovací měření, pro bezkontaktní snímače získáváme třetí měřenou souřadnici fyzikálními metodami (viz dále). Pohyb ve zbývajících dvou osách umožňuje mostová

konstrukce zachycená na granitové desce a pojezdový portál, pohybující se po mostové konstrukci. Mostový typ je zobrazen na obr. 9.



Obrázek 9: Mostový typ kartézského souřadnicového měřicího stroje [15]

Příkladem nekartézsky uspořádaného CMM jsou měřící ramena (někdy také kloubová ramena), jejich největší výhodou je vysoká mobilita a dobrá možnost automatizace. Hojně se využívají pro kontrolu kvality a inspekci.

3D měřící ramena

Měřící ramena ve sférickém souřadném systému zaznamenávají polohu sondy v prostoru a odesílají data do softwaru. Měřící rameno je konstrukčně podobné lidské ruce, skládá z několika rotačních kloubů a držáku na sondu umístěného za posledním kloubem. Do držáku je možné implementovat sondu jak pro dotykové, tak bezdotykové měření (možnost využití laserového skenování a optických metod). Hlavní nevýhodou 3D měřicího ramena oproti kartézským CMM je nižší přesnost měření. Je zároveň nutné si uvědomit, že s každým dalším kloubem ramene se přesnost získaných dat snižuje. V praxi se využívají šestiosá či sedmiosá ramena (sedmiosá ramena

mají své využití především v bezdotykovém měření). Příklad měřicího ramena je na obr. 10. [15]



Obrázek 10: Měřicí rameno využívající sférický souřadný systém [37]

2.2.1.1 Dotykové snímací systémy

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, snímací systém je uchycen do tzv. nosiče. Pro 3D měřicí ramena je nosič umístěn za posledním kloubem. U stacionárních CMM pak umísťujeme snímací systém do tzv. hlavy. Samotné snímače, které jsou základem snímacího systému můžeme rozdělit dle principu fungování na dotykové a bezdotykové (kontaktní a bezkontaktní). Princip dotykových snímačů je založen na mechanickém dotyku mezi snímačem a měřenou (skenovanou) součástí. [15] [16]

Celý proces snímání probíhá dle předem připraveného programu (v praktické části této práce byl použit program Calypso 2017 a Calypso 2020) či pomocí manuální definice elementů, viz. praktická část této práce. Před snímáním samotného bodu součásti dojde ke stanovení souřadného systému měření a kodjezdu snímače do předem stanovené bezpečné polohy. Poté se snímač plynule přesune před měřený bod a dotykem mezi kuličkou snímače a povrchem součásti dojde k softwarovému odečtu polohy snímače, čímž se získá měřený bod. Jelikož se skenované součásti dotýká obvod sondy, určuje se střed a poloměr sondy (nejčastěji rubínové kuličky umístěné na dřívku). Z toho důvodu je potřeba použít materiál o vhodných

vlastnostech. Materiál kuličky musí mít dostatečnou tvrdost, hladký povrch, vysokou pevnost v tlaku, a především vysokou odolnost proti mechanickému opotřebení. V naprosté většině aplikací je využívána syntetická rubínová kulička (jedná se o oxid hlinitý s 99% čistotou). Dalším materiálem, který je možné použít pro materiál kličky je nitrid křemíku, jelikož rubín může podléhat adheznímu otěru při skenování hliníkových dílců. Využít lze i oxid zirkoničitý. [16] [17]

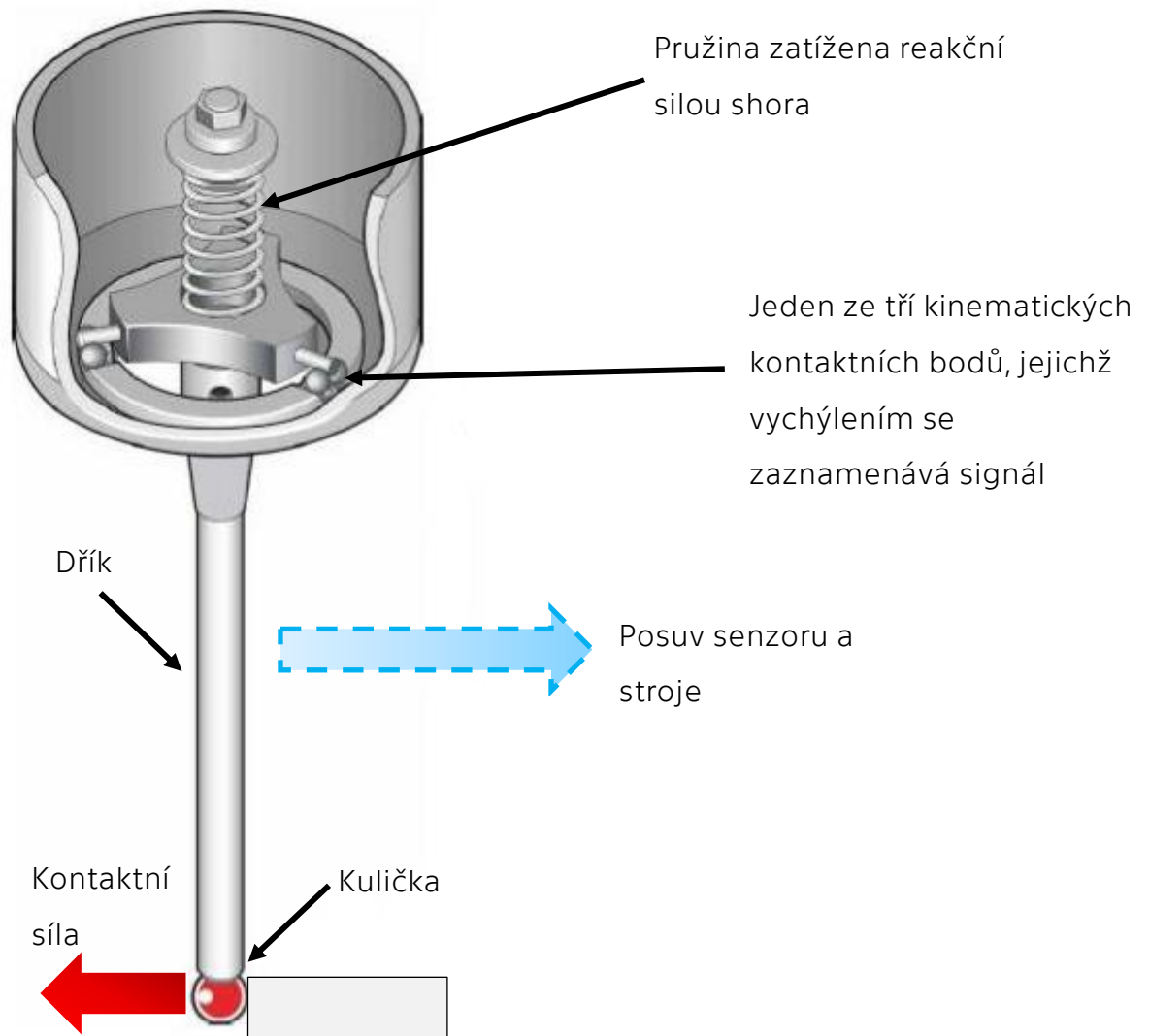
Tabulka 1: Přehled materiálů kuličky [18]

Materiál kuličky	Rubín 	Nitrid křemíku 	Oxid zirkoničitý 	Diamant 
Použití	Vše	Hliníkové povrchy	Agresivní aplikace u litin	Ultra pevné keramické povrchy, hliník
Výhody	Přesný tvar, univerzálnost, hladký povrch	Odolnost proti opotřebení, měření Al dílců	Pevný, vynikající vlastnosti povrchu	Vynikající mechanické vlastnosti a vlastnosti povrchu
Nevýhody	Adhezní opotřebení při měření Al a litin	Nevhodný pro měření oceli	Vhodný pouze pro agresivní aplikace	Velice drahý materiál

Po určení přesných rozměrů kuličky sondy dojde k matematickému posunu nasnímaného bodu právě o poloměr kuličky. Směr posunu je určen automaticky vektorem snímaného elementu, tedy vždy kolmo ke snímané ploše. [16] [17]

Kinematická sonda

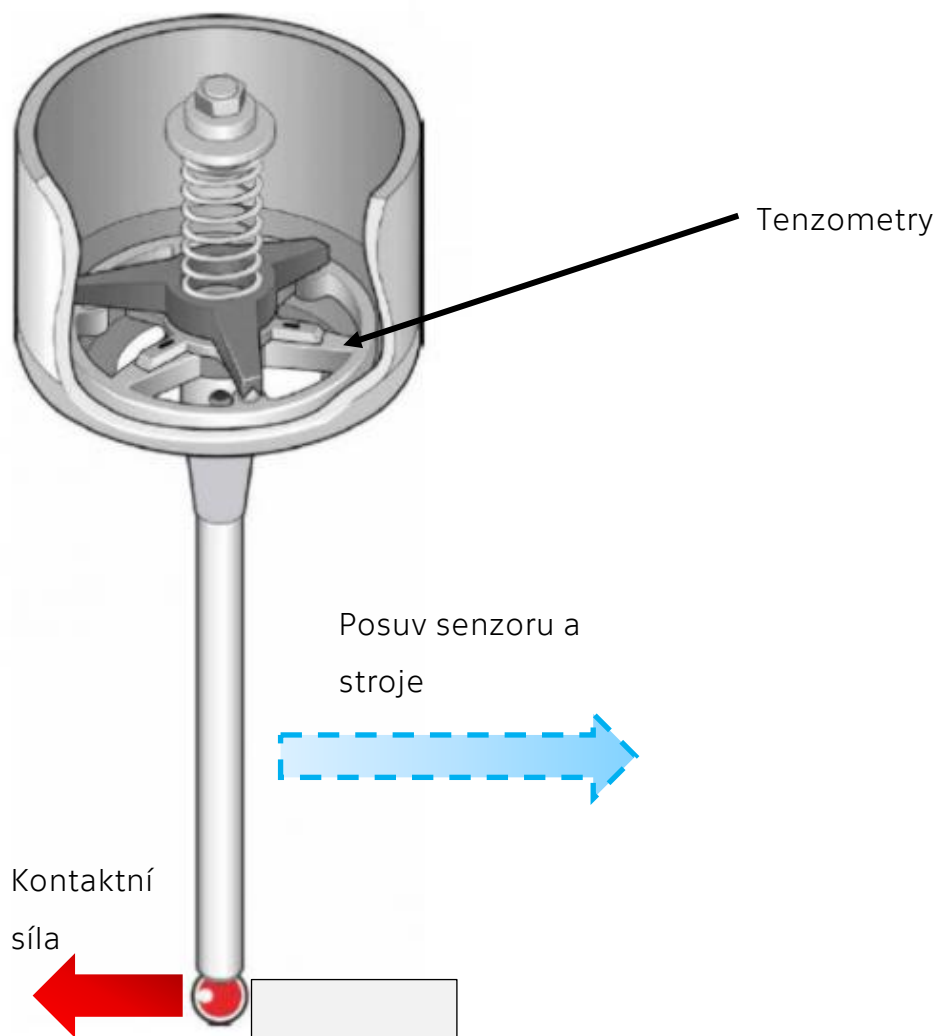
Kinematická sonda (anglicky kinematic switching probe) se skládá ze tří kinematických kontaktních bodů a snímacího systému v podobě dříku a kuličky. K vyslání signálu systému CMM a k zaznamenání naměřeného bodu dojde dotykem kuličky s měřeným objektem. Při dotyku dochází ke vzniku kontaktní síly, jejímž vlivem se rozpojí jeden z kinematických kontaktních bodů, což zapříčiní přenos signálu. Dále dochází k matematickému přepočtu středu kuličky. Po uvolnění kontaktní síly (odjetí snímače z kontaktní polohy) se kinematický bod opět spojí a celý proces se může opakovat. (kinematická sonda je zobrazena na obr. 11) [18]



Obrázek 11: Schéma funkce kinematické sondy [38]

Tenzometrická sonda

Tenzometrická sonda (anglicky strain gauge) funguje na principu tenzometru, tedy převádí mechanickou deformaci na elektrický signál (nejčastěji změnu elektrického odporu). Dotykem sondy s povrchem součásti je vyvinuta kontaktní síla, konstrukce snímače působí na tenzometr a ten vyšle elektrický signál systému CMM. [18] Tenzometrická sonda je zobrazena na obr. 12.



Obrázek 12: Popis funkce tenzometrické sondy [38]

Výhodou tenzometrických sond oproti kinematickým je lepší opakovatelnost, přesnost (vlivem eliminace prohnutí snímače u kinematické sondy) a také lepší životnost.

Velikou výhodou dotykových spínacích senzorů (kinematická, tenzometrická sonda) jsou nižší pořizovací náklady, jednoduchost a univerzálnost. Firmy zaměřující se na oblast CMM dnes nabízejí dotekové spínací sondy s různými spínacími silami pro flexibilní měření a zmiňují i vyšší opakovatelnost a robustnost. [18]

Pro měření složitějších tvarů, či při potřebě změření velkého množství bodů jsou však dotykové spínací systémy nedostatečné a využívá se skenovacích snímacích systémů, jejichž hlavní výhodou je rychlejší snímání bodů a opakovatelnost měření.

Dotykové skenovací senzory

Skenovací senzory jsou schopné skenovat několik set bodů každou sekundu, což je obrovská výhoda oproti spínacím senzorům, zároveň mohou být použity jako spínací senzory pro skenování každého bodu zvlášť.



Obrázek 13: Skenovací sonda HP-S-X5 [17]

Při skenování se hrot sondy dostane do kontaktu s měřeným objektem a poté se pohybuje podél daného povrchu, přičemž celou dobu sbírá data. Skenování vyžaduje odlišný přístup ke konstrukci snímače, řízení stroje a zpracování dat, než tomu bylo u spínacích senzorů. Po celou dobu měření je potřeba udržet výchylku sondy v měřicím rozsahu sondy, rychlost snímání je třeba měnit podle míry zakřivení povrchu (na rovnějších površích lze

skenovat rychleji), zároveň je po skenování potřeba rozlišit (vyfiltrovat) použitelná data o povrchu od dat nepřesných (pro potřeby RE to není vždy nutné). Díky vysoké přesnosti je možné skenovací senzory používat i pro měření malých tolerancí a složitých geometrií. Firmy v dnešní době nabízejí velkou škálu dotykových skenovacích senzorů optimalizovanou např. pro určitý rozsah délek. Existují také sondy pro měření špatně přístupných ploch či flexibilní zásobníky umožňující rychlou a precizní výměnu senzorů. Příklad skenovacího senzoru od firmy Hexagon Metrology je na obr. 13. [10] [16]

2.2.1.2 Bezdotykové snímací systémy

Bezdotykové snímací systémy, jak je již z názvu patrné, nevyžadují přímý kontakt senzoru se snímanou součástí. Mezi hlavní zástupce bezkontaktních systémů patří:

- Kamerové systémy
- Triangulační senzory
- Výpočetní tomografie

Absence dotyku při snímání má za následek logické snížení přesnosti měření, výhodou je však vysoká produktivita. Dotykové skenovací sondy pracují s produktivitou stovek až nízkých jednotek tisíců nasnímaných bodů za sekundu. Bezdotykové systémy pak přes 200 tisíc bodů za sekundu. [1]

Bezdotykové metody skenování jsou založeny na snímání velkého množství bodů v jeden okamžik (lze si představit jako fotografický snímek). Snímání objektu bývá prováděno z několika úhlů (např. u optických skenerů) nebo k němu dochází při změně scény (umístění součásti na otočný stůl). Ziskem jednotlivých skenů dojde k opakovanému zisku 2D informace o 3D objektu.

Bezkontaktní metody snímání lze dále rozdělit na pasivní a aktivní. U pasivních metod nedochází k emitaci energie. To znamená, že není použit žádný zdroj vysílající energii směrem k povrchu součásti (například zvukové vlnění u ultrazvuku, světelný zdroj u některých optických metod). Energie je zde pouze přijímána. Hlavním zástupcem pasivních metod je stereovidění využívající pasivní triangulace. [1] [19] [20]

U aktivních metod skenování na rozdíl od pasivních dochází k emitaci určitého druhu energie (elektromagnetického záření, rentgenového záření u CT). Princip metody spočívá v nasměrování paprsku energie na snímanou součást a jeho odrazu zpět do snímače. V některých případech však odraz není žádoucí a dochází k pozorování promítnutého obrazu na součásti. [19]

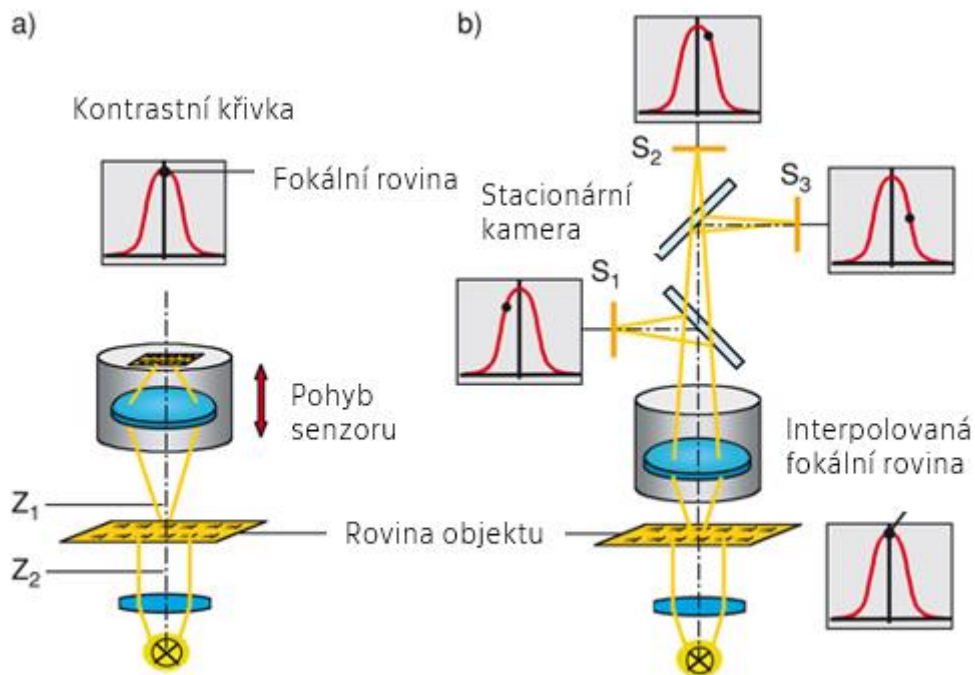
Kamerové snímací systémy

Alternativou, či velice často doplněním dotykových snímacích senzorů, jsou kamerové snímací systémy. Kamerové snímací systémy fungují na principu precizního nasvícení daného objektu pomocí LED diod, které v kombinaci s vhodnou optikou umožňují optimalizovat kontrast 2D snímku. Tento obraz je zaznamenán kamerovým snímačem (CCD čipem) a dále je pomocí algoritmů jednotky zpracování obrazu převeden na digitalizovaný model. Paprsky LED diod dopadají na povrch součásti pod různými úhly, což umožňuje omezit rušivé elementy okolního prostředí a zpřesnit detekci hran. Právě detekce hran, která je z velké části určena rozlišením a kontrastem, je základním parametrem určujícím přesnost snímání v osách x, y. [20]

U bezkontaktního snímání nejsme schopni jednoduše (spojitě) určit konturu mezi měřeným prvkem a pozadím. Rozlišení kamerového snímače je klíčové pro konečnou velikost pixelu a tím pádem přesnost měření. Kontrast pak pro schopnost správně odlišit jednotlivé pixely. V prvním kroku je tedy originální obraz převeden kamerovým snímačem na digitální rastrový (maticový) obraz skládající se z pixelů, ten je poté pomocí algoritmů převeden na pixelovou konturu. Metody pro detekci kontur ve většině případů hledají extrémy první derivace intenzity přechodů (lokální maxima) nebo zrušení Laplaciánského

operátoru či zrušení druhé derivace. Matematický popis detekce kontur by vydal na samostatnou kapitolu, téma detekce kontur však není předmětem této práce. Obecně lze říci, že k detekci kontury dochází v závislosti na změně gradientu intenzity světla v daném bodě. Po zisku kontury dochází k dalším korekcím a výpočtům obrazu. Z výše uvedeného je zřejmé, že detekce hran může být velkým zdrojem nepřesnosti bezdotykových metod měření. Přesto se u kamerových snímacích systémů pohybujeme v osách X,Y v tolerancích jednotek až desítek mikronů. [21]

Další problematikou kamerových snímacích systémů je přesnost měření v ose Z. Poloha objektu v této ose se určuje pomocí ostrosti obrazu. Při pohybu snímače podél optické osy vzniká ostrý obraz pouze v jediné poloze, v ostatních polohách je obraz rozostřený a vznikají rozmazané snímky. Ostrost obrazu můžeme softwarově rozpoznat pomocí kontrastu. Kontrast dosahuje maximální hodnoty v bodě, kde se ohnisková rovina shoduje s rovinou objektu, s podmínkou, že se snímač pohybuje podél optické osy v rozsahu obsahujícím rovinu objektu. Z polohy snímače lze poté určit polohu bodu na ploše. Hlavním parametrem ovlivňující přesnost výše zmíněného postupu je hloubka ostrosti, která je závislá na rozlišení a numerické apertuře objektivu. Postup je zobrazen na obr. 14 a). [1] [22]



Obrázek 14: Vlevo princip určování polohy Z dle hloubky ostrosti, vpravo autofocus [23]

Další používanou alternativou k tomuto procesu výpočtu třetí souřadnice je použití tzv. Autofocusu (obr 14 b). Při určování polohy v ose Z pomocí křivky ostrosti je třeba projít určitý rozsah podél optické osy, což vede ke snížení rychlosti měření bodů, což je v přímém rozporu s extrémně vysokou rychlostí měření u bezkontaktních snímačů. Technika autofocus, neboli automatické zaostřování využívá tři trvale umístěné snímací senzory na různých místech v dráze zobrazovacího paprsku, který spojuje do kamery. Pomocí této metody lze najednou určit tři body kontrastní křivky. Výpočet kontrastní křivky je proveden pomocí těchto tří bodů a známých parametrů samotné křivky. Rychlost této techniky je limitována pouze frekvencí jednotky pro zpracování obrazu, existují zde však limity pracovní vzdálenosti. Přesnost skenování v ose Z je u kamerového systému Zoom Lens ZEISS Discovery V12 (obr.15) udávána 0,01 mm. Přesnost měření v ose Z lze zvětšit dalším senzorem (konfokální snímač), což však výrazně zvyšuje náklady na použité stroje. [14] [22]

Příkladem komplexního kamerového systému může být systém použitý na multisenzorovém stroji O-inspect od firmy Zeiss. Zobrazený na obr.15.



Obrázek 15: Kamerový systém Zoom Lens ZEISS Discovery V12 [1]

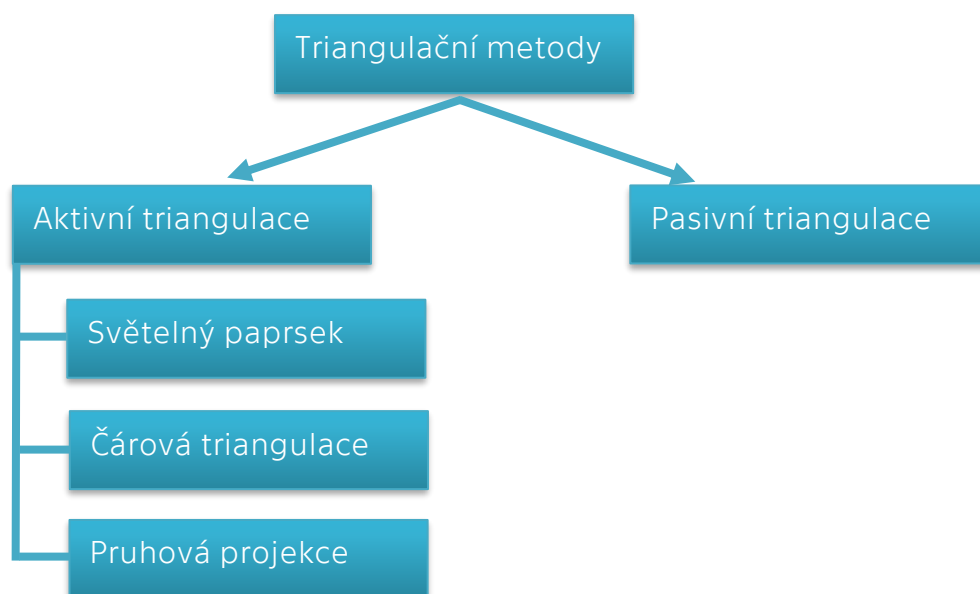
Triangulační senzory

Triangulační senzory jsou v oboru reverzního inženýrství zřejmě nejrozšířenější metodou akvizice bodů. Triangulaci můžeme rozdělit na aktivní a pasivní. U aktivní triangulace je přítomen zdroj záření (nejčastěji laser), který směřuje na povrch zkoušené součásti a promítá určitou geometrii. S promítáním geometrie na povrch součásti samozřejmě souvisí určitá nepřesnost. Na povrch součásti tudíž musí být možné dobře promítnout danou geometrii, velice nežádoucí jsou povrchy s vysokou odrazivostí, či transparentní povrchy. Naopak vhodné jsou matné povrchy. Z toho důvodu se v praxi často přistupuje k použití zmatňujících sprejů. [10] [23]

Podle zdroje záření a promítané geometrie rozdělujeme dále aktivní triangulaci na:

- 1D triangulace – ze zdroje je emitován jeden světelný paprsek (projekcí je bod)
- 2D triangulace – ze zdroje je štěrbinou emitován světelný pruh, metoda bývá nazývána jako čárová triangulace
- 3D triangulace – ze zdroje je emitována strukturovaná síť, metoda známá pod názvem pruhová projekce

U pasivní triangulace naopak žádný zdroj záření přítomen není, tudíž neznáme přesnou orientaci mezi měřeným objektem a snímačem. Z toho důvodu využíváme více snímačů (nejčastěji CCD čipy). [1] [20]

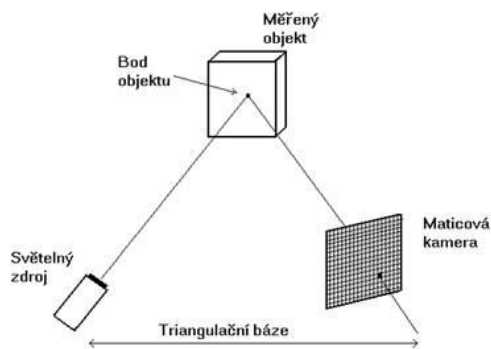


Aktivní triangulace

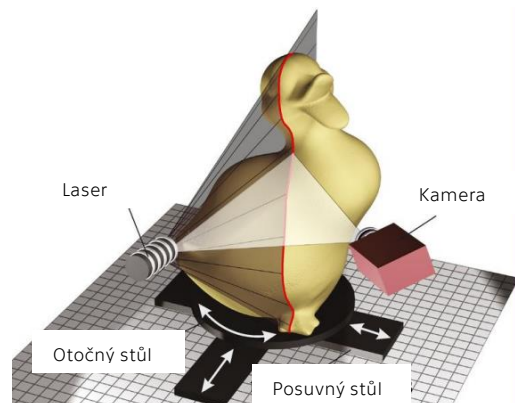
Principem aktivní triangulace je tedy promítání určité geometrie na povrch součásti. K promítnutí slouží projektor neboli laserový zdroj. Tento zdroj je nejčastěji umístěn v jednom zařízení s CCD snímačem. Zdroj, snímač a povrch součásti tvoří triangulační trojúhelník. Mezi zdrojem a snímačem je přesně definovaná vzdálenost – triangulační báze neboli základna a úhel svíraný mezi triangulační bází a paprskem zdroje je neměnný. Z pozice snímače je pozorován promítnutý bod (u 1D triangulace) na povrchu

součástí. Z proměnné polohy bodu lze určit úhel mezi bází a přímkou spojující bod a snímač. Tato informace v kombinaci se znalostí parametrů snímače postačuje k určení vzdálenosti v ose Z, nutnou k ucelení informace o obraze z CCD snímače. U 2D a 3D triangulace je princip obdobný, s tím rozdílem, že není sledována poloha bodu, ale tvarová deformace linie, či většího množství linií potažmo sítě. [10] [20]

Jak již bylo zmíněno, metoda není vhodná pro povrchy s dobrou odrazivostí či pro transparentní povrchy. Z toho logicky vyplývá, že nechceme, aby se laserový paprsek odrazil do kamery, ale aby byl kvalitně promítnut na povrch, případně aby se rozptýlil na povrchu. Tímto se triangulace odlišuje například od laser interferometrie, či od metod měření doby letu paprsku. Schéma aktivní 1D triangulace je zobrazena na obr. 16, 2D triangulace na obr. 17. [24]



Obrázek 16: 1D triangulace [25]



Obrázek 17: 2D triangulace [20]

1D a 2D triangulace má své využití pro velké pracovní vzdálenosti, např. v architektuře, ale i v zábavním průmyslu. Laser scanner fungující na principu triangulace je na obr. 18. Velice časté je použití laser scannerů na robotickém rameni, nicméně cena těchto zařízení s robotickým ramenem se pohybuje v řádu milionů Kč. [1]



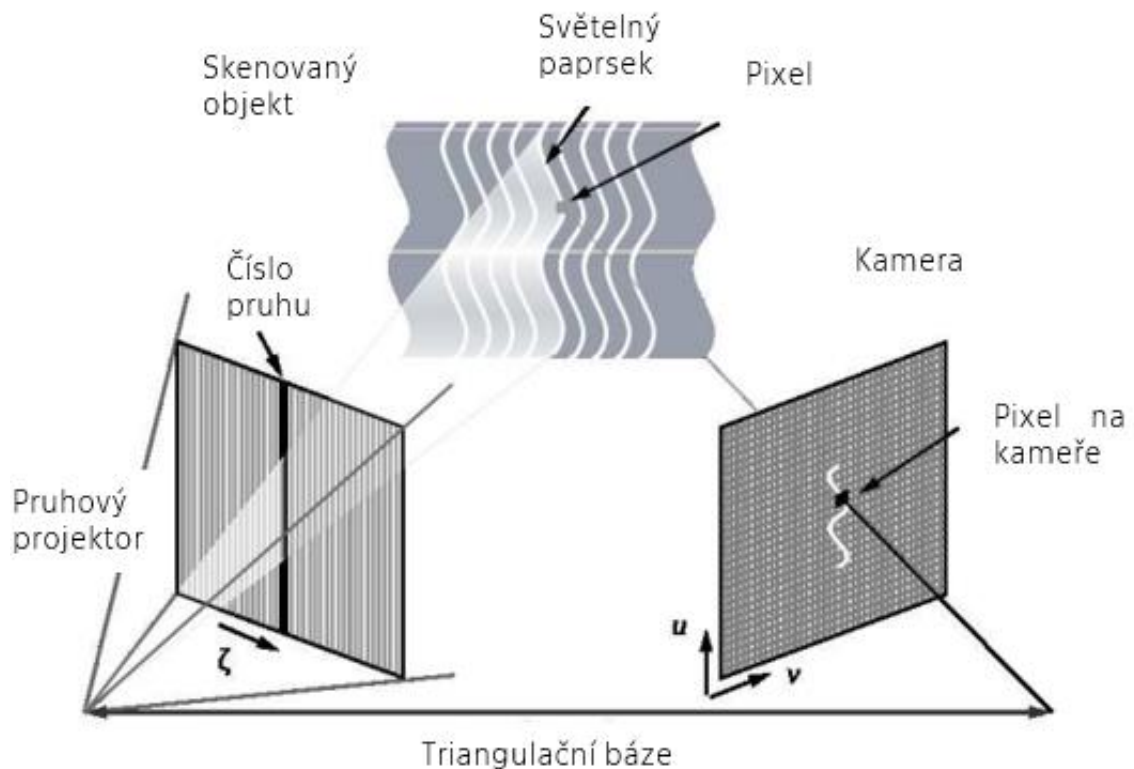
Obrázek 18: 3D Scanner využívající metody aktivní triangulace [39]

Pruhová projekce

3D triangulace (neboli metoda pruhové projekce) je oproti 1D či 2D efektivnější, jelikož dochází ke skenování celého povrchu. Tato vlastnost pruhové projekce může při skenování ušetřit značné množství času, během procesu akvizice bodů dochází k nasnímání až milionů bodů s přesností setin milimetru (v odborné literatuře je uváděna i přesnost mikronů). Často je tato metoda označována jako strukturované světlo. [25]

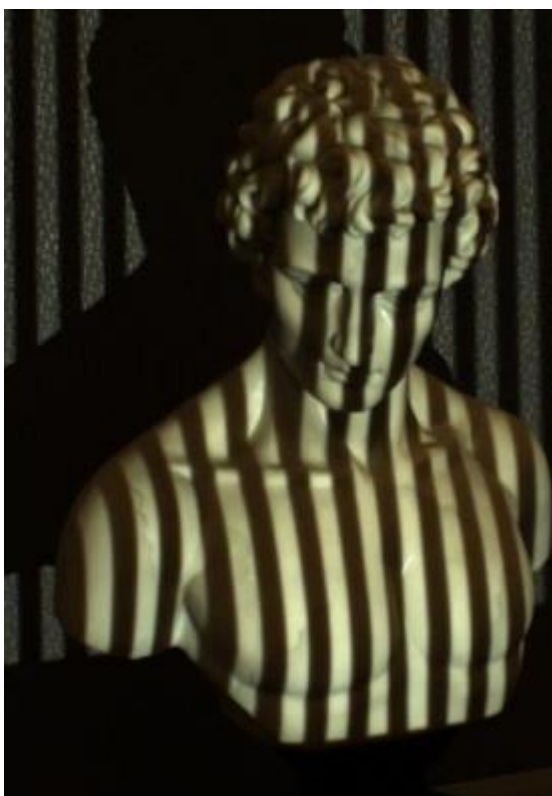
Princip metody je obdobný jako u bodové či liniové triangulace, u pruhové projekce můžeme promítnout na povrch úzké pásy libovolných tvarů (nejčastěji se však používají rovnoběžné pruhy), tvar povrchu objektu rovnoběžné linie světla zakřivuje, viz. promítnutí pruhů na obr. 19. Kamera poté sleduje deformaci jednotlivých linií a vytváří 3D rekonstrukci objektu. Pro mnoho aplikací je vhodné použití dvou kamer umístěných na opačných stranách projektoru. Schéma pruhové projekce je zobrazeno na obr. 19.

Generování pruhových vzorů vzniká, buďto laserovou interferencí dvou širokých, rovinných laserových paprsků, jejímž výsledkem jsou pravidelné, stejně vzdálené linie, nebo metodou projekce nekoherentního světla, kde jsou vzory generovány na displeji uvnitř projektoru (obvykle LCD displej).

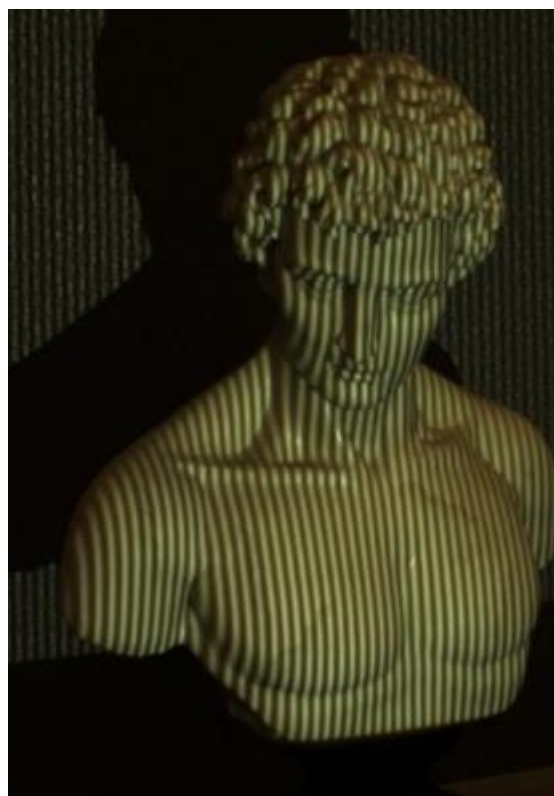


Obrázek 19: Schéma pruhové projekce [26]

Jelikož snímačem u metod fungujících na principu triangulačních senzorů je kamera, pak je logickým vyústěním zvýšený vliv okolního prostředí na přesnost metody. V první řadě je potřeba obstarat dobré světelné podmínky (světelné paprsky na povrchu musí být co nejlépe viditelné), poté kvalitně promítnout strukturované světlo (strukturovanou síť). Pro optimální funkčnost systému je potřeba povrch součásti očistit a zmatnit. Zároveň je před měřením potřeba skener kalibrovat. Výhodou pruhové projekce je rychlost skenování a relativně nízké náklady na nákup zařízení i na provoz. Metoda je jakýmsi kompromisem mezi přesností a rychlostí získaných dat, v kombinaci s nižšími náklady je pak logicky pruhová projekce jedna z nejpoužívanějších metod v RE, ale i v digitalizaci obecně. Metoda velice dobře zaznamenává detaily na krátkou vzdálenost. Příklad využití pruhové projekce v digitalizaci umění na obr. 20 a 21. [23] [25]



Obrázek 20: Projekce pruhů na sochu za účelem archivace umění [20]



Obrázek 21: Využití pruhové projekce [20]

Další příklady využití v oboru strojírenství jsou přesné měření materiálů a nástrojů, či měření objemu. Zajímavostí je první komerční využití pruhové projekce v kameře pro herní konzoli Microsoft Kinect, zaznamenávající pohyb hráče a převádějící ho na pohyb virtuální postavy ve videohře. [25]

Pasivní triangulace

Pasivní triangulace nevyužívá žádný vlastní zdroj záření, tím pádem není k dispozici triangulační báze – známá vzdálenost mezi zdrojem a snímačem. Aby bylo možné tuto metodu využít pro digitalizaci prostorových objektů je třeba více snímacích zařízení.

Pasivní triangulaci můžeme dle principu fungování rozdělit na tři kategorie:

- Použití více snímačů s přesně definovanou vzájemnou orientací
- Využití funkce samokalibrace u dvou a více kamer
- Využití funkce samokalibrace u jedné kamery se zachycením obrazu ve více polohách

Funkce samokalibrace umožňuje odečíst polohu kamer či kamery přímo z naměřených dat, pro ověření samokalibrace se využívá kalibrační předmět o známých rozměrech, který je skenován společně s digitalizovanou součástí. Naměřené hodnoty referenčního předmětu poté slouží pro určení hodnot součástí. Metoda stereovidění, která je nejčastěji používanou metodou pasivní triangulace používá dvojici CCD čipů, pomocí kterých zaznamenává dva obrazy. Ztracený třetí rozměr poté dopočítává pomocí úhlu snímaného sdruženými paprsky (úhlová paralaxa). Jedná se o princip podobný odhadu vzdálenosti u lidského oka. [1][26]

Další metodou skenování je metoda výpočetní tomografie (CT), tuto metodu však nelze provést na souřadnicových měřicích strojích či měřicích ramenech, tudíž je předmětem samostatné kapitoly.

2.2.2 Přesnost a využití digitalizace pomocí CMM

Přesnost skenování pomocí CMM závisí na typu použité technologie, kterou stroj využívá ke zjištění polohy bodů. Dále je ovlivněna okolními podmínkami, především pak vlhkostí a teplotou, materiálem, tvarem a čistotou povrchu měřeného dílu. U bezkontaktních metod je vliv okolních podmínek výraznější než u kontaktních, navíc se přidávají další vlivy jako např. barva povrchu. Přesnost v rámci celého procesu RE je dále ovlivněna nedokonalostmi naskenovaného mraku bodů a samotnými procesy polygonizace a parametrizace.

Počet nasnímaných bodů neznamena vyšší přesnost extrahovaného modelu. U dotykového měření se počet bodů mění i s křivostí a tvarem povrchu. U rovinných povrchů je možné nasnímat méně bodů a poté je při polygonizaci proložit rovinou, zatímco u např. rádiusů potřebujeme větší

počet bodů pro popis tvaru dílu. Samotná přesnost je však definována především zvolenou skenovací metodou.

Dotykové snímací metody jsou přesnější než bezdotykové, ale nedosahuje takové produktivity. Dotykovými metodami se dá skenovat téměř vše, ale z hlediska úspory času je vhodné dotykové skenování používat na přesně tolerované rozměry, či na opticky špatně dostupné plochy. Vhodné využití dotykových sond je i v případě, že chceme pro digitalizaci jednoduché součásti (např. hřídel) použít pouze klíčové body, které je posléze možné parametrizovat.

Bezdotykové snímací metody nelze využít pro přesně tolerované rozměry, jejich hlavní využití je pro tvarově složité díly, u kterých není vyžadována vysoká přesnost, dále pro obecné plochy, pro tvorbu prototypů a pro skenování součástí s konstantní výškou v ose Z. Existují i aplikace, ve kterých není vhodné působit silou na měřený objekt, v tomto případě se také hodí využití bezkontaktních metod.

V praxi velice často dochází ke kombinaci dotykových i bezdotykových metod, čímž můžeme spojit největší výhody, a to sice přesnost dotykového měření a rychlost bezdotykového měření.

2.3 Výpočetní tomografie

Výpočetní tomografie (CT – z anglického computed tomography), někdy také označována jako výpočetní tomografie je další metodou vhodnou pro akvizici bodů pro potřeby reverzního inženýrství. Nejvýznamnější využití této metody je v diagnostice v lékařství, nicméně využívá se i pro výzkumné účely při vývoji, okrajově také v oblasti nedestruktivní kontroly výrobku pro slévárenství a automobilový průmysl a mimo jiné i v metrologii např. pro rozměrovou kontrolu, či kontrolu vnitřní struktury.

Výpočetní tomografie patří mezi radiografické metody využívající záření X (rentgenové záření), jiné radiografické metody mohou používat i záření gama. Tato záření pronikají zkoušeným materiálem, přičemž se v závislosti

na tloušťce a hustotě materiálu záření zeslabuje (snižuje se jeho intenzita). Pokud je tedy v materiálu např. dutina, záření v tomto směru ztratí méně na intenzitě. Intenzita dopadajícího záření je poté zaznamenávána na detektoru (odtud možnost použití radiografických metod pro kontrolu vnitřních vad materiálů, či pro použití v lékařství). [26] [27]

2.3.1 Princip

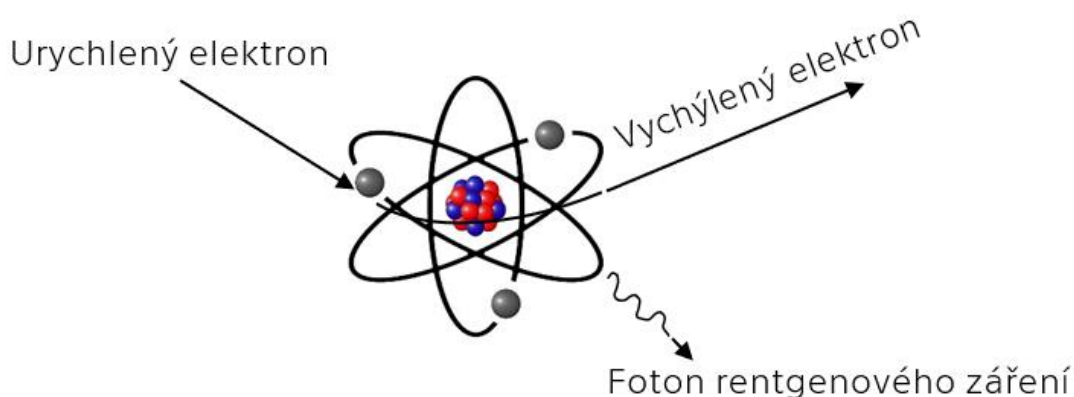
Výpočetní tomografie používá jako zdroj záření rentgenku. Ve strojírenství se nejčastěji používají rentgenky s napětím od 80 do 250 kV, maximální urychlovací napětí u RTG přístrojů je 450 kV. Většího napětí lze dosáhnout použitím urychlovačů, nicméně pro standardní aplikace postačí 130, či 250 kV zdroj. Vysoké napětí slouží k urychlování volných elektronů mezi anodou a katodou rentgenky. Zdrojem volných elektronů je žhavená kovová spirála (nejčastěji wolframová) – katoda. Urychlené, fokusované elektrony pak dopadají na terč (z wolframu, molybdenu, zlata) umístěný na anodě, materiál anody musí mít dobrou tepelnou vodivost (často se využívá měď). Dopadem elektronů na terč anody dochází k přeměně kinetické energie elektronů na teplo, brzdné a charakteristické záření. Celý proces probíhá ve vakuu uvnitř rentgenky tvořené z keramického obalu či ze skla. Při výše zmíněném procesu dochází ke vzniku: [1] [28] [29]

- Teplo – téměř 99 % energie elektronů se změní na teplo, z toho důvodu musí mít materiál katody i anody vysokou teplotu tavení. Terče rentgenek mohou být buďto odrazové, které odrazí záření a umožní tak lepší odvod tepla od anody, či transmisní, ty naopak rentgenové záření propouští, dochází však k většímu zahřívání terče. Výhodou transmisních terčů je, že jsou tenčí a umožňují dosažení vyššího rozlišení (snížením průměru ohniska), nevýhodou pak samotné zahřívání, což limituje možnost použití vyšších napětí. Vzhledem k velikosti tepla na anodě je nutné její intenzivní ochlazování.
- Charakteristické záření – vzniká srážkou s elektronovým obalem atomů terče a pro potřeby výpočetní tomografie je nežádoucí. Při

srážce spotřebuje elektron část své kinetické energie na vyražení elektronu terče a část zbývající energie mu předá. Pokud urychlený elektron už nemá dost energie na vyražení dalšího elektronu z terče, pak se jeho energie přemění převážně na teplo. Jeho místo musí zaujmout elektron z vyšší energetické hladiny, během přechodu mezi hladinami se vyzáří charakteristické záření. Toto záření není určeno urychlujícím napětím, ale materiálem terče a rozdílem mezi jeho energetickými hladinami, z toho důvodu nemá dost vysokou energii pro použití ve výpočetní tomografii, může však vytvářet nežádoucí šum. Spektrum charakteristického záření je čárové.

- Brzdné záření – vzniká zpomalováním (vychýlením) urychlených elektronů pozitivně nabitým jádrem atomu kovového terče. Ztracená kinetická energie elektronu se mění na brzdné záření (energie fotonu). Výsledkem je spojité spektrum, jehož energie závisí na energii urychlených elektronů a na atomovém čísle terče. Vrcholy spektra brzdného záření mohou dosáhnout až k hraniční energii, která je rovněž definovaná urychlujícím napětím. [29] [27]

Schéma vzniku brzdného záření a čárového spektra je zobrazeno na obr. 22:

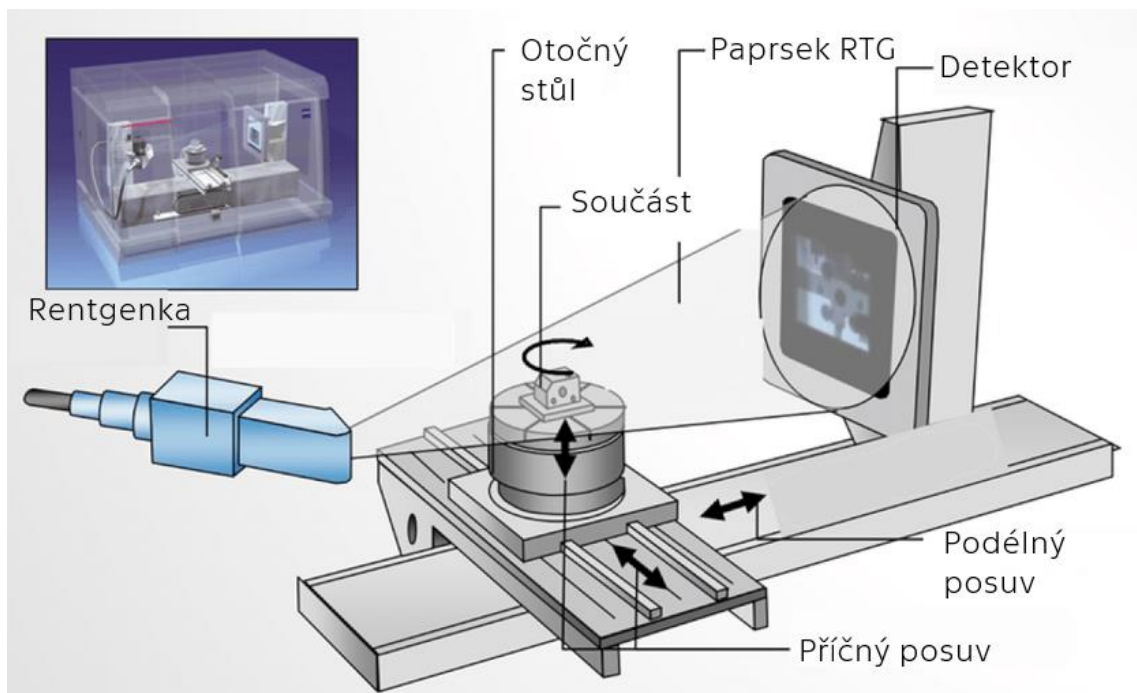


Obrázek 22: Schéma vzniku brzdného záření

Z rentgenky (zdroje) tedy fokusujeme paprsek spojitého RTG spektra směrem k digitálnímu detektoru propojenému k vyhodnocovacímu SW. Na rozdíl od využití v lékařství, u strojírenských aplikací je zdroj stacionární a zkoumaná součást koná rotační pohyb na otočném stole, tak aby ji bylo

možné nasnímat ze všech potřebných úhlů. Součástí je potřeba umístit do optimální vzdálenosti mezi zdroj a detektor, vzhledem k velkému množství dat získanému při výpočetní tomografii je nutné maximálně využít prostor detektoru, nedostatečné využití by mělo negativní vliv na přesnost získaných dat a zbytečně by zvětšovalo velikost výstupních souborů výpočetní tomografie po detekci intenzity dopadajícího záření složí dohromady stovky snímků pořízených během celého procesu a pomocí speciálního SW definuje 3D obraz dané součásti. V praktické části této práce byl pro nastavení optimálních parametrů pro měření využit SW METROTOM OS, použité napětí bylo 200 kV a celkem bylo provedeno 2050 projekcí, dále viz praktická část této práce. [28]

Schéma CT systému je zobrazeno na obr. 23:



Obrázek 23: Schéma průmyslové výpočetní tomografie [40]

Detekce intenzity dopadajícího záření probíhá pomocí již zmíněného detektoru. Digitální detektor u výpočetní tomografie pracuje na principu Flat panelu umožňujícího téměř okamžitý přenos zachyceného obrazu do počítačového SW, což umožňuje pozorování snímků téměř v reálném čase.

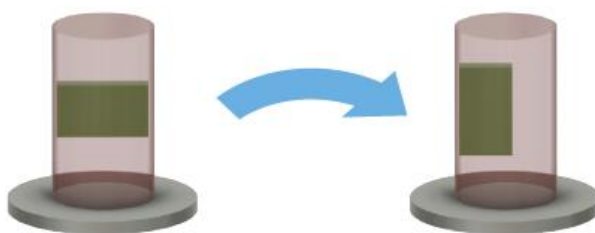
Flat panel se skládá z polovodičových součástek, pomocí kterých převádí intenzitu fotonů radioaktivního záření na elektronový signál, který je zpracováván speciálními čipy a poté převeden na signál digitální. Díky velkému množství projekcí jsme poté schopni matematicky (softwarově) složit 3D obraz snímaného objektu. Tato rekonstrukce obrazu probíhá na principu Radonovy transformace.

Flat panely můžeme rozdělit na přímé a nepřímé. U nepřímých Flat panelů je nejprve potřeba fotony radioaktivního záření převést na viditelné světlo, k tomu slouží tzv. scintilační vrstva, nejčastěji z jodidu draselného. Usměrněné světlo poté dopadá na křemíkové destičky Flat panelu a vzniká elektronový signál. Technologie nepřímých Flat panelů poskytuje vyšší radiační odolnost detektoru. U přímých Flat panelů odpadá nutnost převádět záření na viditelné světlo, místo toho je radioaktivní záření převedeno přímo na elektronový signál pomocí amorfního selenu. Tato technologie umožňuje přesnější zobrazení detektoru. [28] [29]

2.3.2 Přesnost výstupních dat

Přesnost jednotlivých snímacích systémů je v dnešní době již velice podobná. Výpočetní tomografie je při určitých aplikacích schopna dosáhnout přesnosti jednotek mikronů, stejně tak jako uvedené optické metody. Přesnost jednotlivých metod záleží především na konkrétní aplikaci a použitém zařízení. Obecně však lze uvést, že dotykové měření je v naprosté většině případů přesnější než bezdotykové. Obrovskou výhodou výpočetní tomografie je však produktivita. Z principu metody je zřejmé, že během jedné projekce dojde k zaznamenání všech paprsků dopadajících na detektor. Přesnost získaných dat je tak výrazně závislá na nastavení celého procesu. Důležitá je vzdálenost umístění součásti od zdroje záření (používá se výraz X souřadnice), jelikož je cílem dosáhnout co největšího zaplnění plochy detektoru rentgenovým zářením, které prošlo zkoušeným materiálem (záření, které materiálem neprošlo logicky nemá výpovědní hodnotu). Praktický postup nastavení této vzdálenosti byl dále popsán v praktické části. [28]

Dalším faktorem, který ovlivňuje přesnost je samotné nastavení snímání. Ať už se jedná o počet provedených projekcí, použití funkcí autofocusu, či nastavení korekcí. Z předchozí podkapitoly je patrné, že na přesnost metody má vliv i konstrukce rentgenky a typ použitého flat panelu. Zároveň je třeba si uvědomit, že součást je na otočný stůl potřeba umístit tak, aby jejím největším rozměrem byla osa Z, paprsek záření pak neprochází tak dlouhou dráhou skrz materiál, viz. obr. 24: [27]



Obrázek 24: Schéma vhodného nastavení polohy náboje

Naprostο klíčový je však vliv urychlujícího vysokého napětí v rentgence a použitých hardwarových filtrů. Firma Zeiss ve svém návodu k zařízení Zeiss Metrotom uvádí, že při napětích nad 100 kV je vliv hardwarového filtru dokonce větší než samotná velikost napětí. Velikost napětí se určuje především podle materiálu, který chceme skenovat a jeho tloušťky. Velice dobře prozařitelné jsou polymerní materiály a hliník, naopak pro prozáření oceli je třeba vyvinout výrazně vyšší napětí. Pro potřeby praktické části této práce byl využit zdroj o maximálním výkonu 225 kV, doporučení nastavení napětí pro různý typ a tloušťku materiálu je uvedené v tabulce 2: [28]

Tabulka 2: Doporučená volba napětí podle typu a tloušťky materiálu

Napětí [kV]	Maximální tloušťka materiálu					
	2 mm	30 mm	50 mm	150 mm	250 mm	300 mm
Polymery	Max. 80	120	160	180	200	225
Hliník	180	180	200	200	225	X
Titan	200	225	225	225	X	X
Ocel	225	225	225	225		

Velkým problémem ovlivňujícím kvalitu snímků pořízených pomocí výpočetní tomografie je nežádoucí šum (anglicky noise), tento nežádoucí šum je nutné minimalizovat již při nastavování parametrů, ale i tak je třeba přejít k eliminaci nežádoucích spekter rentgenového záření pomocí filtrů – měděných či cínových destiček, které umísťujeme před zdroj záření. Filtr cínu o tloušťce 1 mm odpovídá přibližně tloušťce 3 mm měděného filtru. [1] [27]

Přesnost snímku je dále ovlivňována při softwarovém zpracování, především při 3D rekonstrukci. Jak již bylo zmíněno pro 3D rekonstrukci se používá Radonova transformace, konkrétně inverzní algoritmus filtrované zpětné projekce. Tento algoritmus vede ke zlepšení obrazu a ke zvýšení intenzity hran, dochází však ke zkreslení, které je třeba vyfiltrout – využívá se ramp filtrů spojených s filtry pro detekci šumu.

Nepřesnost do skenování samozřejmě vnáší i nedokonalá textura povrchu skenovaného materiálu, případné nečistoty na povrchu.

Výstupem skenování pomocí výpočetní tomografie je mrak bodů – textový soubor ve formátu „unit16_scv“ obsahující miliony až miliardy bodů. (Velikost souboru bývá v řádu desítek GB). Přesnost metody CT se pohybuje v rozmezí desítek mikronů, některé zdroje však uvádějí i přesnosti jednotek mikronů pro speciální aplikace. [27]

Praktická část:

Cílem praktické části této práce je aplikovat metody reverzního inženýrství na konkrétní strojní součásti. Vybranou strojní součástí je náboj do kola studentské závodní formule týmu eForce FEE Prague Formula. Jedná se o formuli s elektrickým pohonem a autonomním řízením sestavenou na půdě ČVUT. Tým se se svou formulí pravidelně účastní mezinárodní soutěže Formula Student. Praktická část této práce rovněž nabízí různé alternativy, jak k digitalizaci či úpravě dat přistupovat a zmiňuje různé softwary umožňující práci s digitalizovanými daty. Výstupem praktické části je digitální model součásti v upravitelném CAD formátu a výkres obsahující zjištěné rozměry.

3 Popis snímané součásti

Náboj do kola formule je hliníkový a polotovarem pro jeho výrobu je kruhová tyč. Náboj je zobrazen na obr. 25 a 26.



Obrázek 25: Spodní strana náboje



Obrázek 26: Vrchní strana náboje

Pro správný postup reverzního inženýrství je potřeba pochopit funkci daného dílu. Náboj slouží ke spojení hřídele a kola. Důležité je jednak přesné uložení, ale také uchycení pomocí šesti šroubů. Součástí celého systému je i planetová převodovka. Samotný náboj, který je zkušebním dílcem v praktické části je na obr. 27 zobrazen červeně.



Obrázek 27: Schéma náboje v zapojení s krytem kola, vnitřním převodovým mechanismem a kotoučem

Z obrázku je patrné, že součást obsahuje hned 3 spojovací prvky, zaprvé otvory pro upevnění šesti šrouby po obvodu náboje, zadruhé otvory pro přichycení vnějšího krytu kola a zatřetí otvory pro přichycení náboje k dílci na spodní straně. Klíčové jsou rozměry vnitřních průměrů pro lisování ložisek znázorněné na modelu na obr. 28 červeně. Tyto rozměry je potřeba přesně tolerovat a tudíž k jejich měření využít přesnou dotykovou metodu pomocí CMM. Pro samotné skenování a následnou práci s daty je důležité, že náboj je symetrický, přičemž se šestkrát opakuje šedesátistupňový segment zobrazený na obr. 29.



Obrázek 28: označení klíčových rozměrů pro lisování ložisek



Obrázek 29: Opakující se část osově souměrného náboje

Symetričnost náboje je velice důležitá informace, kterou je možné zužítkovat při přípravě plánu měření. Prvním krokem reverzního inženýrství je rozbor, či analýza zkoumaného dílu. V této části je potřeba zjistit materiál dílu, základní rozměry a navrhnout metody vhodné pro digitalizaci dílu. Dále předpovídat, zda zvolené metody budou splňovat požadavky na přesnost naskenovaného modelu, zda máme výpočetní kapacitu a software na další úpravu dat atd.

V tomto případě je cílem nejprve získat digitální model čili naskenovat základní tvar s menším ohledem na přesnost. Přesnost jednotlivých rozměrů je poté možno doplnit další, přesnější metodou. Jelikož je jedním z cílů této práce i porovnání metod digitalizace, tak je nutné metody kombinovat. Nejpoužívanější metodou digitalizace součástí je v současnosti metoda pruhové projekce. Nevýhodou této metody je však vliv lesklých (odrazivých) ploch na přesnost skenování, pro použití pro tento hliníkový díl by bylo nutné využít zmatňující sprej, čímž by se mohl náboj znehodnotit. Pro potřeby zisku základního tvaru a rozměrů součásti navíc postačí metoda výpočetní tomografie, ve které je hliníkový materiál naopak výhodou.

Obecně je náboj poměrně jednoduchou součástí, neobsahuje žádnou složitou geometrii, ke které by bylo potřeba využít speciální metody digitalizace. I tak byl pro zjištění profilu vnitřní stěny náboje použit konturograf, jehož výstupem je křivka, kterou bychom v případě potřeby (vyžití při složitých geometriích) mohli rotovat, či vysouvat v CAD softwaru. Ze stejného důvodu bylo při dotykovém měření provedeno snímání a export křivky vnějšího uchycení náboje.

4 Digitalizace konkrétní součásti

V praktické části této práce je tedy využita digitalizace pomocí výpočetní tomografie, výsledkem skenování touto metodou je mrak bodů, který je potřeba dále upravovat. Z tohoto mraku je dále získán STL model (viz teoretická část této práce). Formát STL je dále možné převádět do formátu upravitelného v CAD, tento formát může sloužit například k vytvoření plánu měření pro dotykové metody digitalizace. V případě, že je pro nás přesnost dat získaných pomocí CT dostačující (bavíme se o desetinách až setinách milimetru), můžeme tento soubor rovnou využít pro výrobu v CAM softwaru. Plán pro dotykové měření pomocí CMM, které je rovněž součástí této práce, lze však vytvořit i bez digitálního modelu součásti, a to využitím fyzické součásti (náboje) a souřadnicového měřicího stroje. Při tomto postupu dochází k manuálnímu definování elementů definujících povrch náboje, výsledkem jsou pak křivky pro export a naměřené hodnoty definovaných rozměrů.

V neposlední řadě je v této kapitole uvedeno měření geometrie vnitřních průměrů dílu pomocí konturografu. Tato metoda byla využita pro změření malých osazení na vnitřní straně dílu, jelikož definování velice malých elementů, vytvářejících vnitřní geometrii, bylo pomocí CMM kvůli velikosti snímače téměř nemožné.

4.1 Digitalizace pomocí CT

Pro digitalizaci náboje byl použit průmyslový počítačový tomograf (CT) od firmy Zeiss s označením Zeiss Metrotom 1500 s 225kV zdrojem (zobrazený na obr. 30) umístěný v laboratořích fakulty strojní ČVUT v Praze. Před samotnou akvizicí bodů je třeba provést řadu kroků pro přípravu měření. Snímaný náboj je potřeba umístit na otočný stůl mezi rentgenku a detektor tak, aby náboj zaplnil co největší plochu detektoru, to vede k žádoucímu většímu rozlišení nasnímaného obrazu. Rozlišení je definováno velikostí objemového pixelu – voxelu, právě podle požadované velikosti voxelu a rozměrů součásti je volena vzdálenost mezi zdrojem a snímaným nábojem (označována jako X).



Obrázek 30: CT Metrotom 1500 G2 od firmy zeiss [15]

Ke vhodnému nastavení umístění náboje do prostoru CT je možné použít zkušební přípravky mimo CT a s pomocí kamery určit vhodnou vzdálenost X . Při snímání součásti (v našem případě náboj) je žádoucí, aby byl její rozměr ve směru osy X co nejmenší, z toho důvodu je vhodné umisťovat součásti u kterých je rozměr v jedné ose větší než v ostatních tak, aby tento rozměr směřoval ve směru osy Z , nahoru – rentgenový paprsek tak urazí co nejmenší dráhu letu při průchodu součástí. Náboj je nutné umístit doprostřed rotačního stolu, vhodné je, aby náboj svíral se stolem úhel minimálně 10° , potlačí se tak jevy, které mohou vést ke znehodnocení dat snímání. K přesnému umístění na rotační stůl a k naklonění součásti je vhodné použít upínací přípravek. Upínací přípravek musí mít nízkou absorpci záření, aby nerušil výsledky snímání, velice vhodné je využití polystyrenu. Nastavení vzdálenosti X a umístění náboje na otočný stůl, včetně použití polystyrenového upínacího přípravku je na obrázcích 31 a 32.



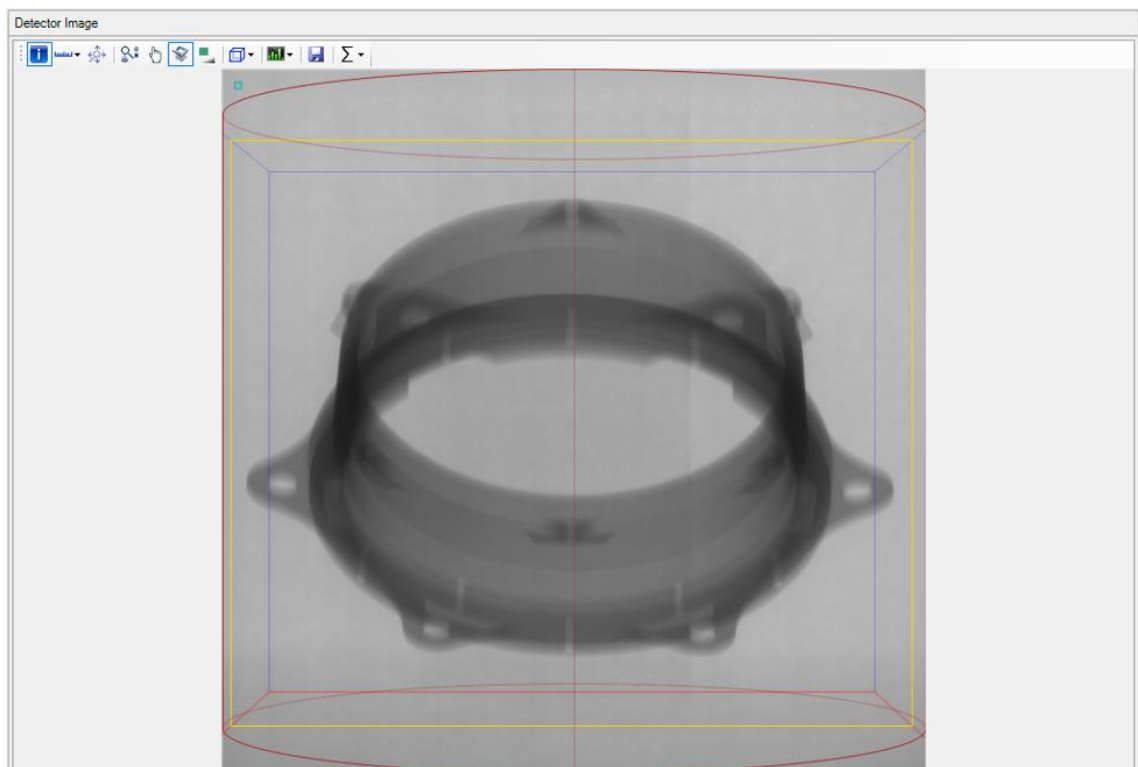
Obrázek 31: Displej sloužící k nastavení optimální vzdálenosti X



Obrázek 32: Zvolené uložení hliníkového dílce na polystyrenovou podložku

Navrhovaná vzdálenost X je tedy 662 mm, v této části je náboj vložen do pracovního prostoru stroje a pomocí softwaru Metrotom je nutné dále upravit vzdálenost X a nastavit další parametry.

Zobrazení náboje již v pracovním prostoru CT pomocí SW Metrotom je na obr. 33. Vzdálenost X byla upravena na 650 mm tak, aby se náboj vešel do žlutého čtverce na obrázku níže. Velikost Voxelu pro tuto vzdálenost je 96,57 μm . V dalším kroku je potřeba nastavit napětí a proud pro snímání součásti. Dle tabulky 2 v teoretické části této práce je pro hliníkový dílec s tloušťkou stěny do 50 mm (součet tloušťek, které muselo záření překonat) vhodné použití napětí 200 kV, Metrotom pak sám navrhne odpovídající proud, který je v tomto případě 0,932 mA.



Obrázek 33: Zobrazení náboje v softwaru Metrotom

Dalším prvkem, který je nutné nastavit je použití hardwarového filtru. Tento filtr slouží k potlačení části spektra rentgenového záření způsobujícího šum na detektoru. Filtry jsou nejčastěji měděné či hliníkové a jejich tloušťka se určuje podle snímaného materiálu a jeho tloušťky. Pro skenování hliníkového náboje byl využit měděný filtr o tloušťce 2 mm. [29]

Dále je možné nastavit například počet projekcí, použití dynamické korekce pro každou projekci či nastavení funkce autofocus. Po nastavení základních parametrů je potřeba prostor CT uzavřít a spustit snímání. Rychlost otáčení rotačního stolu byla nastavena na 1°/s a počet projekcí na 2050.

Nastavení parametrů v softwaru Metrotom je shrnuto v následující tabulce:

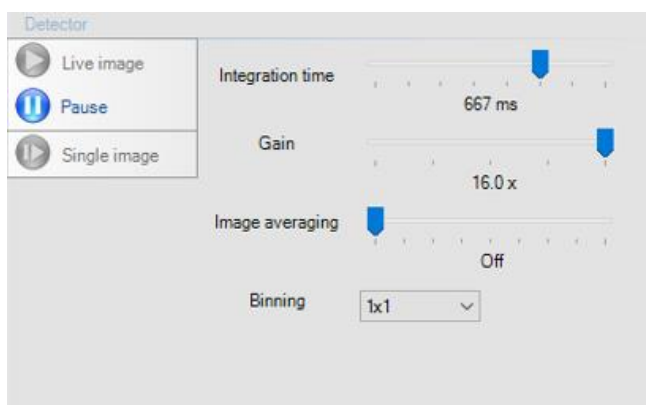
Tabulka 3: Parametry skenování pomocí výpočetní tomografie

Parametr	Hodnota
Vzdálenost X [mm]	650
Velikost Voxelu [μm]	96,57
Napětí [kV]	199-200
El. proud [μA]	932
Rychlost otáčení [$^{\circ}/\text{s}$]	1
Hardwarový filtr	Měď 2 mm
Počet projekcí	2050

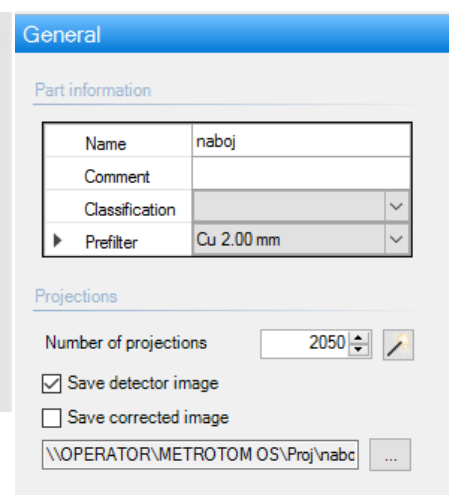
Další parametry, které mají vliv na přesnost a dobu snímání jsou: [29]

- Integration time – čas po který je náboj vystaven záření pro vytvoření jednoho snímku
- Gain – zesílení, ovlivňuje světlost a ostrost obrazu, čím vyšší zesílení tím vyšší světlost a nižší ostrost
- Image averaging – zapnutí této funkce zapříčiní vytvoření více snímků v jedné poloze a jejich následné průměrování

Celková doba snímání hliníkového náboje byla 34 minut, nastavení pokročilých parametrů je na obrázcích níže:



Obrázek 34: Nastavení pokročilých parametrů

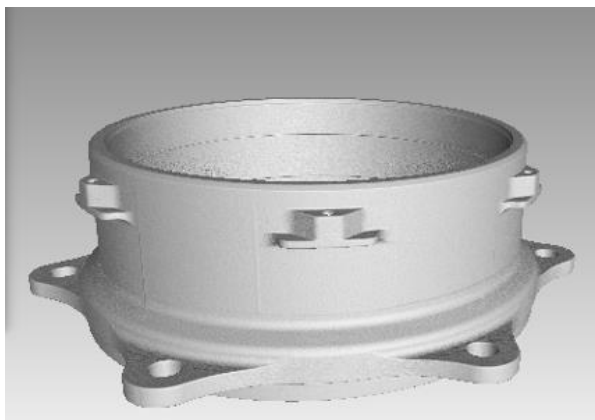


Obrázek 35: Nastavení HW filtru

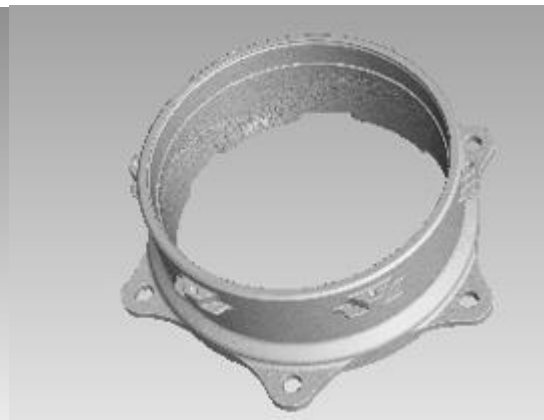
Výsledkem snímání je mrak bodů. V softwaru Metrotom je možné prohlédnutí jednotlivých snímků a jejich případná korekce. Pro další úpravu dat je však nutný export a nahrání do programu VG Studio Max.

VG Studio Max je software od firmy Volumegraphics sloužící k práci s mračnem bodů získaným pomocí výpočetní tomografie, alternativou k tomuto SW je například Gom Inspect.

Do pracovního prostředí programu VG Studio Max je třeba nahrát soubor ve formátu VGL, který byl získán exportem dat z programu Metrotom. Součástí vyexportovaných dat je i soubor obsahující informaci o všech naměřených bodech. Ještě před samotným otevřením dat ve VG studiu je potřeba upozornit, že práce s takto objemnými daty vyžaduje vysoký výpočetní výkon počítače, z toho důvodu byl pro práci s mračnem bodů využit počítač na Fakultě strojní ČVUT určený pro podobné simulace. Importovaný soubor má velikost 14 GB s filtrováním odlehlých hodnot a 17 GB bez filtrování. Obtížná práce s obsáhlými datovými soubory je jednou z nevýhod výpočetní tomografie jako metody reverzního inženýrství. Po nahrání dat VG Studio Max zobrazí danou součást ve třech na sebe kolmých řezech a zrekonstruuje 3D objekt, zobrazený na obr. 36 a 37.



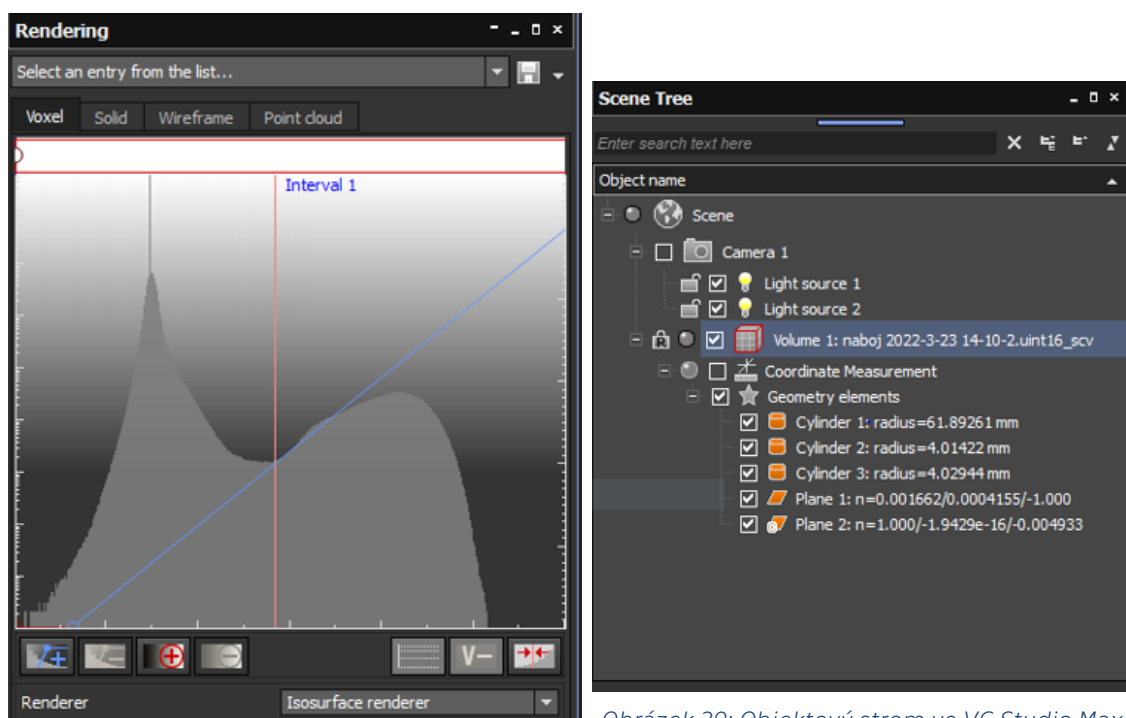
Obrázek 36: Objekt získaný metodou CT



Obrázek 37: Objekt ve VG Studiu Max

Ještě před vytvořením modelu (3D objektu), je potřeba v tomto softwaru provést vymezení povrchu. Toto vymezení slouží k tomu, aby program

přesně definoval rozhraní mezi materiálem a okolím. Jednou z možností je využití metody Isosurface. K aplikaci této metody slouží histogram zobrazený na základní obrazovce v softwaru VG Studio Max. Povrch je v této metodě definován propojením objemových pixelů, které jsou v histogramu zobrazeny jako konstantní odstín šedé. Tento odstín šedé je v histogramu definován červenou čarou. Hodnota šedé barvy definuje hranici mezi materiálem a okolím. Nevýhodou je, že povrch je definován jednou automaticky vybranou hodnotou šedé, z toho důvodu lze definici i manuálně upravovat, či jí manuálně určit jako průměr hodnoty šedé rozhraní materiálu a hodnoty šedé okolí. [31] Histogram pro náboj je zobrazen na obr. 38.



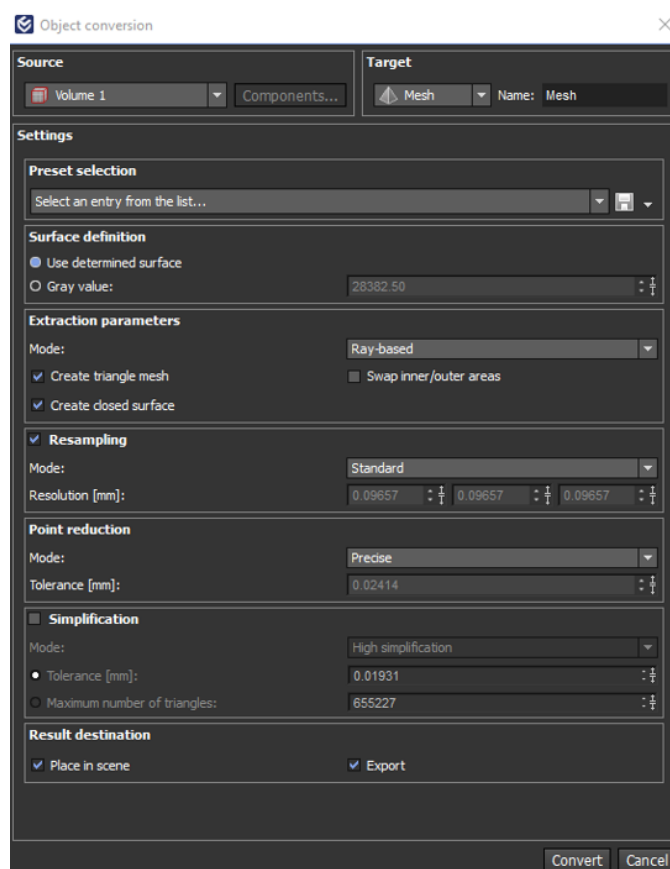
Obrázek 38: Histogram ve VG Studio Max

Obrázek 39: Objektový strom ve VG Studio Max

Dalším krokem je vyrovnání součásti. Vyrovnání se provádí z důvodu definování nového souřadného systému, který je možné využít např. pro práci s rozměry součásti. V případě náboje bylo využito standardní vyrovnání metodou 3-2-1, u které je potřeba definovat primární (rovina), sekundární (přímka) a terciální referenci (bod), dále je nutné definovat střed souřadného systému a směr os.

Konkrétní použité elementy pro vyrovnání náboje jsou zobrazeny v objektovém stromě na obr. 39. Primární referencí je rovina čela náboje, sekundární pak vnitřní průměr a terciální průměr díry pro uchycení šrouby. Tím byly odebrány všechny stupně volnosti náboje a vyrovnání je tedy určité. [31]

Program VG Studio Max nabízí velké množství funkcí, důležité je pokročit k dalšímu kroku reverzního inženýrství, a to k polygonizaci (vytvoření trojúhelníkové sítě). Ve VG Studiu se pro tento krok využívá funkce „Object conversion“ (konverze objektu), kde po výběru daného elementu určíme cíl konverze (v našem případě „Mesh“), dále určíme parametr „Point reduction“ (snížení počtu bodů). Možné je i nastavit různá zjednodušení. Pro vytvoření trojúhelníkové sítě však postačí zvolit pole „Create triangle mesh“ (vytvořit trojúhelníkovou síť) a „Create closed surface“ (vytvořit uzavřený povrch). Výsledkem konverze je soubor ve formátu STL. Funkce object conversion je zobrazena na následujícím obrázku:



Obrázek 40: Nastavení funkce Object conversion

Z obrázku je patrné, že volba „Precise“ (přesný) v kolonce „Point reduction“ odstraňuje body v toleranci 0,024 mm, velikost exportovaného souboru je 357 MB. Při zvolení módu „Normal“ je hodnota tolerance 0,048 mm a výsledný STL soubor má velikost 250 MB. Porovnání obou exportovaných trojúhelníkových sítí je v tabulce níže:

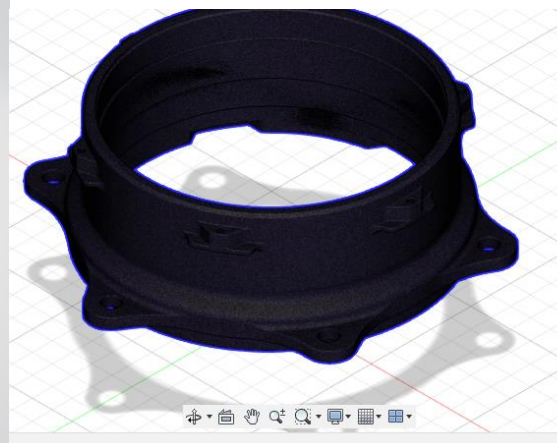
Tabulka 4: Parametry exportovaných STL souborů

Mód filtrace bodů	Precise	Normal
Tolerance [mm]	0,024	0,048
Velikost Stl souboru [MB]	357	250
Počet trojúhelníků	7 322 314	5 124 794

Výsledný model z programu VG Studio Max je na obrázku níže. Další práce s tímto STL modelem, jako převod modelu do CAD upravitelného formátu, či rozměrová analýza modelu jsou součástí kapitol 5 a 6. Náboj v tomto formátu by bylo možné upravit v softwaru umožňujícím práci s trojúhelníkovou sítí a poté například vytisknout na 3D tiskárně, nicméně možnosti úprav modelů ve formátu STL jsou velice omezené.



Obrázek 41: Model náboje tvořen polygonovou sítí



Obrázek 42: Model náboje ve formátu STL

4.2 Digitalizace pomocí CMM

Jak již bylo zmíněno v teoretické části této práce, metoda měření pomocí souřadnicového měřicího stroje je metoda dotyková. Její hlavní výhodou oproti bezdotykovým metodám digitalizace je vyšší přesnost. Stacionární CMM pracují s přesností kolem jednoho mikrometru, mobilní poté s přesností desítek mikrometrů. Další výhodou této metody je možnost automatizace. Jeden plán měření může být použit na všechny kusy série, téměř bez zásahu operátora. Nevýhodou oproti metodě výpočetní tomografie je nižší rychlost skenování (v poměru počet získaných bodů proti době skenování) a nutnost detailnější přípravy plánu měření (definice jednotlivých elementů, vyrovnaní, souřadného systému atd.). [1]

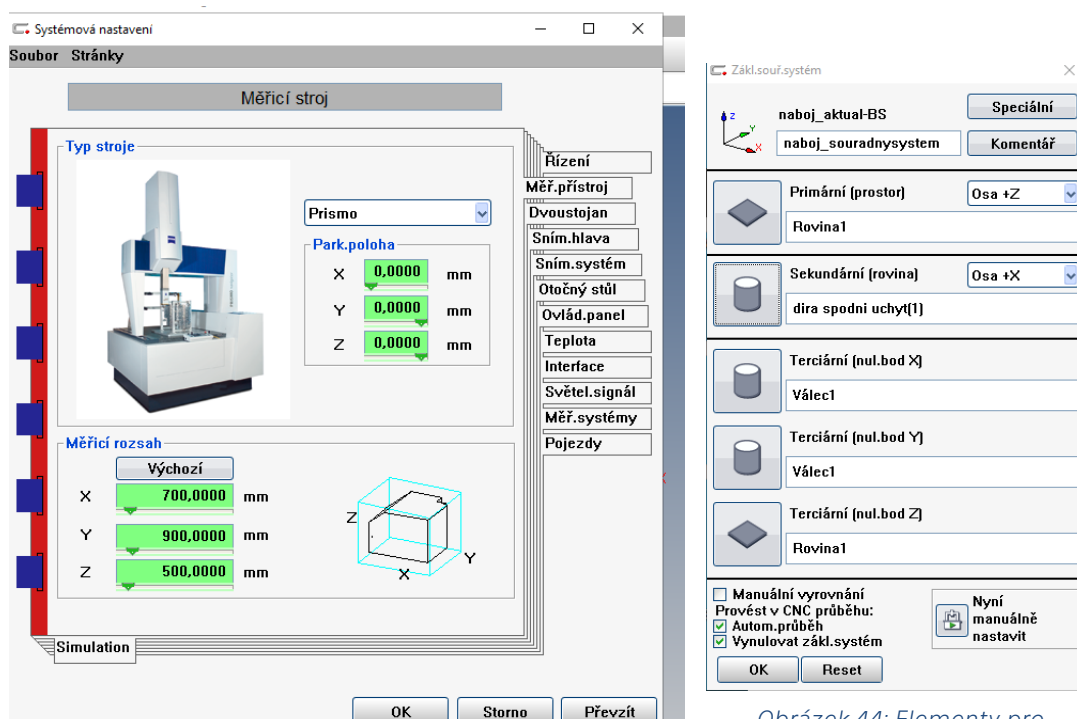
V případě praktické části této práce bylo možné k digitalizaci náboje přistoupit dvěma způsoby. Jedním způsobem je manuální obsluha CMM, kde je potřeba fyzicky definovat jednotlivé elementy a propojením se softwarem Calypso je převést do digitální podoby. Tato metoda nám umožní přesně naměřit hodnoty rozměrů součásti, ale také exportovat různé křivky definující povrch součásti.

Druhou metodou je použití již získaného modelu pomocí výpočetní tomografie. Tento model je nutné převést do formátu CAD (možnosti převodu detailně popsány v následující kapitole), poté je možné model nahrát do softwaru Calypso. Model může být použit k definování elementů a měřených charakteristik přímo v softwarovém prostředí. Vytvořený plán měření poté stačí spustit na CMM (samozřejmě je nutné součást upnout dle nastavení v plánu měření, sestavit snímač dle nastavení v programu Calypso, provést jeho kalibraci a určit souřadný systém). Níže jsou uvedeny obě metody digitalizace pomocí CMM.

4.2.1 Digitalizace s využitím CAD modelu

Základní nastavení a definice souřadného systému

Po nahrání dílu do SW Calypso 2017 je potřeba zkontrolovat nastavení stroje, nastavení bylo ponecháno výchozí pro měřicí stroj Zeiss Prismo zobrazený na obr. 43. Po kontrole nastavení stroje následuje nastavení souřadného systému náboje, definice bezpečnostního kvádru a nahrání snímačů. Pro potřeby měření náboje postačí jednoduchý snímač ve směru osy Z. Souřadný systém byl vytvořen opět standartní metodou vyrovnání 3-2-1. Elementy vybrané pro definici souřadného systému jsou na obr. 44.



Obrázek 43: Nastavení stroje

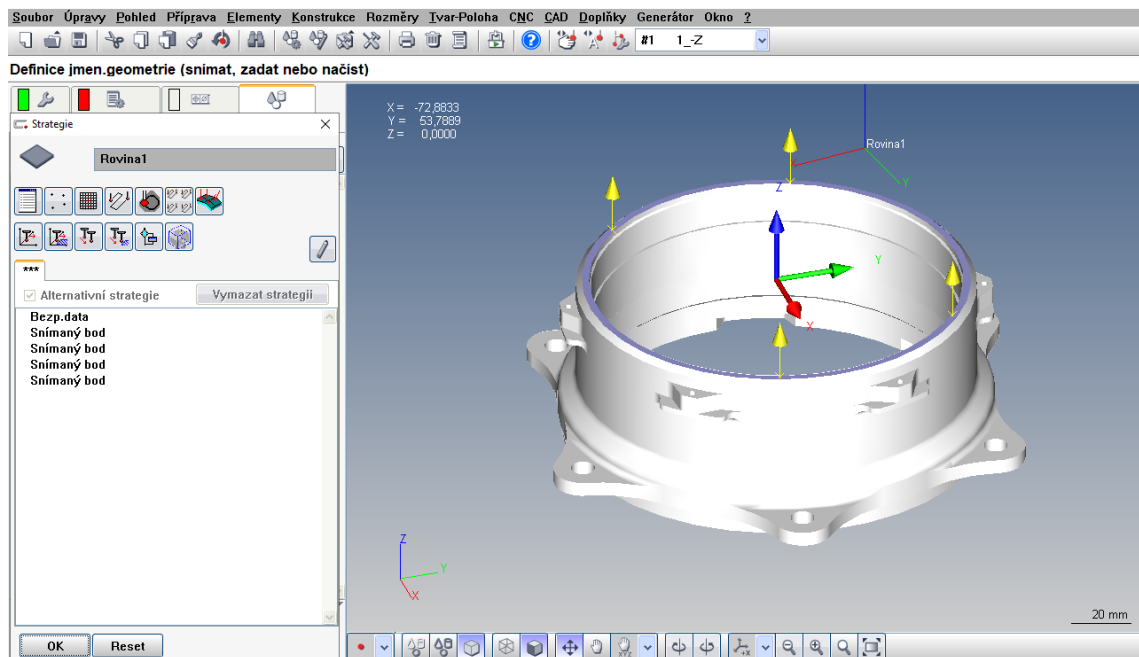
Obrázek 44: Elementy pro vyrovnání náboje

Simulace měření náboje proběhne ve dvou polohách, první plán měření uvažuje umístění náboje na granitovou desku položením náboje na jeho spodní rovinu, upnutí je pak provedeno za vnitřní průměr. Druhé měření pak uvažuje položení náboje na opačnou vrchní rovinu, upnutí je možné provést opět za vnitřní průměr součásti.

Tvorba elementů a charakteristik

Jak je patrné z obrázku 44 v softwaru Calypso slouží k měření charakteristik, či k definování souřadných systémů elementy. Tyto elementy vybíráme pomocí funkce „definovat prostorovou geometrii“ na spodní liště programu. Po vybrání elementu se daná plocha zbarví a zobrazí se v záložce elementy.

Na obrázku 45 je zobrazen souřadný systém definovaný dle obrázku 44, zároveň je zde vybrán element „Rovina1“ po vybrání elementu je nutné určit jeho strategii měření. Strategie záleží na dostupnosti ploch, na druhu elementu a na přesnosti, kterou požadujeme. Pro měření kružnice je například typickou strategií měření kruhové dráhy, pro měření válce buďto dvě kruhové dráhy nebo dráha spirálová, pro měření této základní roviny postačí odečtení čtyř bodů ve vhodné vzdálenosti od sebe. Výběr strategie může mít velký vliv na přesnosti měření, nevhodná strategie povede ke zkreslení výsledků měření.

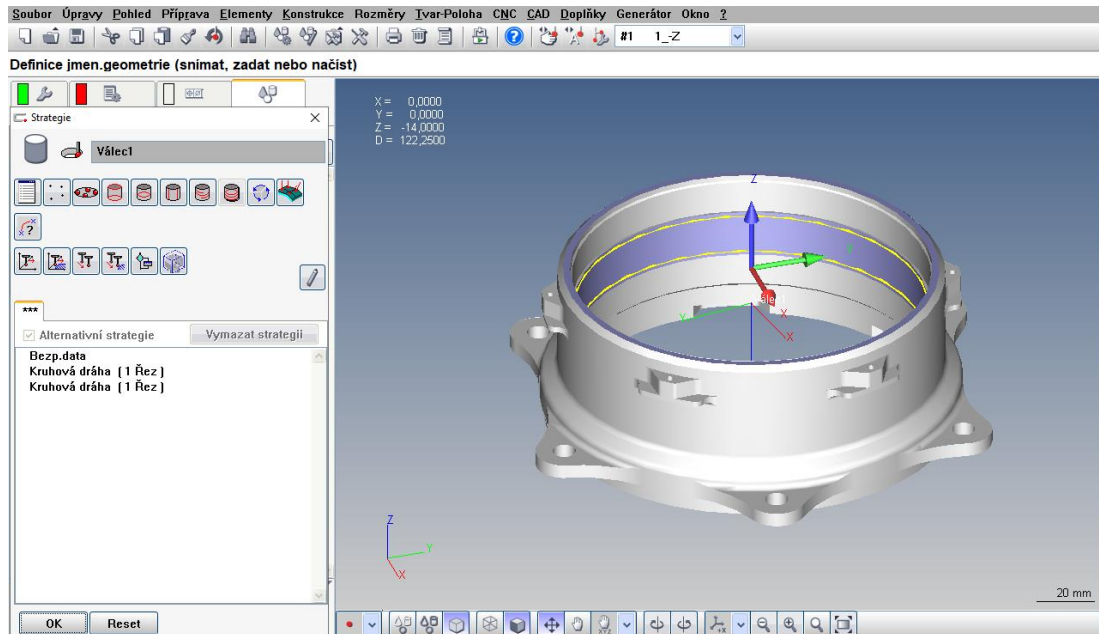


Obrázek 45: Definice roviny a zobrazení vyrovnaného náboje v prostředí programu Calypso

Pozornost je potřeba věnovat také snímači, který byl využit pro odečet bodů, v horní části obrázku 45 je patrné označení „1 __-Z“. Tato zkratka znamená, že je vybrán snímač v záporném směru osy Z dle našeho vyrovnání, od vybraného snímače se odvíjí i nastavení bezpečnostní skupiny (směru, do

kterého snímač bezpečně poodjede po akvizici dat). Upínací systémy a samotné snímače jsou poměrně nákladnou záležitostí a z toho důvodu je potřeba správně volit bezpečnostní skupiny a další nastavení (bezpečnostní kvádr). Případná kolize by mohla vést k trvalému poškození snímače.

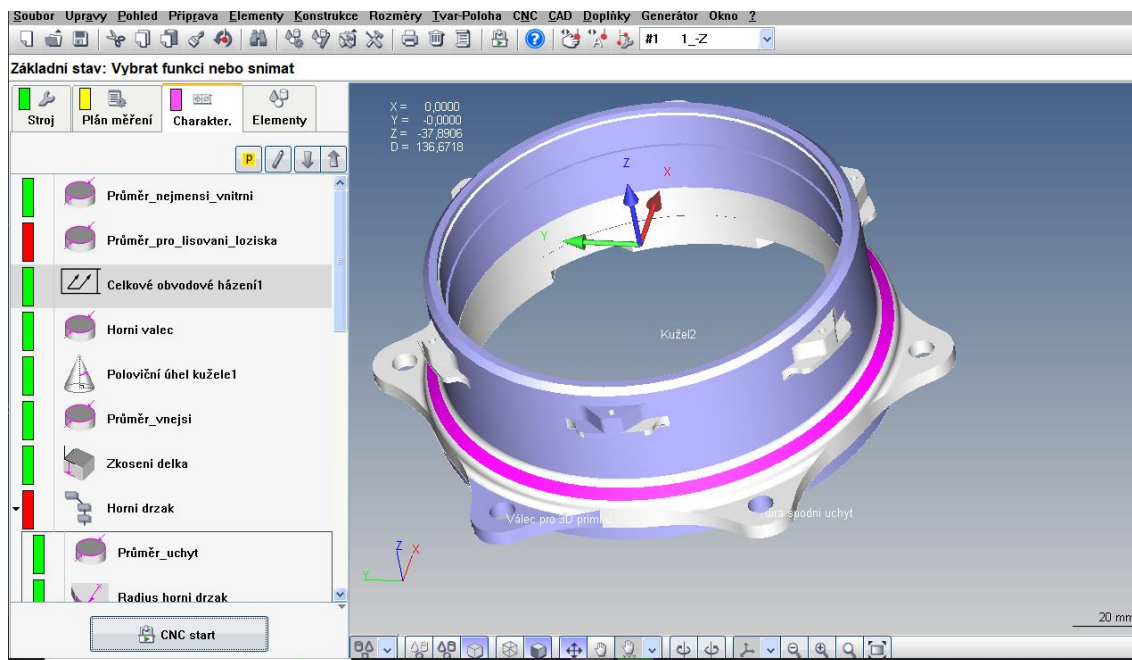
Příklad definice válce označeného „Válec 1“ je na obr. 46, kruhové dráhy určující pohyb snímače jsou naznačeny žlutě.



Obrázek 46: Příklad definice válce v SW Calypso

Obdobným způsobem jsou definovány další elementy. V záložce charakteristiky pak určujeme samotné rozměry, které budou součástí měřicího protokolu (výstupu měření). Každá charakteristika je určena jedním nebo více definovanými elementy.

Na obrázku 47 jsou na modelu patrné již definované elementy a v okně na levé straně jsou příklady některých charakteristik. Charakteristiky je možné vkládat buďto přímo z definice elementu zaškrtnutím příslušného pole, nebo výběrem v nabídce horní lišty – „Konstrukce, Rozměry, Tvar-Poloha“.

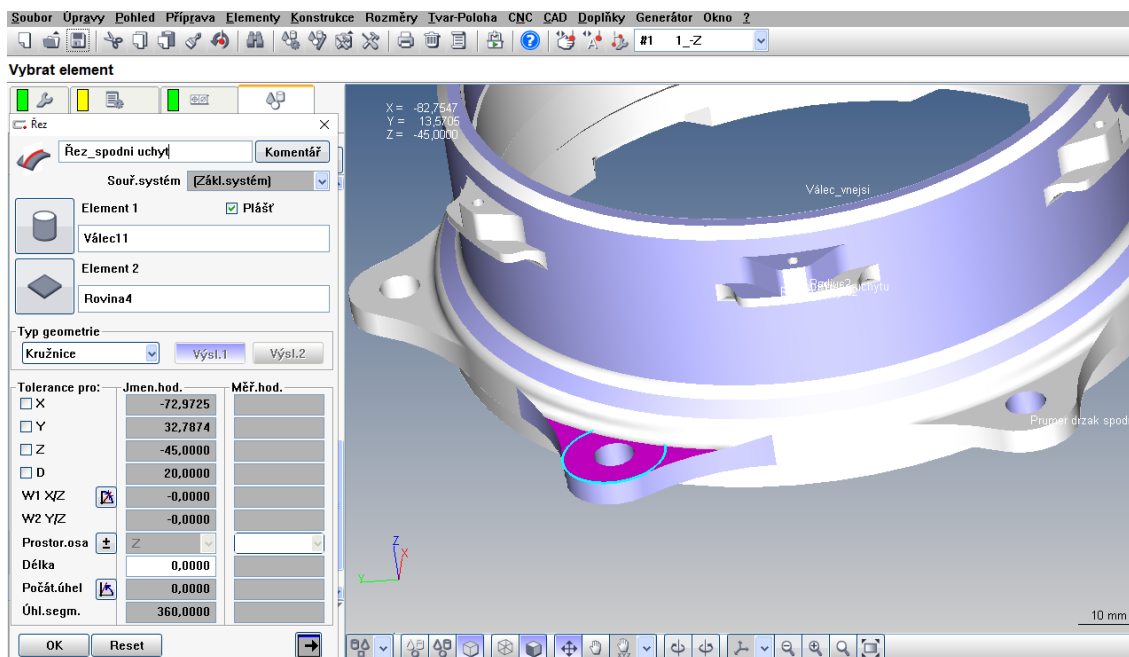


Obrázek 47: Příklad definovaných charakteristik a elementů

Další funkce SW Calypso

Software Calypso však nabízí i jiné funkce než jen definice elementů a charakteristik, pro potřeby měření je možné v záložce „Konstrukce“ sestavit 3D přímku vhodnou např. pro výpočet úhlů mezi elementy, existuje zde i funkce „Projekce“ sloužící k promítnutí elementu do roviny elementu jiného. Při tvorbě plánu měření byla použita i funkce „Řez“ sloužící k definování hrany, která je výsledkem řezu dvou elementů. Řez spodního úchytu je zobrazen na obrázku 48.

Výsledkem řezu válce a fialové roviny je kružnice určující radius spodního úchytu. Zaškrtnutím pole D v okně nalevo rovnou vytvoříme charakteristiku průměru se jmenovitou hodnotou 20 mm.

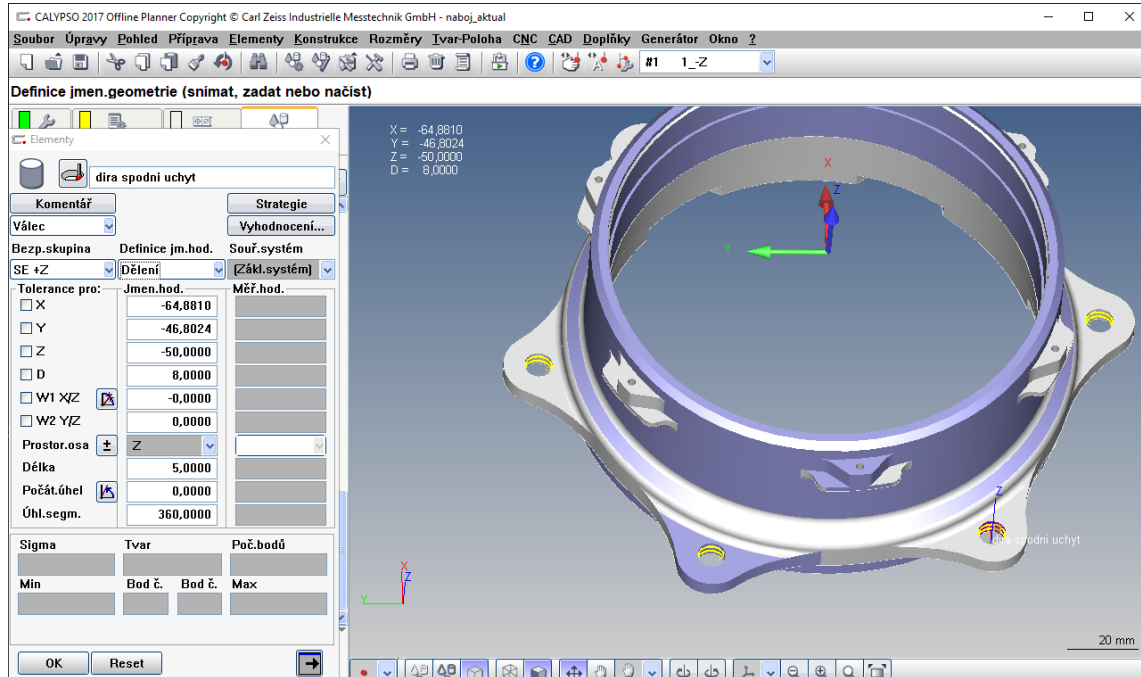


Obrázek 48: Příklad definice funkce řezu

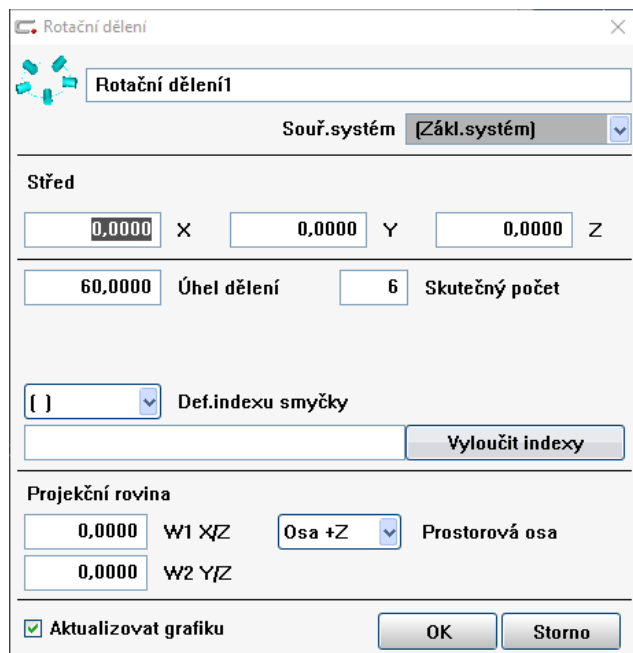
Specifickým elementem náboje je otvor spodního úchytu, jedná se o důležitý rozměr součásti a zároveň jde o opakující se segment. U kruhových drah určujících strategii měření válce vnitřku otvoru lze mimo jiné nastavit i úhlový rozsah, tuto funkci využijeme, pokud se v kruhové dráze nachází překážka, či pokud stačí nasnímat jen část kružnice. Důležitým parametrem je počet bodů na řez, pro reálné měření je minimální doporučená hodnota 500.

Pro opakující se segment lze využít definici jmenovité hodnoty dělením viz obr. 49. Tuto funkci je potřeba zvolit opět v okně nalevo po otevření okna elementu. Při zvolení této funkce bylo provedeno měření všech šesti otvorů (kruhové dráhy opět znázorněny žlutě)

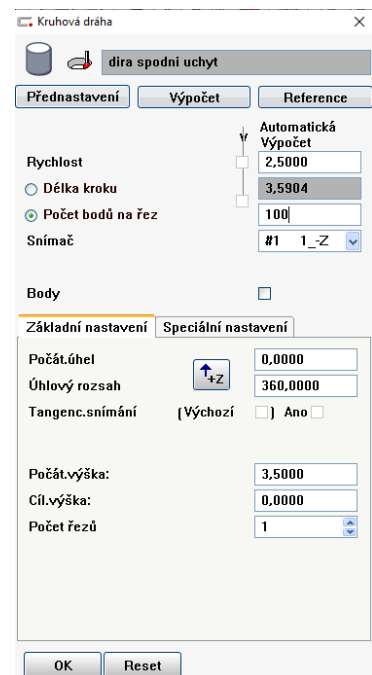
Nastavení funkce rotačního dělení a možnosti nastavení kruhové dráhy popisují obrázky 50 a 51. Na náboji zvolíme šest otvorů opakujících se po šedesáti stupních a software sám definuje kruhové dráhy.



Obrázek 49: Příklad definice funkce rotačního dělení

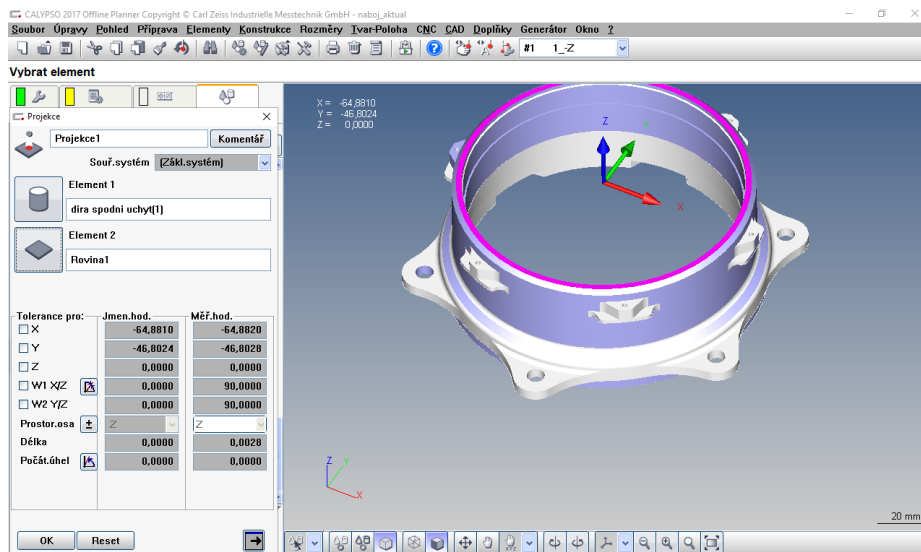


Obrázek 50: Nastavení rotačního dělení

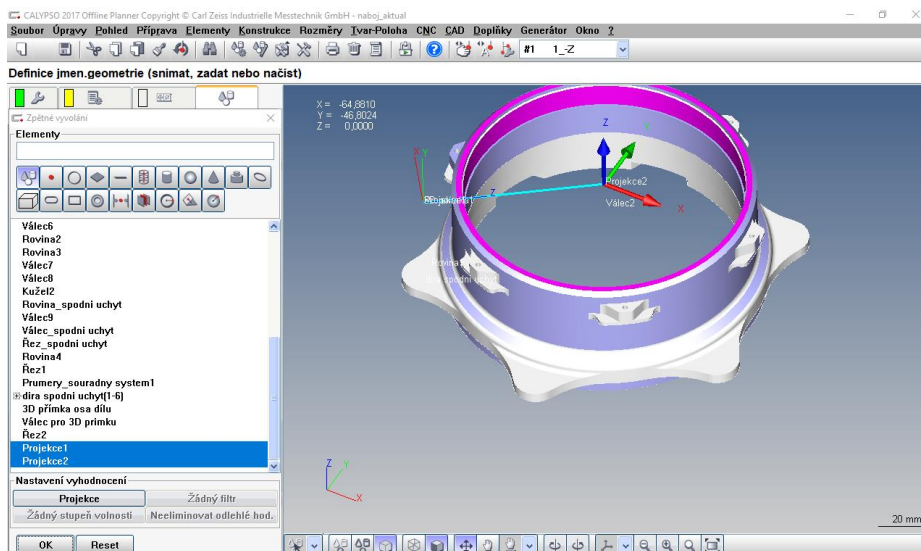


Obrázek 51: Detail strategie kruhové dráhy

Další funkcí SW Calypso je tvorba 3D přímky. 3D přímku lze zkonstruovat přes nabídku „Elementy > 3D přímka“. Dále je v definici elementu 3D přímky zvolena možnost zpětného vyvolání, kde jsou vybrány dva elementy, které spojuje 3D přímka. V nabídce „Konstrukce“ zároveň existuje funkce projekce, v této funkci je třeba vybrat element, který chceme promítnout jako „Element 1“ a rovinu do které ho chceme promítnout jako „Element 2“. Promítnutí otvoru spodního úchytu do horní roviny je na obr. 52. Výběr elementů, které spojuje 3D přímka je na obr. 53.

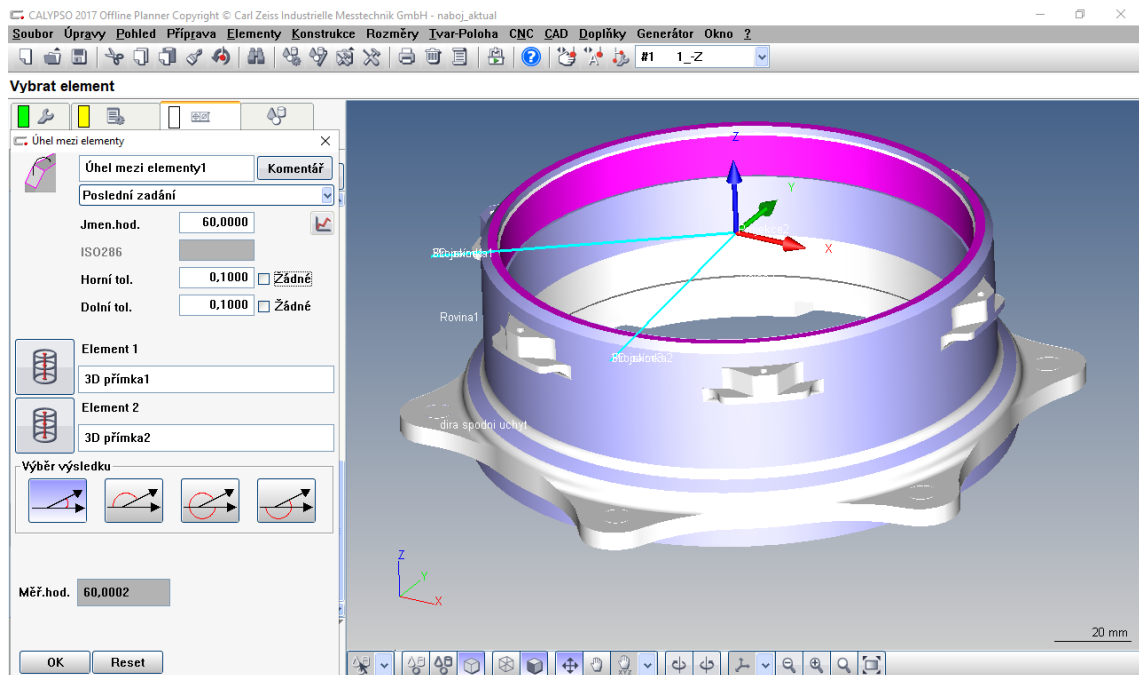


Obrázek 52: Příklad funkce projekce



Obrázek 53: Volba elementů pro tvorbu 3D přímky

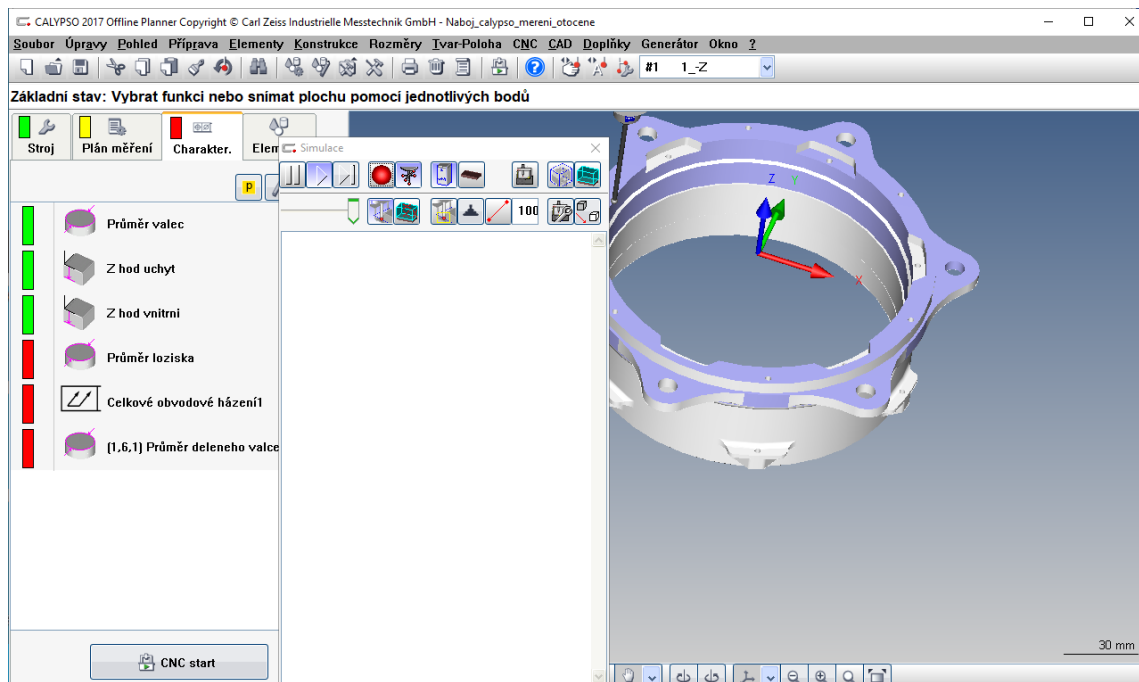
Pomocí dvou 3D přímek je možné přesně změřit úhel mezi dvěma otvory. U tohoto konkrétního dílu jde opět o důležitý rozměr, jelikož se jedná o velikost opakujícího se segmentu. Určení charakteristiky úhel mezi elementy se vytváří přes nabídku „Tvar-Poloha > Úhel mezi elementy“, definice úhlu je na obr. 54.



Obrázek 54: Sestrojení charakteristiky úhlu mezi dvěma 3D přímkami

Pro použití v metrologii, či kontrole dílu je velice užitečná funkce eliminace odlehlých hodnot a obecně využití filtrů. Pro potřeby reverzního inženýrství by bylo vhodné eliminaci využít pro elementy, které jsou na fyzické součásti viditelně poškozené či pro elementy, u kterých předpokládáme, že by mohlo dojít k nasnímání nepřesných hodnot. Pro náboj v této práci je však využití filtrů zbytečné.

Po definování všech charakteristik, které je potřeba naměřit je vhodné spustit simulaci snímacího systému přes volbu „Generátor > Simulace snímacího systému“, pokud měření proběhne bez kolize, pak se program spustí tlačítkem CNC start. Na obrázku 55 je zobrazen souřadný systém druhého měření (při položení součásti na vrchní rovinu), dále okno simulace, ve kterém by se po spuštění programu objevily kolize a v neposlední řadě tlačítko CNC Start v levém dolním rohu.



Obrázek 55: Charakteristiky a vyrovnaní druhého měření

Vyrovnaní součásti bylo provedeno stejně jako v prvním případě, jediným rozdílem je volba roviny souřadného systému.

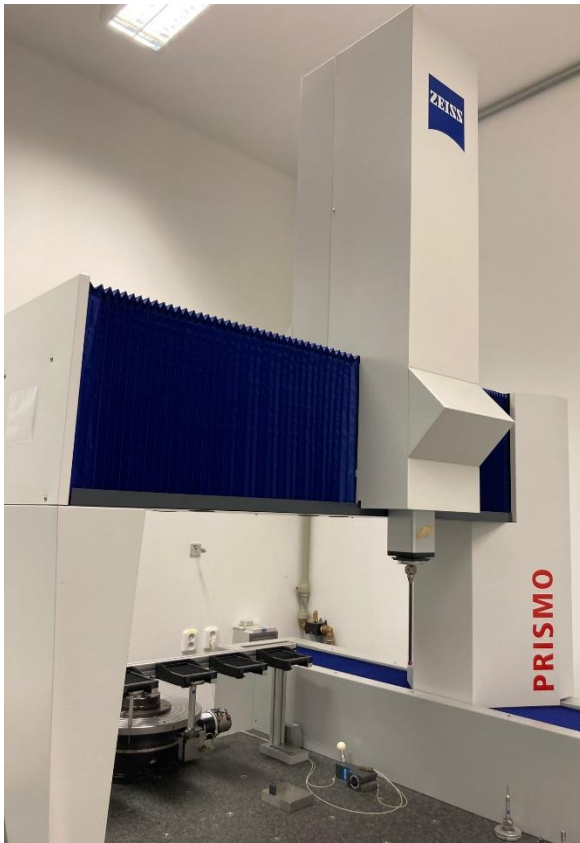
Výsledkem programu je protokol naměřených hodnot. Jak již bylo zmíněno, vytvořený program lze využít i pro reálné měření na CMM stroji, což povede k reálným datům, nikoliv pouze k datům ze simulace.

4.2.2 Digitalizace přímo pomocí CMM

Příprava před měřením

Digitalizace náboje přímo pomocí CMM spočívá v prvním kroku ve vhodném upnutí součásti na granitovou desku souřadnicového měřicího stroje. Možností upnutí je mnoho, variantou je upnutí součásti do sklíčidla, využití rotačního stolu a další. Pro náboj však postačí upnutí do svěráku. Svěrák je následně potřeba pevně přichytit ke granitové desce. Pro souřadnicové měření náboje byl použit stroj Zeiss Prismo (na obr. 56). Upnutí součásti je zobrazené na obr. 57. Následuje výběr či sestavení snímače a jeho kalibrace. Pro měření náboje byl vybrán snímač s rubínovou kuličkou (přesto, že rubín se nedoporučuje pro měření hliníkových součástí – pro měření pouze jednoho dílu však lze rubínovou kuličku použít) s vodorovně umístěnými snímači na obou stranách.

Osa náboje je v plánu měření při vyrovnání součásti definována jako osa Z, proto je vhodné se držet této systematiky a snímače označit jako „+_Z“ a „-_Z“.



Obrázek 56: CMM Zeiss Prismo v laboratoři ČVUT



Obrázek 57: Uchycení náboje do svěráku

Na obrázku 58 je zároveň ve spodní části ovládací panel stroje, který slouží k manipulaci s pinolou součásti. Lze zde nastavit rychlost posuvů, aktuálně používaný snímač a další parametry. Po zpuštění SW Calypso 2020 dojde k propojení softwaru se souřadnicovým měřícím strojem a následuje definice bezpečnostního kvádru, souřadného systému a vyrovnání, jako tomu bylo v předchozí kapitole. Senzor použitý pro digitalizaci náboje funguje na principu spínacího dotykového senzoru, ale také skenovacího dotykového senzoru (viz teoretická část této práce).



Obrázek 58: Snímač pro měření náboje, vzájemná poloha snímače a náboje a ovládací panel v pravém spodním rohu

Rozdíl mezi měřením CAD modelu a měřením přímo na stroji je například v definici bezpečnostního kvádru, zatímco v prvním případě lze tento kvádr odečíst přímo z CAD modelu, ve druhém případě model k dispozici není, tudíž je třeba kvádr definovat manuálně najetím aktivního senzoru do bezpečných vzdáleností pomocí ovládacího panelu stroje.

Vyrovnění a definování elementů

Pro vyrovnění součásti byly použity stejné elementy jako při tvorbě plánu měření z CAD modelu, tedy rovina, válec reprezentující vnitřní průměr a válec definující průměr jedné ze šesti otvorů, viz obrázek 59. Definování elementů funguje opět na obdobném principu. Rozdílem je, že elementy nejsou definované kliknutím na model součásti, ale dochází k odečtení jednotlivých bodů dotykem senzoru se snímaným nábojem. Software Calypso 2020 poté dle počtu a rozmístění snímaných bodů automaticky určí o jaký element se jedná (rovina, kružnice, válec atd.). Nejprve je tedy nutné tímto způsobem definovat souřadný systém a vyrovnění součásti. Poté je nutné definovat

bezpečnostní kvádr (viz. předchozí odstavec) a následně již lze přistoupit ke tvorbě jednotlivých elementů. Pomocí elementů definujeme charakteristiky stejným způsobem jako v předchozí podkapitole. Seznam charakteristik poté určuje podobu měřícího protokolu.



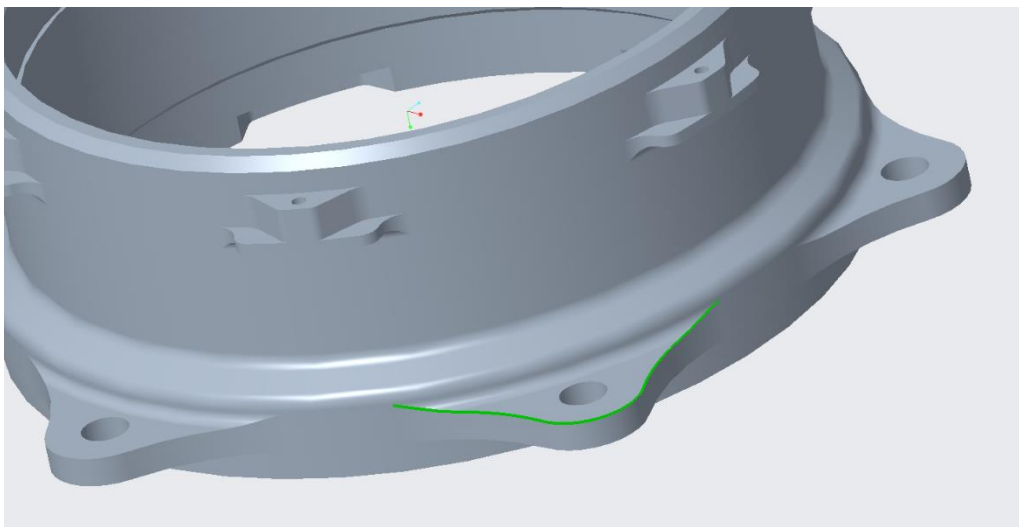
Obrázek 59: Elementy pro manuální vyrovnání

Spuštění programu a výsledný protokol

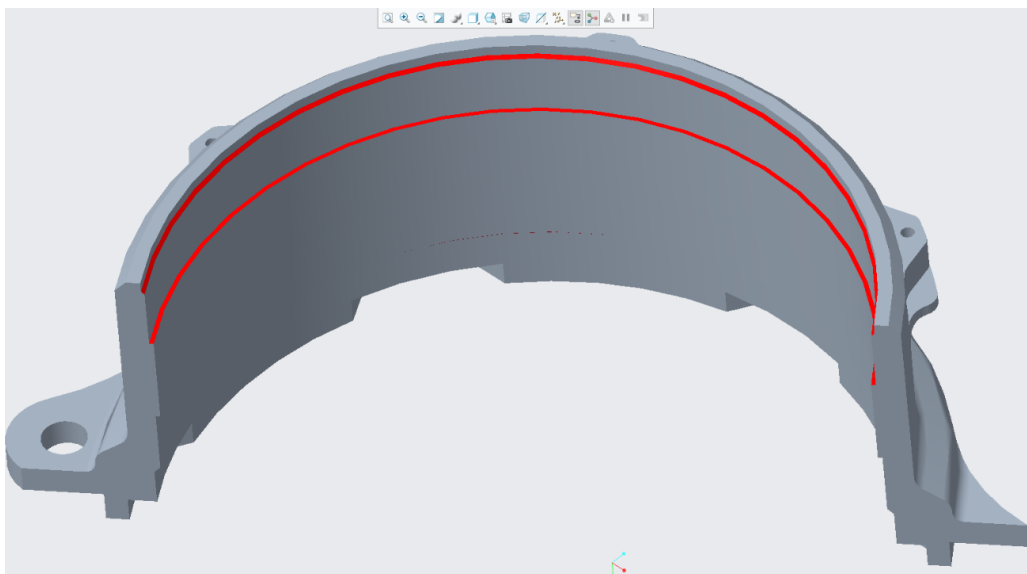
Jelikož použitý senzor na souřadnicovém měřícím stroji Zeiss Prismo lze použít i jako skenovací dotykový senzor, pak můžeme tuto vlastnost využít pro definování nikoliv pouze bodů, ale i kruhových drah či drah volného profilu. Tyto dráhy slouží pro snímání křivek definujících elementy náboje. Tyto křivky je možné exportovat ve formátu DWG, což může opět usnadnit tvorbu modelu (u náboje byla exportována zeleně označená křivka na obr. 60). Tato funkce by našla využití především u tvarově složitějších součástí. Po definici všech charakteristik následuje spuštění měření pomocí tlačítka CNC start, opět obdobně jako při měření CAD modelu. Během měření lze

korigovat rychlost pojezdů pinoly pomocí ovládacího panelu stroje. Především při prvním spuštění programu je vhodné rychlost snížit, aby při případné kolizi nedošlo k poškození senzorů.

Při prvním spuštění programu je potřeba opět manuálně pomocí ovládacího panelu definovat vyrovnávací elementy součásti a poté lze již spustit automatické měření. Na obrázku 61 je zobrazeno osazení vnitřních průměrů náboje, které se nepodařilo změřit pomocí souřadnicového měřicího stroje. Tyto hodnoty je třeba doplnit pomocí konturografu, viz. další podkapitola.


























Obrázek 60: Exportovaná DWG křivka



Obrázek 61: Rozměry měřené konturografem (červeně)

Dalším problematickým místem pro měření pomocí CMM byly malé závit, tyto rozměry se však díky využití malých senzorů podařilo naměřit. Alternativní metodou pro získání těchto hodnot by bylo použití závitových měrek. Exportovaný protokol je zobrazen níže:

Name	Measured value	Nominal value	+Tol	-Tol	Odchylka +/-
 Prumer 8	8.0056	8.0000			0.0056
 X hod_4,6	-4.5931	-4.6000			0.0069
 Prumer_126	125.9860	126.1199			-0.1339
 Prumer_123,8	123.8138	123.8000			0.0138
 X hod_5,6	-5.6089	-5.6000			-0.0089
 Radius40	39.9010	40.0000			-0.0990
 Radius10,5	10.4411	10.4500			-0.0089
 Prumer_145,6	199.1672	145.6000			53.5672
 Prumer_135,9	138.8818	135.9000			2.9818
 Úhel 60	60.0087	60.0357			-0.0270
 Prumer 130	65.0011	65.0000			0.0011
 Dira_2,5	2.4803	2.5000			-0.0197
 Prumer 160	80.0487	80.0552			-0.0065
 Úhel díry pro sroub	60.0068	60.0329			-0.0260
 Prumer_2,5	2.5098	2.5000			0.0098
 Úhel 30	30.1334	30.1458			-0.0123
 X hod_55,4	-55.4435	-55.4000			-0.0435
 Prumer_123,8	123.6757	123.8000			-0.1243
 Prumer 122,3	120.1132	122.3000			-2.1868
 Prumer_133,5	133.8727	133.5000			0.3727
 X hod_43	-43.3973	-43.4000			0.0027
 X hod_49,5	-49.4465	-49.5000			0.0535
 X hod_10,5	-10.4989	-10.5000			0.0011

Obrázek 62: Výstupní protokol měření na CMM

Celkem bylo tedy naměřeno 23 charakteristik, měření trvalo 5 minut a 26 sekund. U dvou rozměrů došlo k výrazným odchylkám oproti předpokládané nominální hodnotě. U průměru 145,6 mm evidentně došlo k volbě špatné strategie měření. Vliv mohlo mít i upnutí součásti, které nedovolilo měřit vnitřní průměry po celém obvodu. Záporné hodnoty u některých délek jsou určeny orientací souřadného systému.

4.3 Digitalizace pomocí konturografu

Pro digitalizaci byl použit konturograf od firmy Mahr s označením MarSurf LD 120 (na obr.63), jedná se o zařízení dostupné v laboratořích Fakulty strojní ČVUT. Konturograf může být využit pro měření kontur, měření drsnosti povrchu a pro potřeby topografie či editace profilu. Cílem měření na konturografu je získání informace o vnitřních osazeních náboje, které bylo velice obtížné změřit pomocí souřadnicového měřicího stroje a z dat získaných pomocí výpočetní tomografie není hodnota malých osazení jednoznačná. Pomocí konturografu lze získat křivku (konturu) reprezentující profil součásti. Z této křivky je možné odečíst žádané hodnoty, a to buďto rovnou v pracovním prostředí konturografu (software MarWin) nebo poté v CAD programu.

Zároveň je třeba zmínit, že pokud by byl profil náboje složitější, pak by byl konturograf velice vhodnou metodou pro získání křivky reprezentující povrch součásti. Tuto křivku by bylo možné například rotovat či vysunout v CAD softwaru a získat tak kýžený objekt.

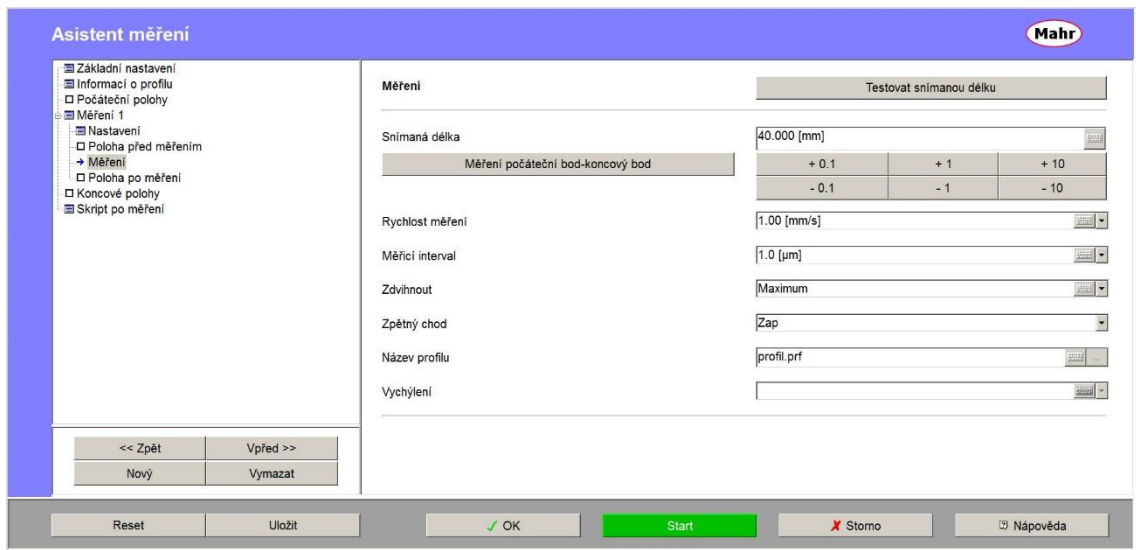
Na obrázku níže je zároveň patrné upnutí součásti, je vhodné, aby součást byla nakloněna tak, aby snímací systém při pohybu v ose X zároveň mírně stoupal v ose Z. Výsledný profil se poté vyrovná v softwaru MarWin.



Obrázek 63: Konturograf MarSurf LD 120 od firmy Mahr

Pro měření byl použit již kalibrovaný měřicí snímač s rozsahem (-12,91 – 13,10 mm). Při umísťování snímače do konturografu a najetí směrem k bodu reprezentujícímu začátek snímání je třeba tuto hodnotu kontrolovat (jedná se o hodnotu výchylky snímače v ose Z). Osa X reprezentuje vysunutí snímače a její hodnota je zobrazena přímo na stupnici konturografu. Vzhledem k válcovitému tvaru vnitřku součásti je nutné zajistit, abychom konturu měřili v co nejnižším bodě (bod reprezentující vrchol kulového vrchlíku), toto zajistíme najetím do co nejnižší hodnoty Z.

Pro zpuštění programu je třeba využít asistenta měření v programu MarWin a spustit měření kontury (možnosti nastavení zobrazeny na obr. 64).



Obrázek 64: Možnosti nastavení asistenta měření kontury

Měření bylo potřeba provést ve dvou směrech, tak aby snímač vždy mírně postupoval ve směru osy Z vzhůru a aby bylo možné odečíst hodnoty vnitřní kontury na obě strany. Příklad obou upnutí je na následujících obrázcích.

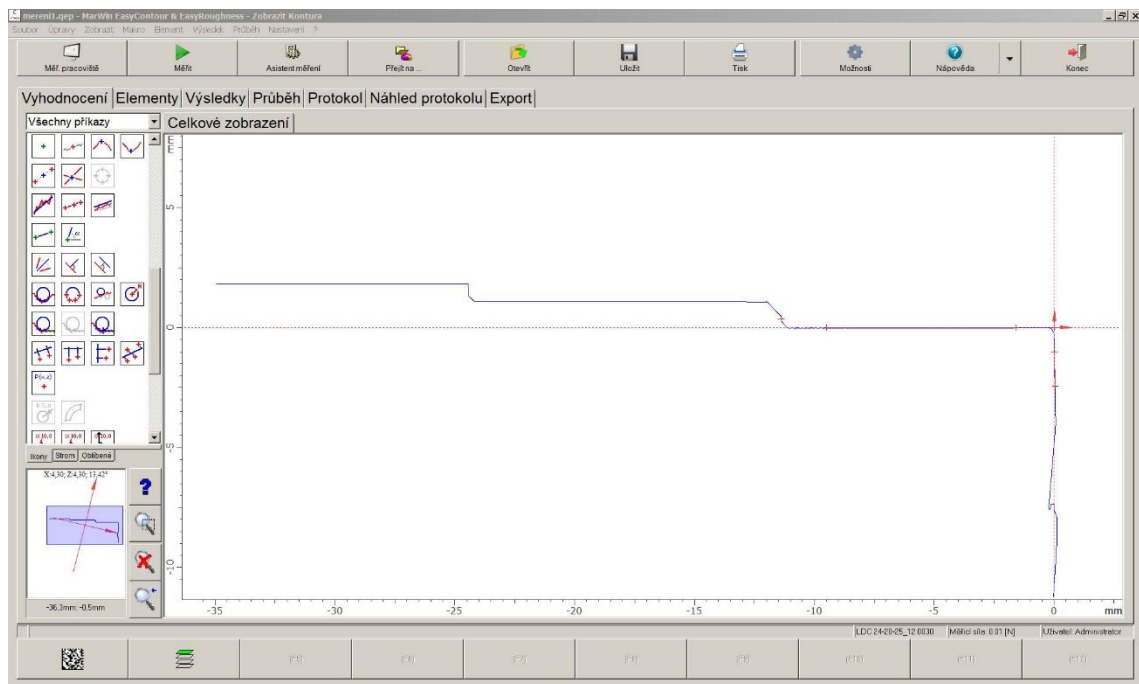


Obrázek 65: Upnutí součásti pro první měření

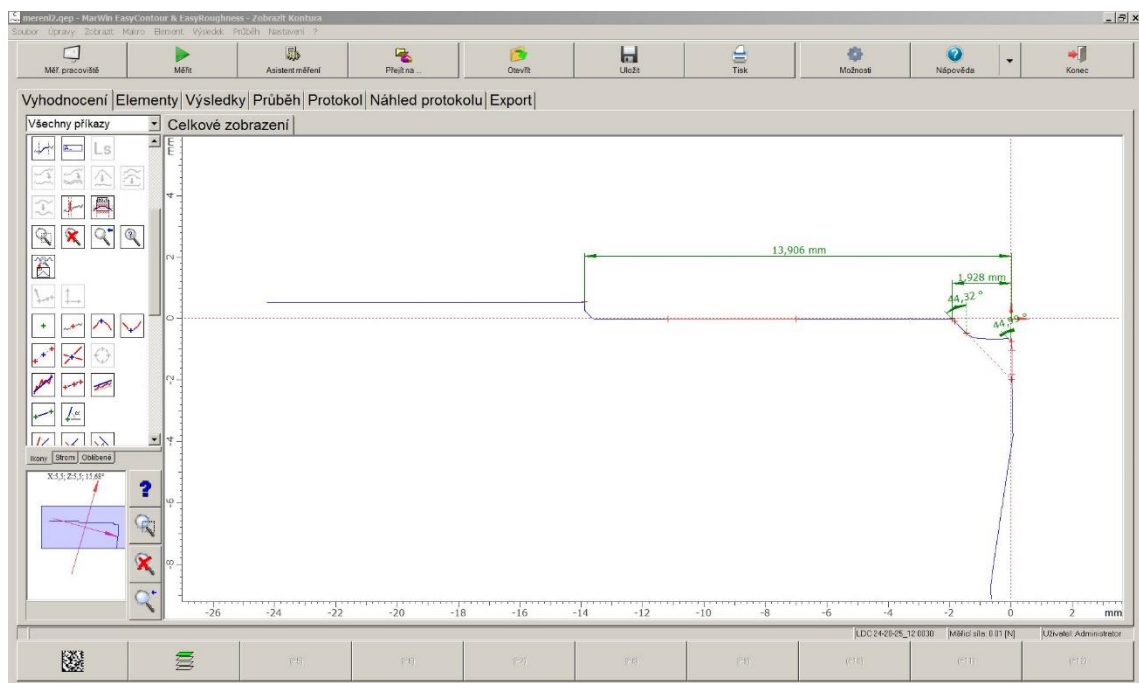


Obrázek 66: Upnutí součásti pro druhé měření

Výsledná kontura s již určeným souřadným systémem a směry os je na obrázku 67, pomocí příkazů v levé části obrázku je možné naměřit požadované délkové rozměry, ale i hodnoty zkosení atd. (viz obrázek 68).



Obrázek 67: Vyrovnaný profil naměřené kontury



Obrázek 68: Profil kontury doplněný o rozměry přímo v programu MarWin

Pomocí konturografu byly určeny rozměry:

- Osazení ve vzdálenosti 1,928 mm od vrchní roviny náboje, doplněné dvěma zkoseními 44,99° a 44,32°
- Délka rozměru pro lisování ložisek $13,906 - 1,928 = 11,978$ mm
- Vzdálenost osazení od spodní roviny náboje 24,431 mm
- Vzdálenost bližšího osazení od spodní roviny náboje 11,510 mm

Hodnoty získané pomocí souřadnicového měřicího stroje a konturografu slouží ke zpřesnění rozměrů modelu, který je výsledkem reverzního inženýrství náboje. Pomocí výpočetní tomografie byl získán model ve formátu STL, aby bylo možné přesnější naměřené hodnoty do tohoto modelu aplikovat, je třeba model parametrizovat, čili převést do formátu upravitelného v CAD jako například formát Step.

Právě parametrizace je obsahem další kapitoly, jedná se o závěrečný krok v celém procesu reverzního inženýrství. Po parametrizaci je již možné přikročit k úpravám modelu a k případné výrobě.

5 Převod dat do upravitelného formátu

Při práci s trojúhelníkovou sítí přicházejí pro převod dat do upravitelné formy v úvahu dva postupy. Prvním postupem je využití funkcí programů umožňujících práci s trojúhelníkovou sítí. Mezi tyto programy patří například Autodesk Fusion 360 a Autodesk Meshmixer. Další programy jako SolidWorks či Creo neumějí trojúhelníkovou síť upravit, ale obsahují funkce pro její převod do formátů podporovaných v těchto CAD softwarech. Druhým postupem je cesta klasického reverzního inženýrství, kdy je ze získaných dat (ať už objemových dat z CT či hodnot jednotlivých rozměrů z CMM) model součásti přemodelován. Při tomto procesu dochází k definici přesně určených tvarových ploch v CAD softwaru. V této práci byly experimentálně vyzkoušeny oba postupy.

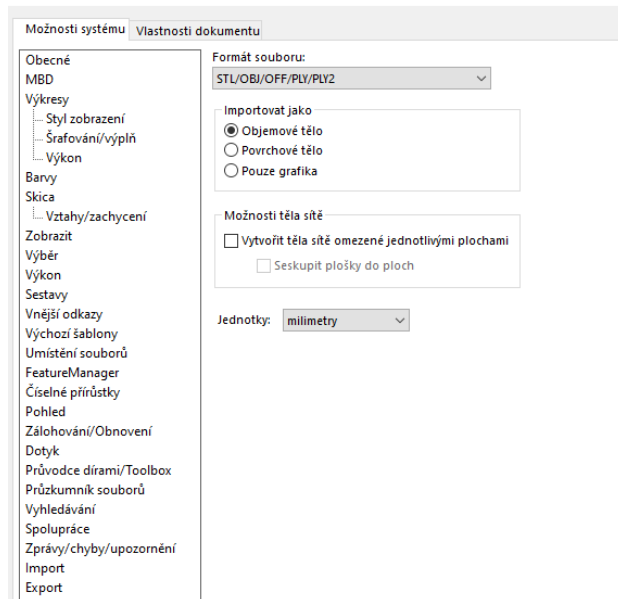
5.1 Použití automatické konverze dat

5.1.1 SolidWorks 2019

Prvním programem, který mezi svými funkcemi má funkci převodu dat ve formátu STL do formátu Step je software SolidWorks 2019 od společnosti SolidWorks Corporation. Jedná se o 3D CAD software, který je v průmyslu běžně využíván jako nástroj konstruktérů pro práci s modely a k tvorbě výkresové dokumentace.

Při nahrávání STL souboru do systému je třeba otevřít odkaz možnosti a zvolit možnost importovat jako objemové tělo (viz obr. 69). Jakákoliv jiná volba by tento formát souboru importovala jako grafiku, tudíž by nebylo možné model dále upravovat.

Software SolidWorks však nedokáže převést tak velké množství trojúhelníků na objemové tělo. Omezení pro počet trojúhelníků, které software ještě převede je 10 000. Z tabulky 4 (na straně 60) je patrné, že STL náboje obsahuje miliony trojúhelníků. Importovaný model grafického těla náboje v programu je na obr. 70.



Obrázek 69: Možnosti importu formátu STL



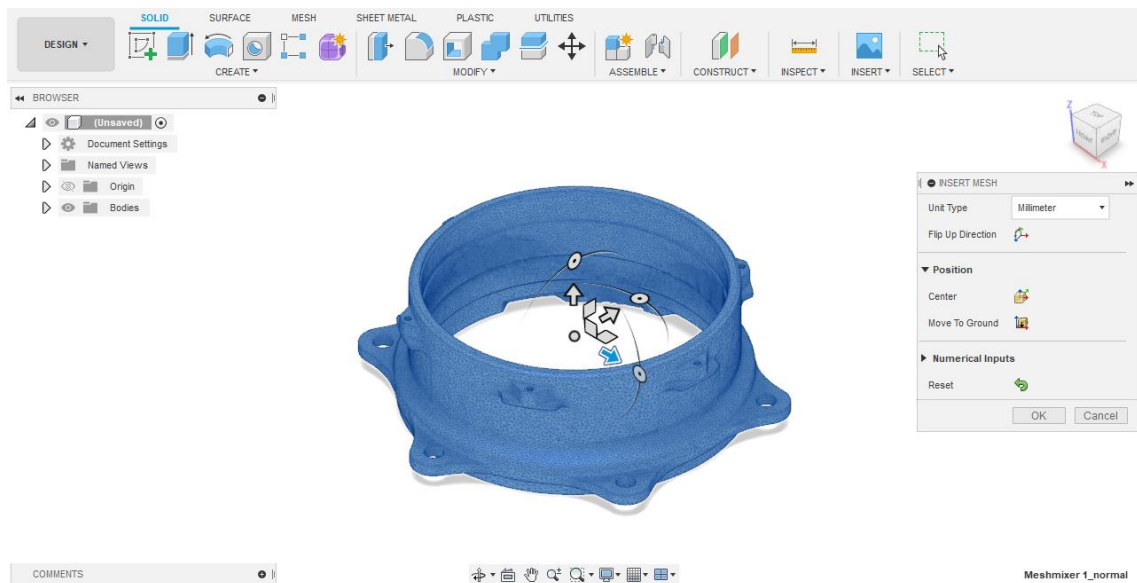
Obrázek 70: Grafika náboje v SW Solidworks

Program SolidWorks tedy lze použít pro převod formátu STL, je ovšem velice omezena velikost importovaného souboru a rozhodně se nejedná o vhodný nástroj pro převod dat z výpočetní tomografie.

5.1.2 Autodesk Fusion 360

Autodesk Fusion 360 je software firmy Autodesk obsahující CAD, CAM a mnohé další funkce. Autodesk Fusion 360 obsahuje v hlavní nabídce kartu Mesh, která nabízí funkce pro práci s trojúhelníkovou sítí.

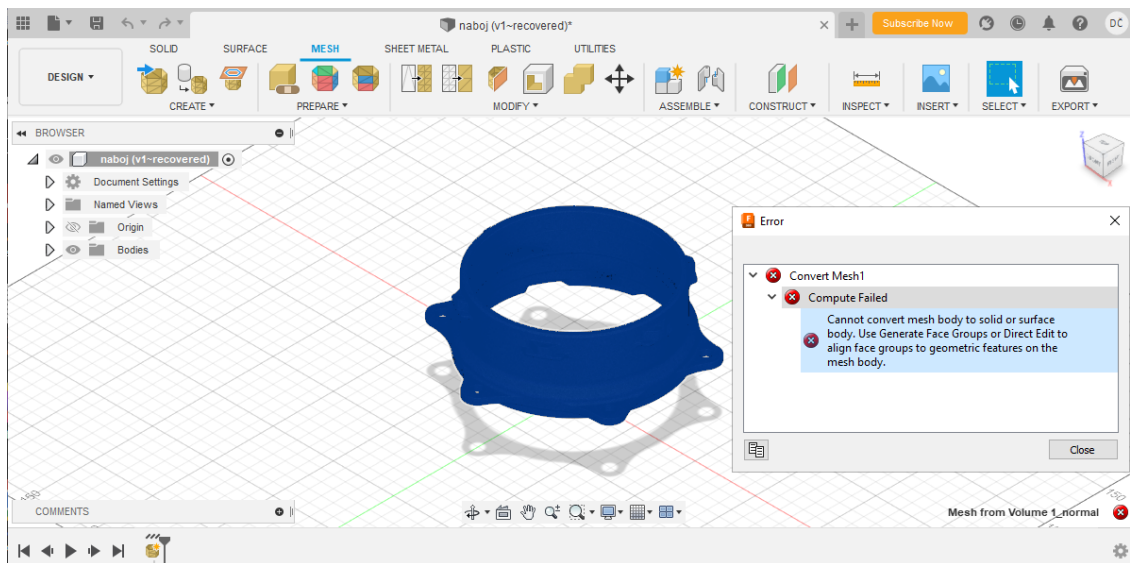
V prvním kroku je potřeba přes funkci „Insert > Insert Mesh“ nahrát model do prostředí programu. Po nahrání modelu je nutné zvolit měřítko a pozici modelu, viz. obrázek 71. V dalším kroku je v záložce „Mesh“ v možnosti „Modify“ zvolena funkce „Convert Mesh“. Funkce konvertuje trojúhelníkové tělo na povrch či pevný objekt.



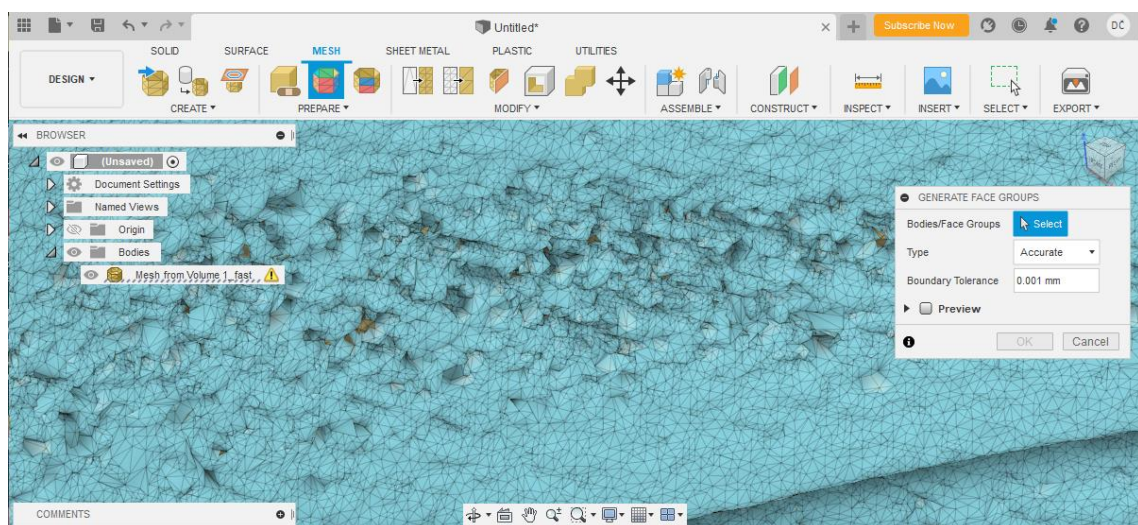
Obrázek 71: Model nahraný do SW Autodesk Fusion 360

Ve funkci „Convert Mesh“ je třeba vybrat tělo, které převádíme a vybrat operaci a metodu pro převod. Ve výběru operace jsou možnosti „Parametric“ a „Base Feature“, rozdílem je zaznamenávání parametrických vztahů mezi konvertovanými objekty v operaci „Parametric“, nicméně operace Base „Feature“ je méně náročná na výpočetní výkon. Ve výběru metody jsou volby „Faceted“ a „Prismatic“ Metoda „Faceted“ převede originální model na formát Step beze změn, zatímco metoda „Prismatic“ slučuje sousední plochy sítě a vytváří jednu plochu formátu Step. Nicméně i software Autodesk Fusion 360 má svá omezení, co se týče počtu trojúhelníků. Software zvládne množství větší než 10 000, nicméně upozorňuje uživatele, že převod dat bude trvat delší dobu.

Ani tomuto softwaru se nepodařilo převést náročné množství dat do formátu Step, viz. obrázek 72.



Obrázek 72: Chybová hláška po snaze převést model do formátu STEP



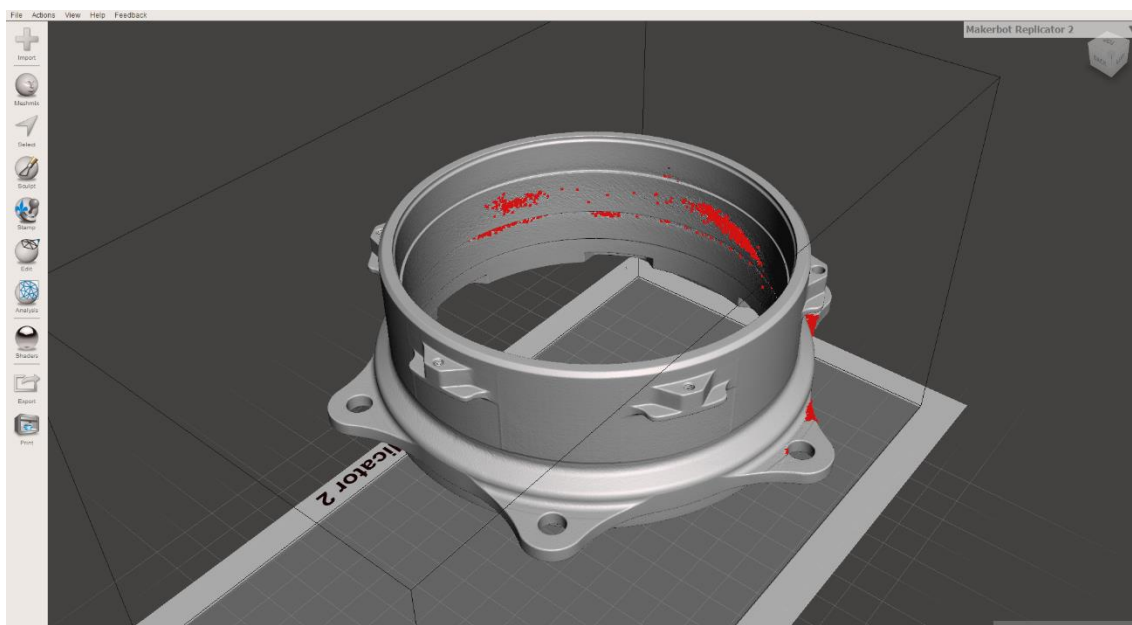
Obrázek 73: Nepřesnost povrchu modelu náboje získaného pomocí výpočetní tomografie

Tento software byl využit pro konverzi dat upravených v programu Meshmixer, ve kterém byla použita funkce redukce trojúhelníků (viz. dále). Program Autodesk Fusion 360 si tedy poradí s převodem dat v řádu desítek tisíc trojúhelníků. Snižování počtu trojúhelníků má však vliv na přesnost modelu. Díky zobrazení trojúhelníkové sítě byly nalezeny nepřesnosti modelu získaného pomocí výpočetní tomografie. Tyto nepřesnosti jsou patrné na obrázku 73. Jedná se o výrazné přiblížení povrchu válcové plochy.

5.1.3 Autodesk Meshmixer

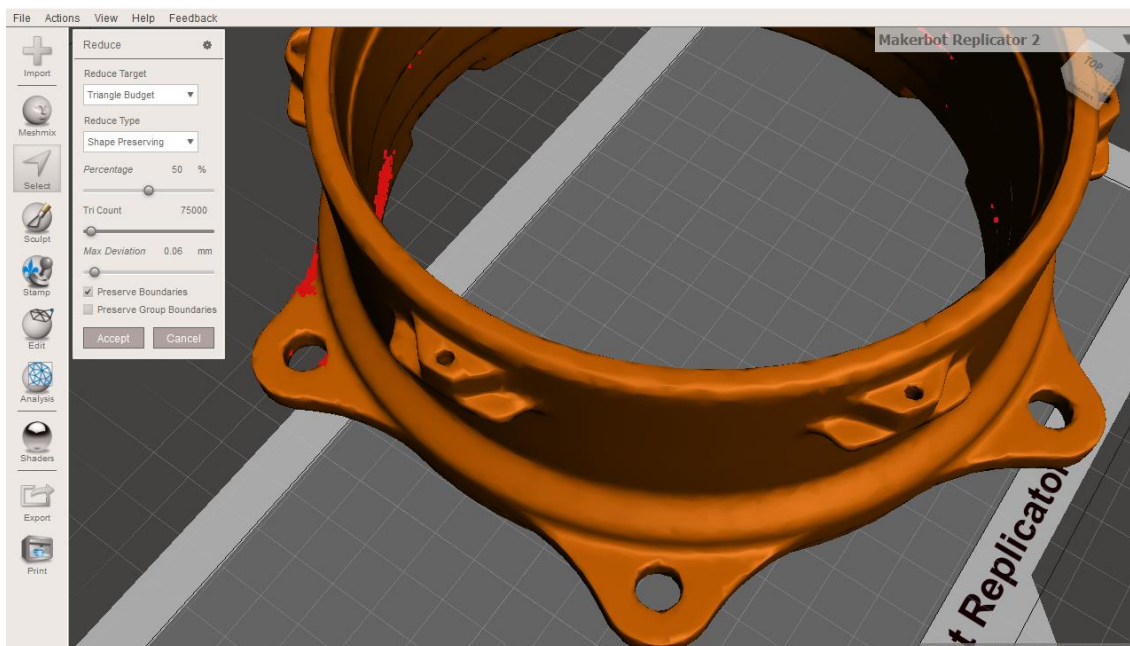
Autodesk Meshmixer je dalším programem od firmy Autodesk. Tento program neslouží přímo k převodu do formátu Step (i když tuto funkci nabízí pro soubory obsahující méně trojúhelníků), ale k úpravám trojúhelníkové sítě.

Pro potřeby této práce byl program využit pro redukci počtu trojúhelníků tak, aby bylo možné využít program Fusion360 pro převod dat. Program Meshmixer zároveň umožňuje zobrazit chyby trojúhelníkové sítě. Na obrázku níže červeně.



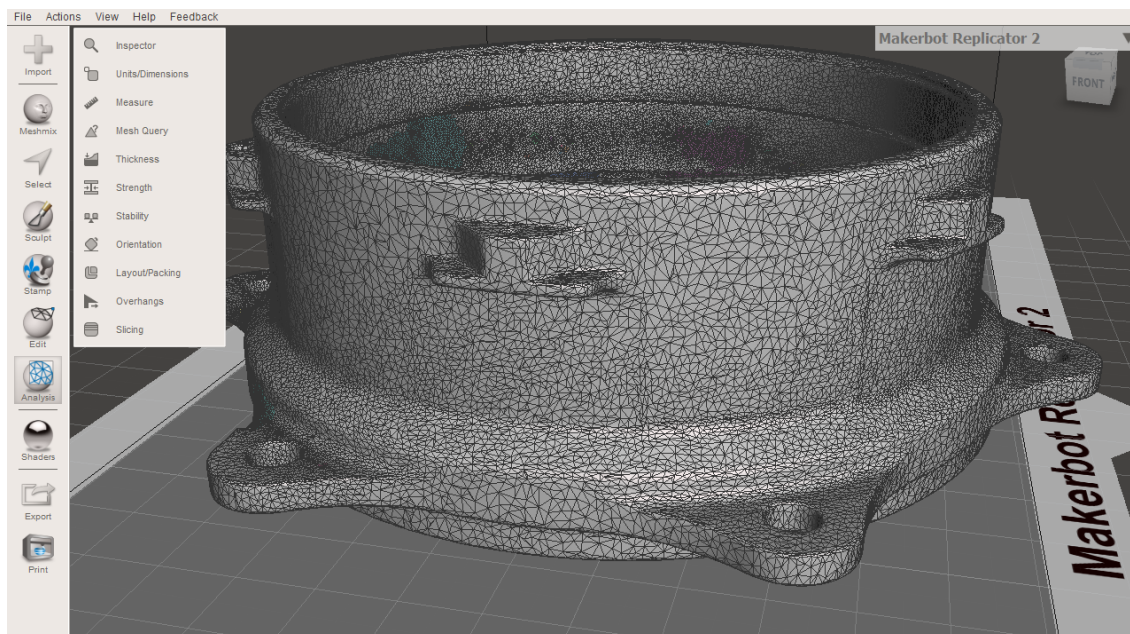
Obrázek 74: Zobrazení náboje v SW Autodesk Meshmixer, červeně jsou zobrazeny chyby modelu

V levém panelu na obrázku 74 je zobrazena volba „Select“, přes tuto volbu lze nalézt funkci „Reduce“ určenou pro snižování počtu trojúhelníků, a tím i velikosti souboru. Funkce umožňuje buďto definovat cílený počet trojúhelníků, či zvolit procentuální poměr současného množství trojúhelníků. Detail náboje s počtem 75 000 trojúhelníků je na obrázku 75. Je zde patrné výrazné snížení kvality oproti původní síti.



Obrázek 75: Vzhled náboje po redukci trojúhelníků

Trojúhelníková síť obsahující 167 434 trojúhelníků je zobrazena na obrázku níže. Toto množství trojúhelníků bylo úspěšně převedeno na formát Step pomocí programu Autodesk Fusion 360. Program Autodesk Meshmixer byl navíc použit pro opravy chyb modelu.

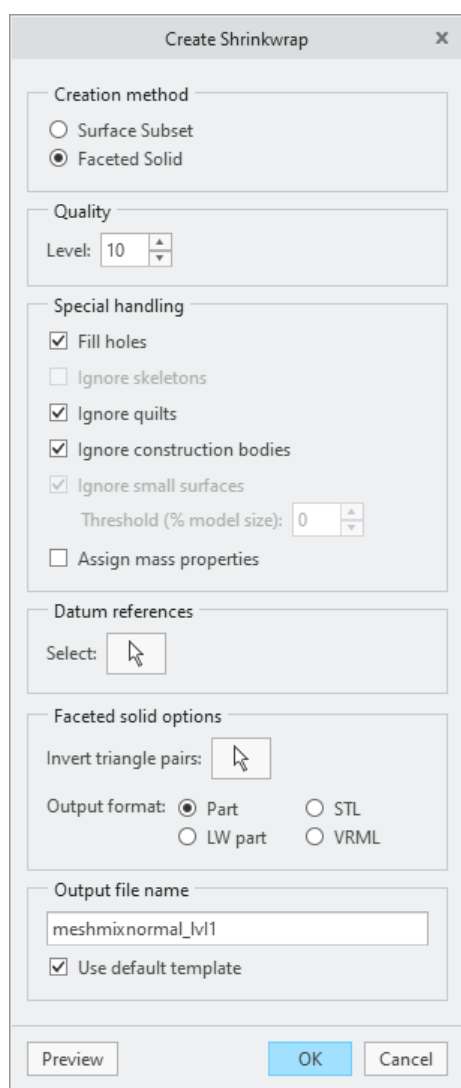


Obrázek 76: Zobrazení redukované trojúhelníkové sítě

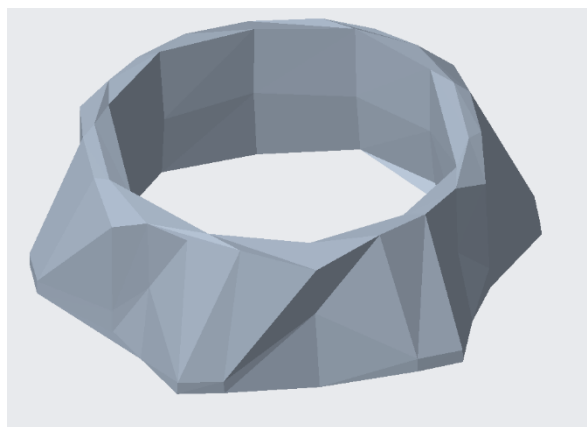
5.1.4 PTC Creo

Posledním softwarem použitým pro konverzi dat je software PTC Creo od společnosti PTC. Creo je jedním z nejčastěji používaných softwarů průmyslovými firmami pro práci s CAD.

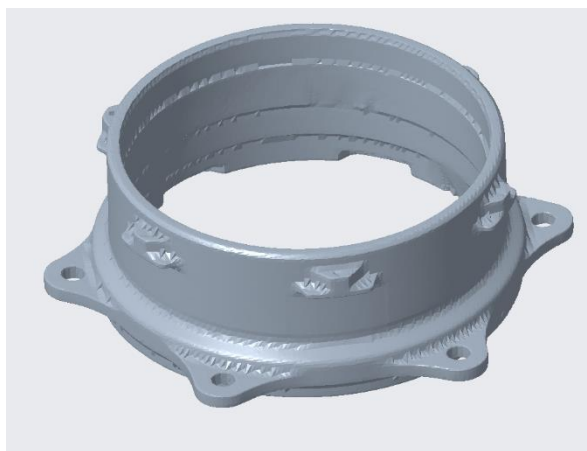
Pro importování modelu ve formátu STL postačí přetáhnout daný soubor do prostředí programu, či využít funkci „Otevřít“ a zvolit soubor v adresáři. Dále je zvolena funkce „Uložit“ a jako typ souboru je vybrán „Shrinkwrap“, tím se otevře nabídka, ve které se nastavují parametry výchozího Step souboru. (viz. obrázek 77). Klíčové je pole Quality určující kvalitu souboru, model vytvořený při hodnotě Level 1 je na obrázku 78, pro hodnotu Level 10 na obrázku 79.



Obrázek 77: Panel nastavení exportu



Obrázek 78: Model s přesností 1



Obrázek 79: Model s přesností 10

Software PTC Creo je schopný převést i vysoké množství trojúhelníků, nicméně kvalita vygenerovaného modelu nedosahuje kvality modelu tvořeného trojúhelníkovou sítí.

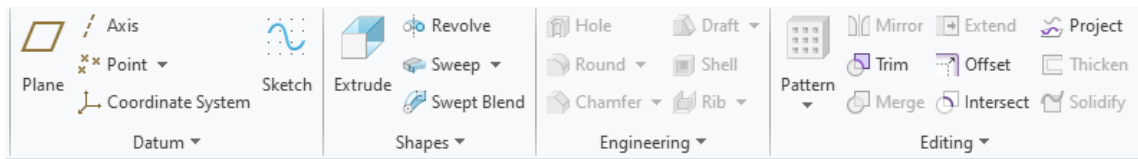
5.2 Přemodelování

Variantou tvorby CAD souboru, který má kvalitu ještě vyšší, než soubor tvořený trojúhelníkovou sítí, je přemodelování modelu. Vzhledem k poměrně jednoduchému tvaru náboje je tato varianta ideálním řešením. Pro vytvoření modelu součásti byl použit software PTC Creo.

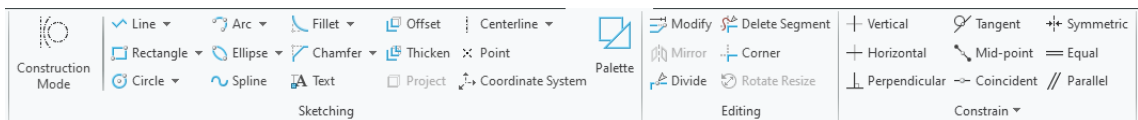
I v případě přemodelování existuje více správných postupů, jak dojít k rozměrově přesnému objektově definovanému modelu. Jedním postupem je naměření STL modelu získaného pomocí výpočetní tomografie, doplnění či zpřesnění rozměrů pomocí naměřených hodnot z CMM a konturografu a následné definování geometrie náboje. Další možností by bylo využití křivek, získaných pomocí CMM a konturografu. Tato metoda by byla vhodná především pro složité součásti. V této práci byl však využit fakt, že soubor formátu STL je možné importovat do CAD softwaru (v tomto případě PTC Creo) jako grafiku. Importem grafiky je získán cílený tvar součásti, který je vhodné využít pro definici geometrií vytvářených elementů.

V softwaru PTC Creo funguje 3D objektové modelování dvěma způsoby. Prvním způsobem je zvolení funkce tvaru, například „Extrude (vysunutí), Revolve (rotace), Sweep (tažení)“ a následná definice geometrie ve skicáři. Druhý způsob spočívá v otevření skicáře pomocí funkce „Sketch“, ve které je třeba definovat geometrii a až následné zvolení funkce. Pro oba postupy je v momentě vstupu do skicáře potřeba určit rovinu skici a referenci. Jako rovina skici může být použita jakákoliv rovina grafického modelu (je nutno jí vytvořit z bodů sítě) či jedna ze tří rovin kartézského systému. Při tvorbě modelu v CAD softwaru je v tomto případě cílem opisování tvarů grafického modelu pomocí funkcí skicáře a následných funkcí tvaru.

Na obrázku 80 jsou zobrazeny funkce tvorby modelu (v okně Tvary „Shapes“) a funkce vstupu do skicáře „Sketch“. Funkce skicáře nabízí obrázek 81.

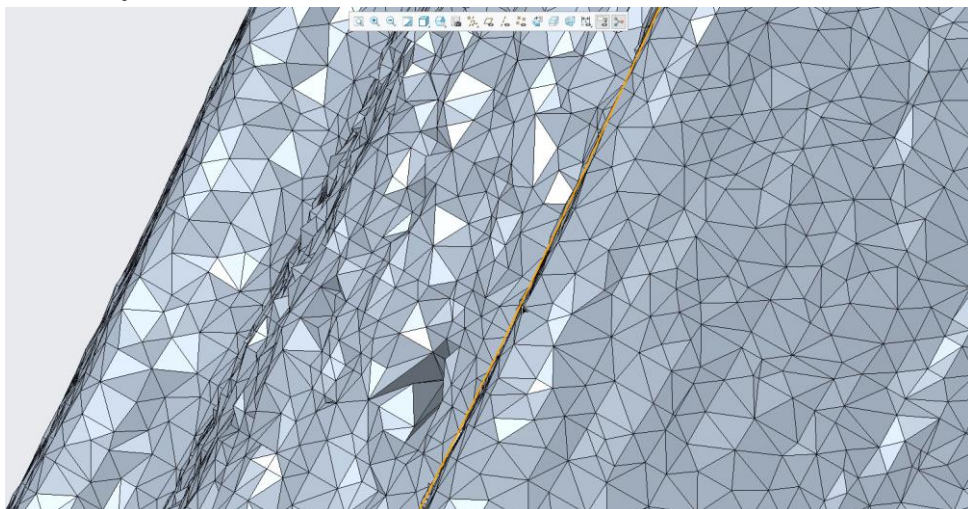


Obrázek 80: Modelářské funkce v programu PTC Creo



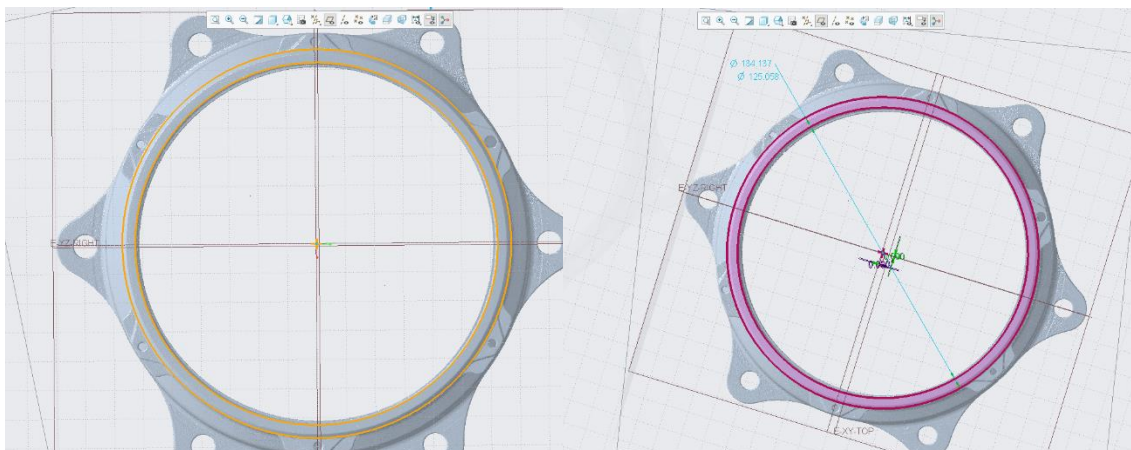
Obrázek 81: Funkce skicáře v PTC Creo

Pro tvorbu modelu byly použity především funkce Extrude a Mirror (díky symetrii součásti). Mezi funkcemi skicáře byla často používanou funkcí funkce kruh „Circle“ (k definici kruhu byla použita jak metoda středu a průměru, tak metoda tří bodů po obvodu kružnice), pro definici složitějších tvarů byla použita funkce křivka „Spline“ a dále funkce čára „Line“ a oblouk „Arc“. Vazby v pravé části obrázku 81 v okně „Constrain“ slouží k definici vazeb mezi prvky geometrie. Na obrázku níže je přiblížena trojúhelníková síť grafického modelu, oranžová část kružnice reprezentuje vytvářenou geometrii, tímto způsobem bylo dosaženo co nejpřesnější „kopie“ grafického modelu náboje.



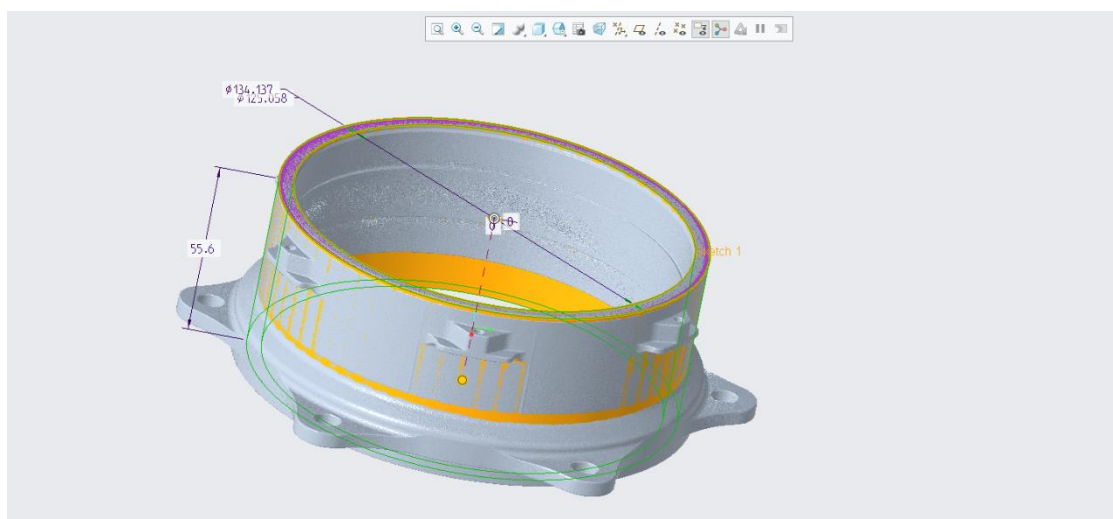
Obrázek 82: Definice geometricky definovaného elementu, žlutě vytvářená hrana

Další postup tvorby tvaru je na obrázcích 83 až 85.



Obrázek 83: Vytvoření skic kružnic

Obrázek 84: Rozměrová definice skici kružnice



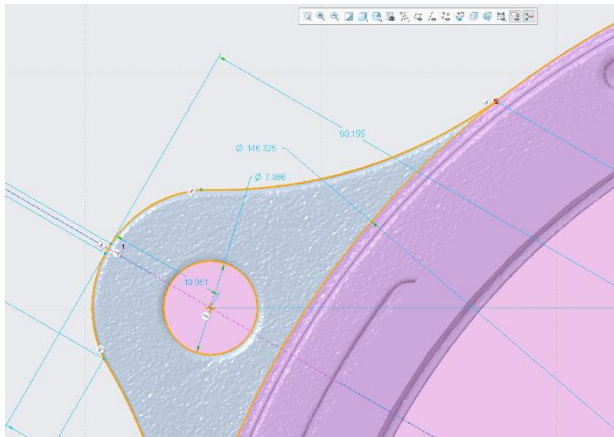
Obrázek 85: Vzhled po potvrzení funkce extrude

Oranžová část na obrázku 85 značí nově vytvořenou geometrii, tato geometrie je správně překryta grafickým modelem náboje. Vytvořením geometrie je zároveň získána informace o rozměrech modelu získaného z CT. Získané rozměry z výše uvedeného postupu jsou:

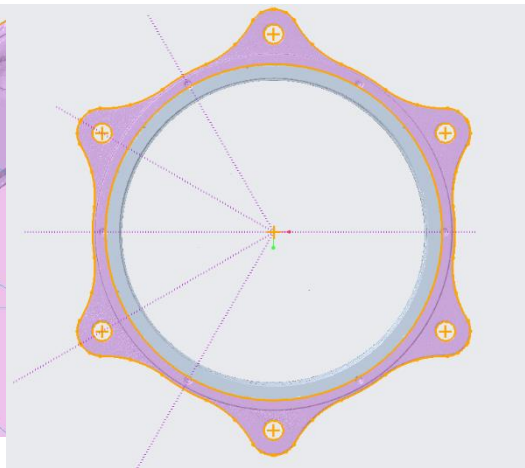
- Výška celého náboje 55,6 mm
- Vnitřní průměr prvního válce od vrchní roviny náboje 125,06 mm
- Vnější průměr dílu 134,14 mm

Definice dalších tvarů náboje probíhá obdobným způsobem.

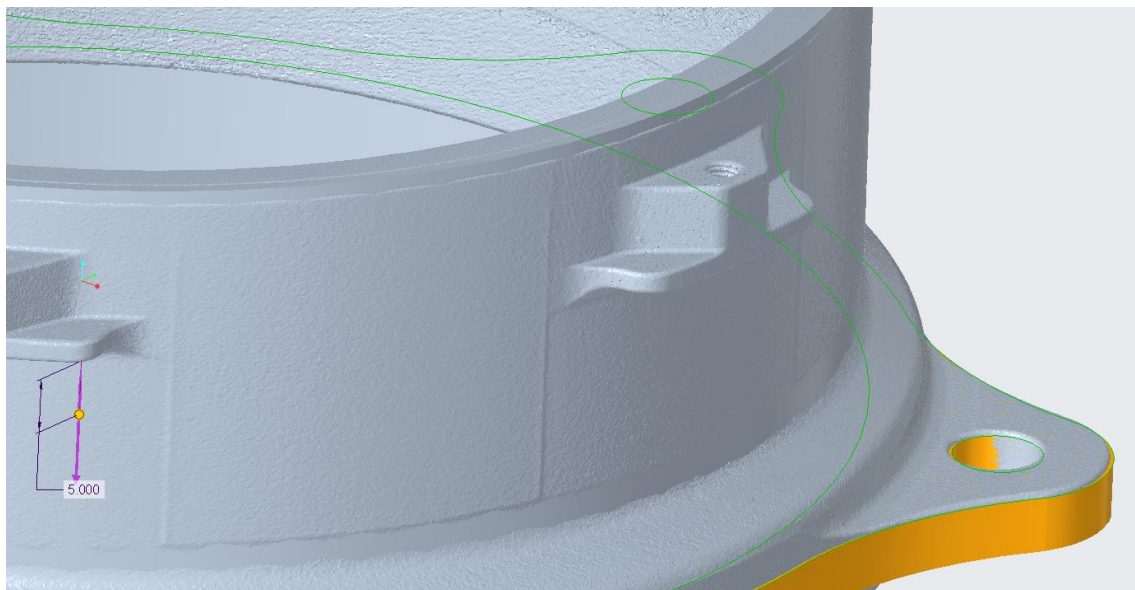
Na obrázcích 86 až 88 je znázorněna tvorba tvaru spodního úchytu náboje, včetně otvoru pro uchycení náboje.



Obrázek 86: Vytvoření skici na grafickém těle úchytu



Obrázek 87: Rozměrová definice geometrie

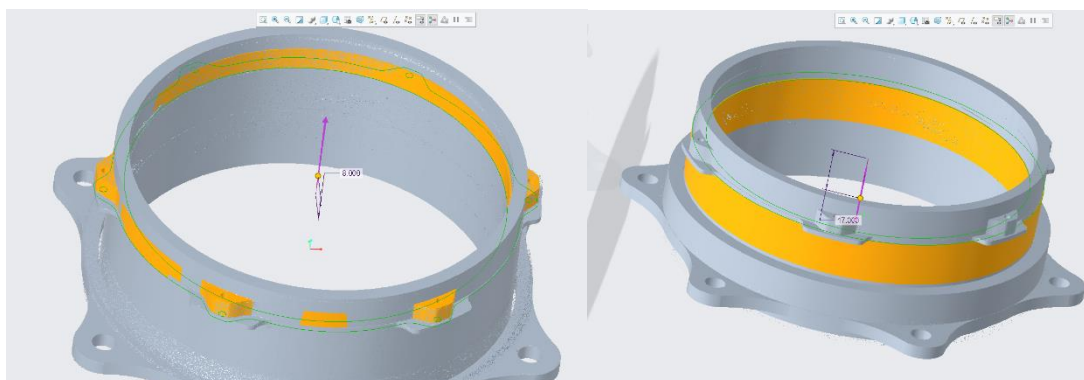


Obrázek 88: Vymodelovaný úchyt

Pro definici tvaru spodního držáku byla použita funkce „Spline“ a následně funkce „Mirror“. Rozměry získané pro tento element jsou:

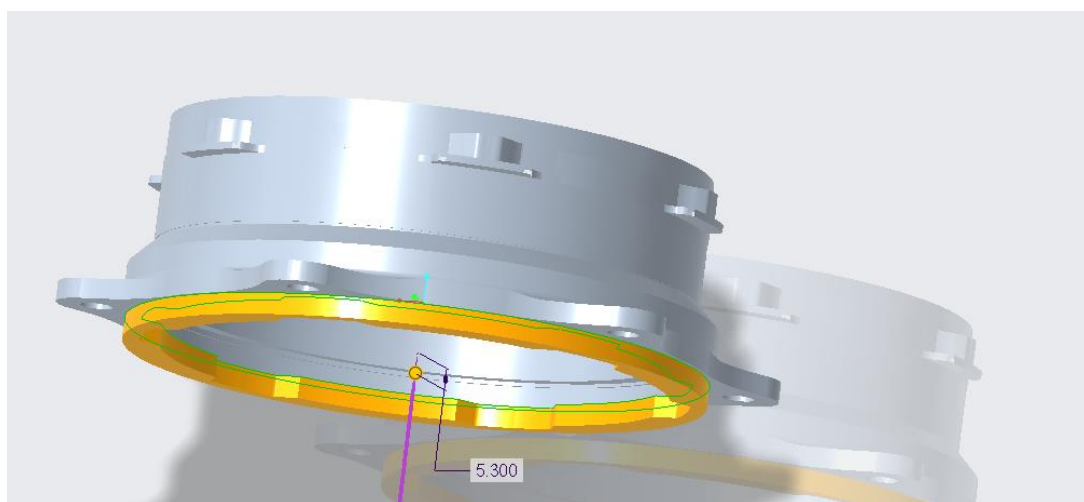
- Průměr otvoru pro uchycení 7,97 mm
- Vzdálenost středu otvoru od vrcholu úchytu 10,05 mm
- Výška úchytu 5 mm
- Průměr části bez úchytů 146,33 mm
- Největší průměr součásti 180,31 mm

Na obrázcích níže je přehled dalších definovaných ploch.



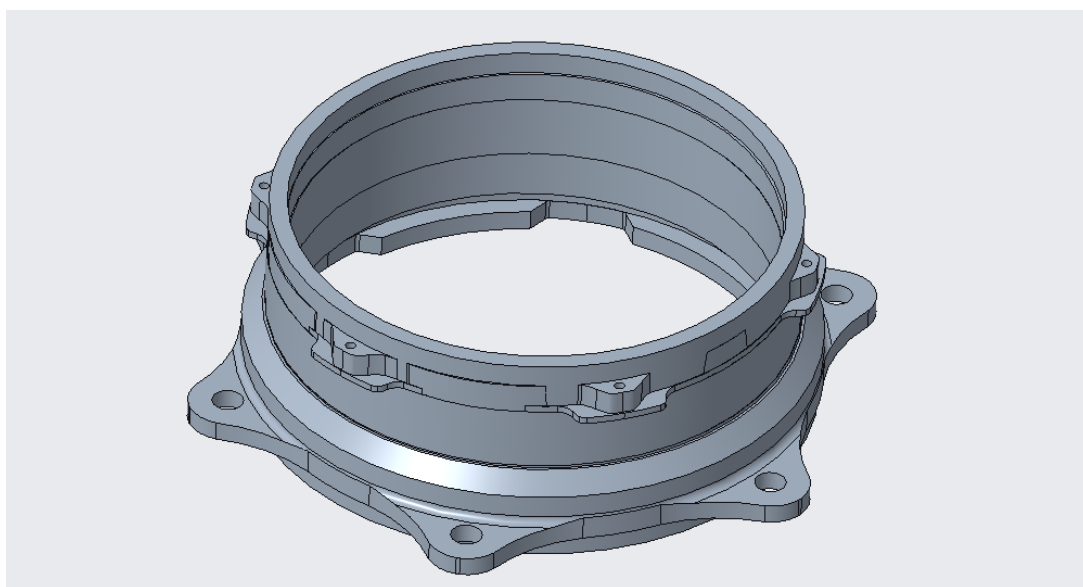
Obrázek 89: Modelování horních výběžků náboje

Obrázek 90: Modelování vnitřních osazení

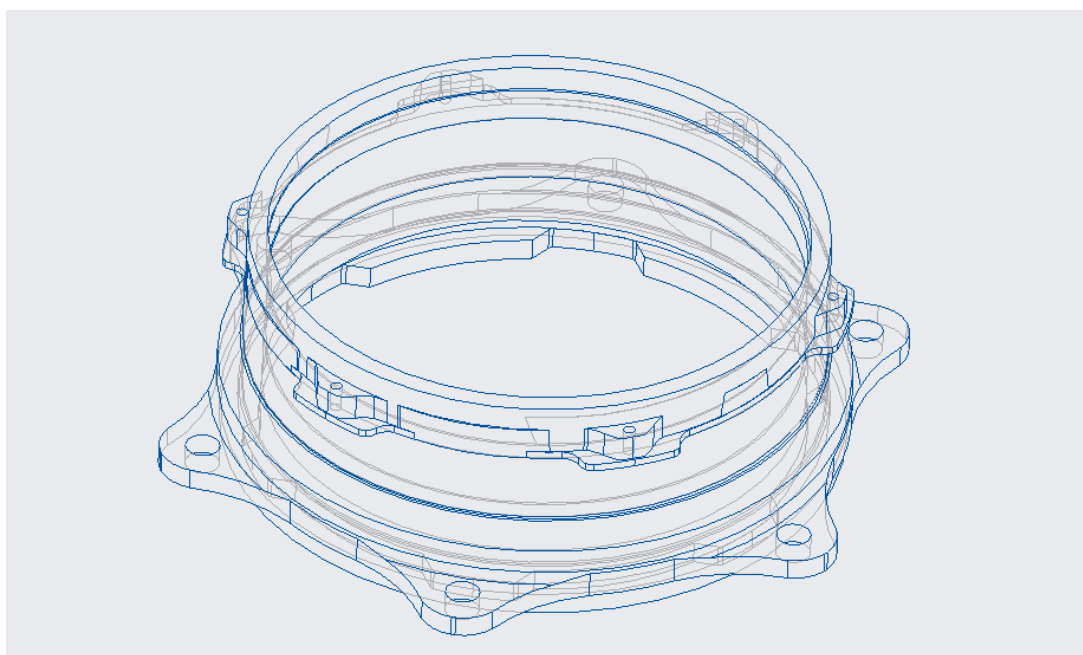


Obrázek 91: Modelování spodní geometrie náboje a děr

Otvory pro šrouby byly vytvořeny pomocí funkce díra „Hole“. Po vytvoření celého modelu je možné grafický model náboje buďto zneviditelnit funkcí „Hide“ či odstranit v modelovém stromě. Na obrázcích 92 a 93 je zobrazen vytvořený model. Model vychází z dat získaných pomocí výpočetní tomografie, pro tvorbu výkresu byly hodnoty jednotlivých rozměrů dále upraveny dle výsledků měření na souřadnicovém měřícím stroji a konturografu.



Obrázek 92: Vytvořený model náboje ve formátu STEP



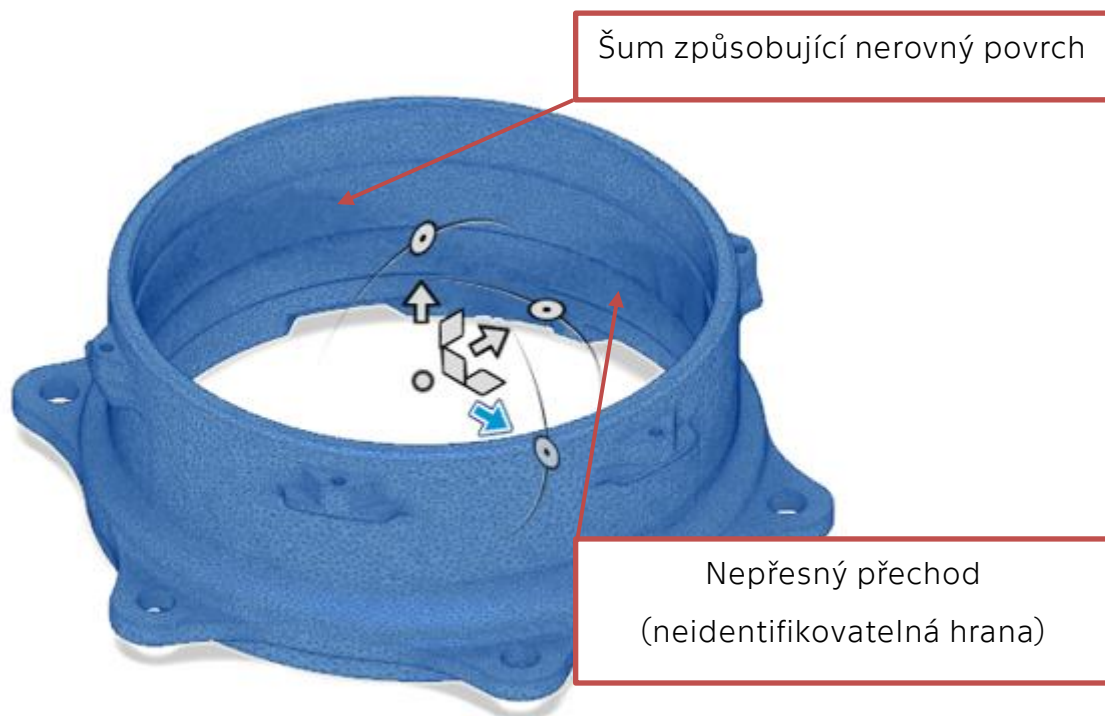
Obrázek 93: Vytvořený model náboje ve formátu STEP v drátěném řezu

Porovnání získaných rozměrů je předmětem kapitoly „Vyhodnocení a diskuse“, finální model náboje byl exportován ve formátu STEP o velikosti 840 kB. Výkres náboje je součástí příloh.

6 Vyhodnocení a diskuse

V praktické části byl úspěšně vytvořen parametrizovaný CAD model náboje a jeho výkres, který je součástí příloh. V prvním kroku reverzního inženýrství, tedy v analýze dílu“ bylo určeno, že pro hliníkový náboj není vhodné použití triangulačních metod. Důvodem je lesklý povrch náboje, který by vedl k nepřesně naměřeným hodnotám. Pokud by byl na povrch náboje aplikován zmatňující sprej, přicházela by v úvahu především technologie pruhové projekce. Tato technologie by byla vhodná pro rekonstrukci povrchu náboje (obdobně jako to bylo v případě CT), navíc by s největší pravděpodobností dosáhla větší přesnosti než průmyslové CT. Naopak výhodou průmyslové výpočetní tomografie je získání informace o vnitřní struktuře náboje. Náboj obsahuje celkem 12 závitových otvorů a 6 otvorů bez závitu, díky vlastnostem tomografie bylo možné přesně určit i hloubku otvorů bez potřeby využití dalších metod akvizice bodů. Náboj byl při analýze dílu rovněž označen za symetrický, přičemž byl vymezen opakující se profil součásti. Tato informace posloužila především při tvorbě plánu měření na souřadnicovém měřicím stroji, kde pro mnoho charakteristik postačilo měření opakujícího se profilu.

Druhým krokem procesu reverzního inženýrství náboje byla již samotná akvizice bodů. Hlavní výhodou využití výpočetní tomografie je rychlost akvizice bodů a již zmíněné získání informace o vnitřní struktuře. Tvorba plánu měření pro CT je podstatně jednodušší než pro dotykové měření. Nicméně každý nastavený parametr ovlivňuje přesnost výstupních dat. Klíčovým momentem pro přesnost celého procesu je polygonizace v programu VG Studio Max. Z tabulky 4 v kapitole 4.1 jsou patrné výrazné rozdíly mezi volbami „Normal“ a „Precise“ při tvorbě trojúhelníkové sítě. Pokud je brána v potaz kvalita a přesnost STL modelu, pak je správná volba detekce kontury a vhodné filtrování bodů při tvorbě trojúhelníkové sítě stejně důležité jako vhodně zvolené parametry při skenování pomocí výpočetního tomografu. I přes snahu nastavit vhodné parametry obsahoval výsledný STL soubor chyby. Tyto chyby povrchu jsou viditelné na obrázku 73



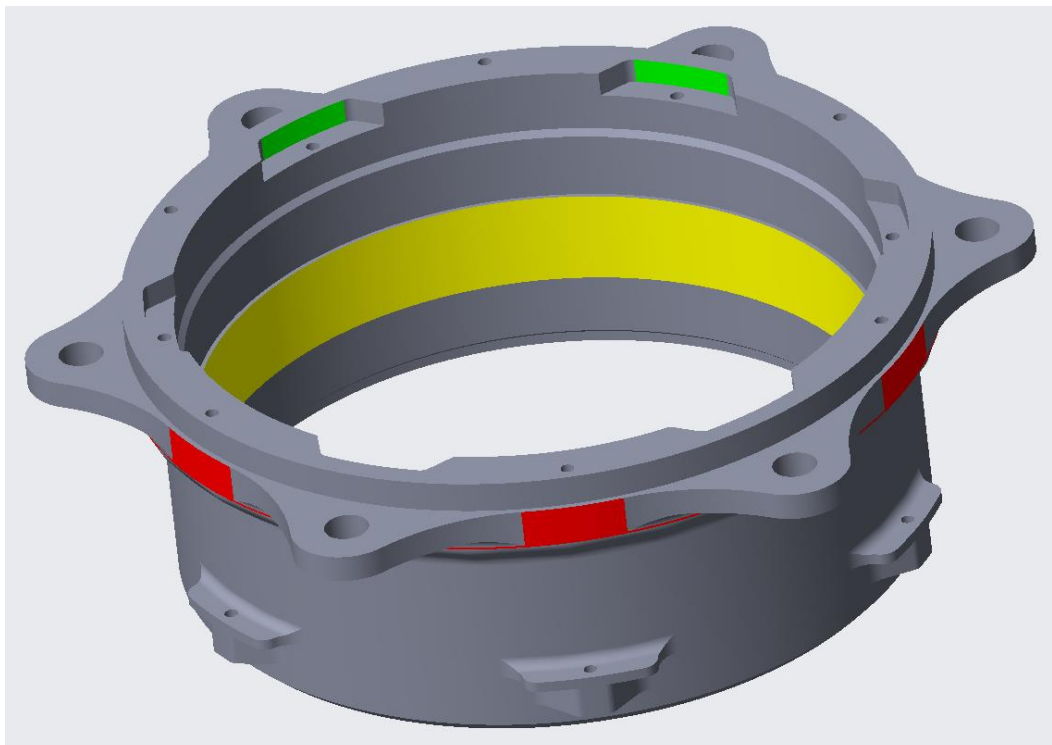
Obrázek 94: Kritika STL modelu získaného průmyslovým CT

v kapitole 5.1.2, či na obrázku 94. Zvýšení kvality STL souboru bylo možné dosáhnout provedením dalšího skenu s pozměněnými parametry (například výměna HW filtru, zapnutí funkce Image averaging atd.). Určitá nepřesnost STL dat oproti reálnému modelu však existuje vždy.

V kapitole 4.2 je detailně popsána akvizice dat pomocí souřadnicového měření. V kapitole je popsán postup tvorby plánu měření s využitím CAD dat, jehož výstupem byla simulace bez kolizí. Protokol ze simulace však nepracuje s reálnými hodnotami, nýbrž z hodnotami modelu (pro reálné hodnoty je nutné program spustit na CMM). Z toho důvodu byla provedena manuální tvorba měřicího plánu pomocí stroje Zeiss Prismo na Fakultě strojní ČVUT. Nevýhodou souřadnicového dotykového měření oproti výpočetní tomografii je rychlost akvizice dat, dále pak vyšší náročnost přípravy plánu měření a také fakt, že výstupem není mrak bodů, ze kterého je možné snadno zrekonstruovat model součásti, ale výstupní protokol obsahující naměřené charakteristiky a případně křivky tvořící povrch náboje. Výhodou souřadnicového měření je bezesporu přesnost získaných dat a oproti CT i menší objem dat. Měření pomocí CMM proběhlo v požadovaném

rozsahu, nicméně průměry 145,6; 135,9 a 122,3 byly naměřeny s výraznými odchylkami od očekávaných nominálních hodnot.

- Průměr 145,6 je průměr zobrazený na obrázku 95 červeně, jedná se o rozměr, který byl velice obtížně měřitelný, jelikož pro kruhovou dráhu bylo možné využít pouze malý úsek mezi dvěma rádiusy určujícími tvar spodních úchytů. Tento rozměr je zároveň pouze informativní, jelikož je definován rádiusy úchytů a vnějším průměrem náboje.
- Průměr 135,9 je zobrazen na obrázku 95 zeleně. V tomto případě jde o průměr definující stěnu spodní geometrie dílu. Rozměř bylo opět obtížné získat z důvodu omezené velikosti kruhové dráhy.
- Průměr 122,3 je vnitřní průměr dílu (na obrázku 95 žlutě), který neslouží klisování ložisek. V tomto případě se jedná o špatně zvolenou strategii měření, kvůli upnutí součásti do svěráku nebylo možné urazit celou kruhovou dráhu. Řešením by bylo zvýšit počet snímaných bodů. Odchylka je však natolik výrazná, že se dá předpokládat nekvalitní či nesprávně očištěný povrch fyzického náboje v této části a již zmíněný nízký počet snímaných bodů.



Obrázek 95: Kritika výsledného protokolu získaného pomocí CMM

Rozměry, které byly pomocí souřadnicového měření získané nepřesně je možné nahradit rozměry získanými pomocí výpočetní tomografie.

Ani metoda souřadnicového měření není uzpůsobena pro měření všech rozměrů součásti. Z toho důvodu byla malá osazení na vnitřku náboje změřena konturografem. Získané rozměry jsou uvedeny v kapitole 4.3 a jsou rovněž součástí výkresu.

Pro aplikaci získaných rozměrů do modelu součásti je potřeba model parametrizovat, což je poslední krok reverzního inženýrství. Je třeba zmínit, že parametrizace STL modelu získaného pomocí výpočetní tomografie byla velice náročná na výpočetní výkon. Všechny softwary uvedené v kapitole 5.1 navíc nebyly schopny pracovat s miliony trojúhelníků. Jediným softwarem uvedeným v této práci, který dokázal množství trojúhelníků převést je PTC Creo. Výsledný model je však značně zjednodušený a nedosahuje přesnosti STL modelu. Přínosem práce v této části je uvedení programů, které umějí převést menší množství trojúhelníků jako např. PTC Creo, Autodesk Fusion 360 či Solidworks. Další možností parametrizace je redukce počtu trojúhelníků. K tomu byl v kapitole 5.1.3 použit software Autodesk Meshmixer. Pro tento typ jednoduché součásti je však nejlepším postupem získání parametrického modelu jeho přemodelování. Princip a postup přemodelování je uveden v kapitole 5.2.

Práce krom reverzního inženýrství náboje nabízí i možnosti využití jednotlivých technologií akvizice bodů či práce s daty pro tvarově složitější součásti. Příkladem může být návrh rotování křivky získané konturografem a export křivek z programu Calypso 2020.

Kombinací jednotlivých technologií byly získány všechny rozměry potřebné ke tvorbě modelu a výkresové dokumentace.

Srovnání přesnosti CMM a CT

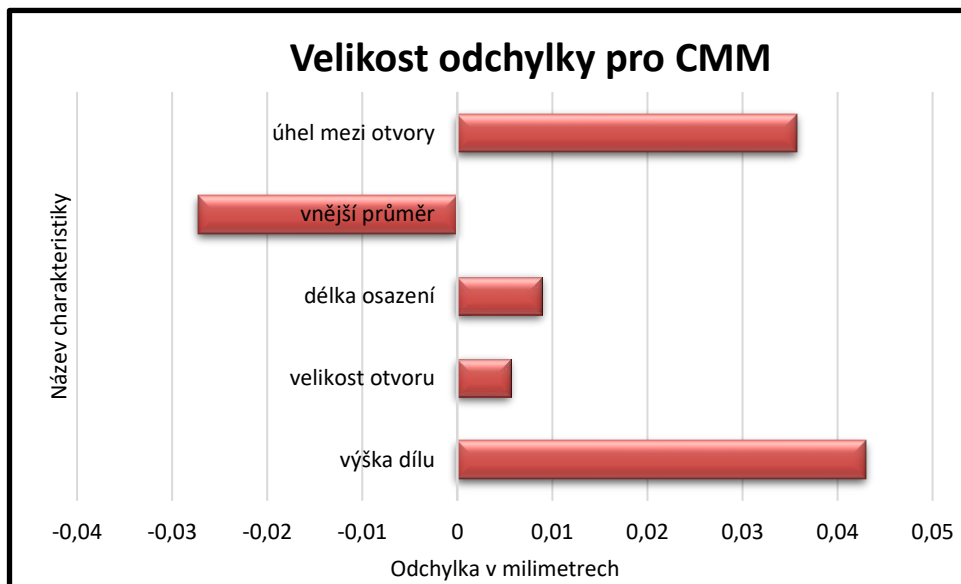
Vytvořený CAD model, jak je patrné z postupu praktické části práce, vycházel z hodnot naměřených pomocí výpočetní tomografie. Tyto hodnoty byly doplněny o data z CMM a konturografu. Tímto logicky vznikla duplicitní data, která byla použita pro porovnání obou metod.

Prvním příkladem může být celková výška dílu. Nominální hodnota této výšky je 55,4 mm. Hodnota získaná pomocí CMM 55,443 mm, pomocí CT pak 55,6 mm. Odchylka od jmenovité hodnoty je tedy 0,043 mm pro dotykové měření a 0,2 mm pro výpočetní tomografii.

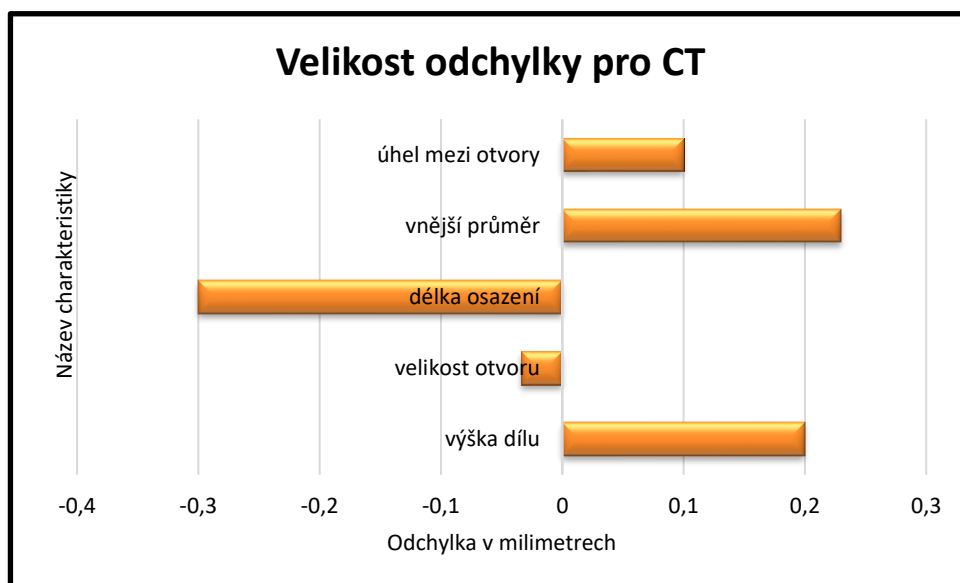
Důležitým rozměrem pro funkci náboje je velikost otvorů pro šrouby. Nominální hodnota této charakteristiky je 8 mm. Pomocí dotykové metody CMM byla zjištěna hodnota 8,0056 mm (odchylka 0,0056 mm). Pomocí CT pak 7,966 mm (odchylka 0,034 mm). Pokud je počítáno s přesností použitého souřadnicového měřicího stroje v řádu jednotek až desítek mikronů, pak můžeme hodnotu zaokrouhlit na 8,006 mm. CT by mělo za použitých podmínek dosahovat přesnosti o řád nižší, získanou hodnotou je tedy 7,97 mm.

Dalšími hodnotami vybranými pro porovnání metod byla výška osazení roviny spodní díry s nominální hodnotou 5,6 mm a vnější průměr náboje s nominální hodnotou 133,9 mm a úhel mezi otvory pro šrouby s hodnotou 60°. (Nominální hodnoty byly získány od týmu eForce FEE Prague Formula). U všech rozměrů byla blíže k nominální hodnotě metoda CMM.

Průměrná odchylka od nominální hodnoty těchto pěti vybraných rozměrů byla 0,024 mm pro souřadnicové dotykové měření a 0,173 mm pro výpočetní tomografii. Odchylky reprezentují vyšší nepřesnost, než uvádějí výrobci skenovacích metod. Významný vliv má však nepřesná výroba fyzické součásti, možné poškození a úbytek materiálu součásti a v neposlední řadě vliv okolního prostředí. Konkrétní velikosti odchylek jsou zobrazeny na grafech 1 a 2 níže.



Graf 1: Znáznornění velikosti odchyly od nominální hodnoty pro CMM



Graf 2: Znáznornění odchyly od nominální hodnoty pro CT

Pro použití dat ve výkresové dokumentaci bylo nutné naměřené hodnoty zaokrouhlovat. Ve výrobních výkresech se u rozměrů, od kterých není vyžadována vysoká přesnost uvádí maximálně 1 desetinné místo. Ve většině případů jsou však hodnoty rozměrů zaokrouhlovány na celé milimetry. Zaokrouhlení bylo provedeno i pro výrobní výkres v příloze této práce, nicméně například hodnoty z velice přesného konturografu byly

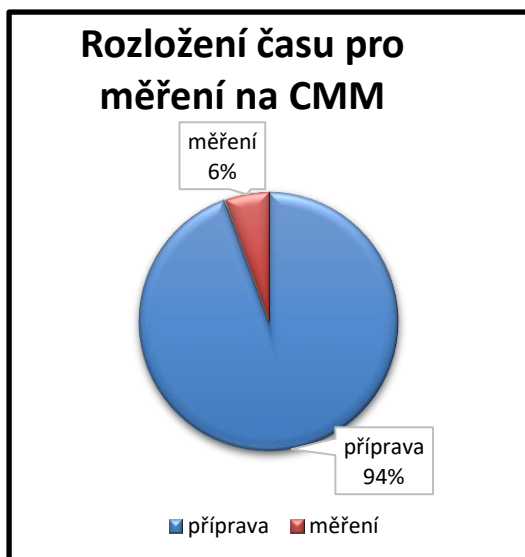
zaokrouhleny hned na 2 desetinná místa. Pro reverzní inženýrství náboje za účelem jeho přesné rekonstrukce je možné hodnoty takto nechat. Pro sériovou výrobu náboje by bylo jednoznačně na místě zvážit další drobná zaokrouhlení.

Porovnání metod z hlediska času

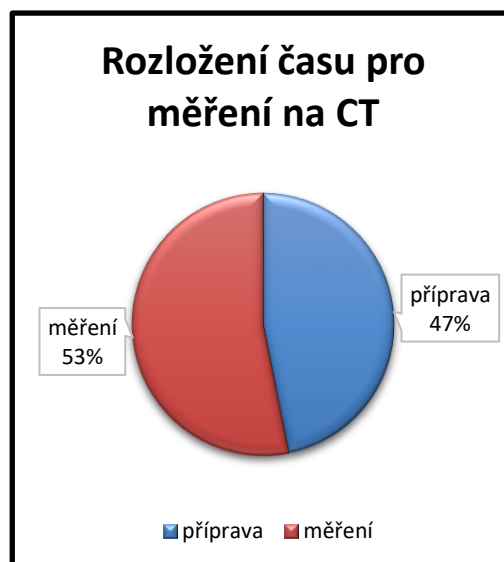
Metody je možné porovnat i z hlediska času. Metoda počítačové tomografie je efektivnější ve významu množství nasnímaných bodů za jednotku času. Příprava měření pomocí výpočetní tomografie obsahovala určení vzdálenosti náboje od zdroje, nastavení a optimalizaci parametrů, přípravu uchycení a samotný start programu. Tato nastavení souhrnně trvala přibližně 30 minut. Samotné měření na CT pak trvalo 34 minut. To znamená, že pomocí výpočetní tomografie bylo dosaženo mraku bodů za 1 hodinu a 4 minuty.

Oproti tomu příprava měřícího plánu na souřadnicovém měřícím stroji byla podstatně náročnější. Příprava obsahovala upnutí součásti, volbu a kalibraci snímače, definici měřených elementů, nastavení vyrovnání a souřadného systému součásti, nastavení stroje a bezpečnostního kvádru. Odhadnutý čas od začátku přípravy po spuštění simulace je 1 hodiny 30 minut. Samotné měření poté zabralo pouze 5 minut. Celková odhadnutá doba po generování výstupního protokolu s naměřenými hodnotami je tedy 1 hodiny 35 minut.

Měření pomocí souřadnicového měřícího stroje bylo časově náročnější než měření pomocí CT, a to především kvůli komplikované tvorbě plánu měření, konkrétně kvůli nutnosti definovat charakteristiky.



Graf 3: Rozložení času pro měření na CMM



Graf 4: Rozložení času pro měření na CT

Následná polygonizace dat z výpočetní tomografie byla náročná především na výpočetní výkon. Vygenerování tří trojúhelníkových sítí trvalo i s nastavením, vyrovnaním a exportem dat 40 minut.

Dalším krokem, který je možné porovnat z hlediska času je parametrizace. K parametrizaci bylo v této práci přistoupeno dvěma způsoby. Zprvé přemodelováním STL souboru v prostředí softwaru PTC Creo. Toto přemodelování trvalo odhadem 3 hodiny, a to především kvůli absenci jasných hodnot jednotlivých geometrií (geometrie musela být vytvářena podle polygonové sítě). Zadruhé pomocí softwarů určených pro práci s trojúhelníkovou sítí. Práce v programech Autodesk Fusion 360, Autodesk Meshmixer a Solidworks trvala v řádech hodin, jelikož žádný ze zmíněných softwarů není uzpůsobený pro práci s miliony trojúhelníků. Redukce počtu trojúhelníků v Autodesk Meshmixer a následný převod do formátu step pomocí Autodesk Fusion360 trval přibližně 2 hodiny. Pomocí softwaru PTC Creo byl převod hotov přibližně za 10 minut. Kvalita generovaných souborů však nedosáhla kvality (přesnosti) přemodelovaného souboru.

Rychlost procesů parametrizace tedy výrazně závisí na výpočetním výkonu používaného počítače. V tomto případě byla sice rychlejší varianta využití

softwarového převodu, nicméně cesta přemodelování vedla zaručeně ke kvalitnímu výsledku.

Měření pomocí souřadnicového měřicího stroje trvalo tedy dle odhadu o 31 minut méně. Z grafu 3 je patrné, že naprostou většinu času při tomto měření zabere příprava plánu měření. Dá se předpokládat, že zkušenější obsluha stroje by byla schopna program připravit za 30-40 minut, což by vedlo k výraznému urychlení. Z grafu 4 lze vyčíst, že v případě výpočetní tomografie je velká část doby dána samotným snímáním. Celý proces lze urychlit pouze ve fázi přípravy. Lze předpokládat, že zkušenější obsluha by byla schopna měření na CT připravit za 20 minut. Při použití těchto hodnot je metoda měření na CMM svou rychlostí srovnatelná s metodou CT.

Další prostor pro urychlení celého procesu spočívá v kroku parametrizace. Zkušený konstruktér by daný model zvládl přemodelovat za 30 minut. Jak již bylo zmíněno, je však třeba přihlídnout k objemu dat otevřenému v pracovním prostředí softwaru. Tento fakt vedl k omezení plynulého průběhu modelování.

Závěr

Tato diplomová práce ve své teoretické části úspěšně přibližuje problematiku reverzního inženýrství, jednotlivých metod akvizice bodů a následné práce s daty. V praktické části je tato problematika představena na konkrétním případě reverzního inženýrství náboje do kola studentské závodní formule eForce FEE Prague Formula. Výstupem této práce je upravitelný model zobrazený na obrázcích 92 a 93 v kapitole 5, výrobní výkres součásti a list charakteristik. Výkres a list jsou součástí příloh.

Všechny cíle práce byly splněny:

- V teoretické části byly uvedeny metody získání dat pro reverzní inženýrství, v čele s metodami použitými v praktické části práce, doplněnými o metody pracující na principu optického skenování a triangulace. U jednotlivých metod jsou navíc uvedeny jejich výhody, nevýhody a možné využití v praxi
- Teoretická i praktická část se zabývá přesností získaných dat jednotlivými metodami. V praktické části byla využita kombinace přesných metod souřadnicového měření a konturografu s velice efektivní metodou výpočetní tomografie. U použitých metod jsou navíc uvedeny hlavní vlastnosti či parametry ovlivňující přesnost akvizice dat
- Digitalizaci dat a následným úpravám objemového modelu se věnuje z hlediska teorie teoretická část práce, v praktické části byla pak vyhrazena úpravě objemového modelu celá kapitola 5, která nabízí přehled různých softwarů pro úpravu modelů a uvádí jejich využití.
- V praktické části byla detailně popsána práce s vybranými metodami RE, včetně tvorby plánu měření, akvizice a úpravy dat a vytvoření modelu. Výsledkem je export výkresové dokumentace. Porovnání metod z teoretické části je tak doplněno reálnými daty v části praktické.

7 Bibliografie

- [1] ŠIMOTA, Jan a Libor BERÁNEK. *Revers engineering , technologie měření (digitalizace) využitelné jako zdroj dat pro 3D tisk, rapid prototyping* [online]. In: . s. 3-10 [cit. 2022-02-13]. Dostupné z: <https://moodlevyuka.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=106305>
- [2] WANG, Wego. *Reverse engineering: technology of reinvention*. 10-19. Dostupné z: doi:ISBN 978-1-4398-0630-2
- [3] PROF DR EYERCIOGLU, OMER. *REVERSE ENGINEERING: INTRODUCTION* [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://akbis.gantep.edu.tr/yonetim/upload/files/7647-8010.pdf>
- [4] HESS, Brian. What Is Reverse Engineering and How Does It Work?. In: *Astro Machine Works* [online]. 2019 [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: <https://astromachineworks.com/what-is-reverse-engineering/>
- [5] PROF DR EYERCIOGLU, OMER. *REVERSE ENGINEERING: GEOMETRICAL FORM* [online]. In: . [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://akbis.gantep.edu.tr/yonetim/upload/files/7647-3776.pdf>
- [6] TAMAŞAG, I., I, BEŞLIU a D, AMARANDEI. Application of Reverse Engineering for Automotive Plastic Components – Case Study. *Macromolecular symposia*. Vol. 395, no. 1. 2021, 2000265-.
- [7] What are NURBS?. In: *Rhinoceros* [online]. 2020 [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: <https://www.rhino3d.com/features/nurbs/>
- [8] Reverzní inženýrství: Programy pro tvorbu CAD modelů z naskenovaných 3D dat. In: *3D scan* [online]. [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/software/reverzni-inzenyrstvi/>

- [9] *MM průmyslové spektrum: Digitalizace - její princip a rozdělení* [online]. 2004, [cit. 2022-03-18].
- [10] KOPTIŠ, Michal. *Využití snímacího systému laser scanneru pro aplikace reverzního inženýrství*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT.
- [11] All About CMM Machines - What They Are, How They Work: Guide. In: *Thomas Xometry Company* [online]. 2019 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/articles/machinery-tools-supplies/all-about-cmm-machines-what-they-are-how-they-work/>
- [12] HUANG, Leon. What Is CMM Machine: Components, Uses, and Benefits. *Rapiddirect* [online]. [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.rapiddirect.com/blog/what-is-cmm-machine/>
- [13] ZEISS MMZ T: Produktová nabídka. In: *Zeiss* [online]. Německo [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/souradnicove-merici-stroje/velke-souradnicove-merici-stroje/zeiss-mmz-t.html>
- [14] ZEISS: *ZEISS RDS* [online]. 2020 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/senzory/on-cmm/probe-holder/zeiss-rds.html#brochuredownload>
- [15] *Trimos 3D: 3D metrology, portable measuring arms* [online]. Rennens, 2022 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.trimos.com/3d-metrology/portable-measuring-arms/what-is-a-measuring-arm>
- [16] *Hexagon: Snímače* [online]. Hexagon AB nebo její pobočky, 2022 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/coordinate-measuring-machines/cmm-sensors>

- [17] Doteky společnosti Renishaw. In: *Renishaw* [online]. 2008 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/media/pdf/cs/ca1d185b96ba432195db34691c2c88ed.pdf>
- [18] Tactile Probe Systems. In: *Mitutoyo* [online]. Mitutoyo America Corporation, 2021 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: https://pim.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/1989_Probes_CMM_NP.pdf
- [19] MADA, Sreenivasa, Melvyn SMITH, Lyndon SMITH, Prema MIDHA, Andrew SHEARER, Fionn MURTAGH, James MAHON a Paul WHELAN. Overview of passive and active vision techniques for hand-held 3D data acquisition. *Opto-Ireland: Optical Metrology, Imaging, and Machine Vision*. 16-27. Dostupné z: doi:10.1117/12.463773
- [20] MUŽNÝ, LUKÁŠ. *DESIGN OF AN EXPERIMENTAL STAND FOR THREE-DIMENSIONAL IMAGE ACQUISITION*. BRNO, 2012. Diplomová. VUT.
- [21] KWON, Kye-Si a Steven READY. *Practical guide to machine vision software: an introduction with LabVIEW*. Weinheim, Germany: Wiley - VCH, 2015. ISBN 978-3-527-33756-9.
- [22] RALF, Christoph. Machine Design and Principles of Measurement. In: *Multisensor Coordinate Metrology* [online]. Giessen, Germany [cit. 2022-06-29]. Dostupné z: <https://www.koordinatenmesstechnik.de/en/navigation/sensors-for-coordinate-measuring-machines/distance-sensors/autofocus.html>
- [23] *ENGN 2502 3D Photography* [online]. Brown University, 2012 [cit. 2022-06-29]. Dostupné z: <http://mesh.brown.edu/3DP-2012/pdfs/3DP-2011-lecture-2.pdf>

- [24] Aktivní triangulace. In: *Machine Vision Group* [online]. Brno, 2021, s. 1-2 [cit. 2022-06-29]. Dostupné z: http://vision.uamt.feec.vutbr.cz/POV/excercises/ex02__Aktivni__triangulace.pdf
- [25] SAMADI, Ali. Structured-light 3D scanner. *Academia* [online]. 2013, 1-7 [cit. 2022-06-29]. Dostupné z: https://www.academia.edu/1107159/Structured__light__3D__scanner__Samadi
- [26] *Pasivní triangulace* [online]. In: . VUT Brno, 2021 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: http://vision.uamt.feec.vutbr.cz/POV/excercises/ex08__Pasivni%20triangulace.pdf
- [27] Industrial CT- and X-Ray Solutions. In: *Zeiss* [online]. United States, 2020 [cit. 2022-06-29]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/computed-tomography.html>
- [28] SCHMITT, Robert a Christopher ISENBERG. Computertomografie für industrielle dimensionelle Messtechnik. *Tm - Technisches Messen*. 2014, 81(5), 201-208. ISSN 0171-8096. Dostupné z: doi:10.1515/teme-2014-0421
- [29] *CT COOKBOOK*. Carl Zeiss Industrielle Messtechnik, 2018.
- [30] ZAVADIL, Tomáš, Václav JANDURA a Zbyněk ZAVADIL. *Nedestruktivní zkoušení základní kurz*. Praha, 2020.
- [31] *VGSTUDIO MAX Reference Manual: Volume Graphics*. Heidelberg, Germany, 2021.

Seznam obrázků

Obrázek 1: B-29 Superfortress bomber (vlevo), Tupolev Tu-4 bomber (vpravo) [1] [33].....	13
Obrázek 2: Vlevo monopost stáje Mercedes, vpravo inspirovaný monopost stáje Racing point UPRAVENO [4].....	14
Obrázek 3: Příklad polygonové sítě.....	16
Obrázek 4: Bézierova křivka – B spline [34].....	18
Obrázek 5: Příklad vizuálního vzhledu mraku bodů, polygonové sítě a parametricky definovaného objektu [35]	19
Obrázek 6: Kartézský souřadný systém [36]	22
Obrázek 7: Sférický souřadný systém [36].....	22
Obrázek 8: Otočná hlava stroje Zeiss Prismo [15].....	23
Obrázek 9: Mostový typ kartézského souřadnicového měřicího stroje [15].	24
Obrázek 10: Měřící rameno využívající sférický souřadný systém [37].....	25
Obrázek 11: Schéma funkce kinematické sondy [38].....	27
Obrázek 12: Popis funkce tenzometrické sondy [38]	28
Obrázek 13: Skenovací sonda HP-S-X5 [17]	29
Obrázek 14: Vlevo princip určování polohy Z dle hloubky ostroty, vpravo autofocus [23].....	33
Obrázek 15: Kamerový systém Zoom Lens ZEISS Discovery V12 [1]	34
Obrázek 16: 1D triangulace [25]	36
Obrázek 17: 2D triangulace [20]	36
Obrázek 18: 3D Scanner využívající metody aktivní triangulace [39].....	37
Obrázek 19: Schéma pruhové projekce [26].....	38
Obrázek 20: Projekce pruhů na sochu za účelem archivace umění [20].....	39
Obrázek 21: Využití pruhové projekce [20].....	39
Obrázek 22: Schéma vzniku brzděného záření.....	43
Obrázek 23: Schéma průmyslové výpočetní tomografie [40].....	44
Obrázek 24: Schéma vhodného nastavení polohy náboje	46
Obrázek 25: Spodní strana náboje	48

Obrázek 26: Vrchní strana náboje.....	48
Obrázek 27: Schéma náboje v zapojení s krytem kola, vnitřním převodovým mechanismem a kotoučem.....	49
Obrázek 28: označení klíčových rozměrů pro lisování ložisek.....	50
Obrázek 29: Opakující se část osově souměrného náboje	50
Obrázek 30: CT Metrotom 1500 G2 od firmy zeiss [15].....	53
Obrázek 31: Displej sloužící k nastavení optimální vzdálenosti X	54
Obrázek 32: Zvolené uložení hliníkového dílce na polystyrenovou podložku	54
Obrázek 33: Zobrazení náboje v softwaru Metrotom.....	55
Obrázek 34: Nastavení pokročilých parametrů	56
Obrázek 35: Nastavení HW filtru	56
Obrázek 36: Objekt získaný metodou CT	57
Obrázek 37: Objekt ve VG Studiu Max	57
Obrázek 38: Histogram ve VG Studio Max.....	58
Obrázek 39: Objektový strom ve VG Studio Max.....	58
Obrázek 40: Nastavení funkce Object conversion.....	59
Obrázek 41: Model náboje tvořen polygonovou sítí.....	60
Obrázek 42: Model náboje ve formátu STL.....	60
Obrázek 43: Nastavení stroje.....	62
Obrázek 44: Elementy pro vyrovnání náboje	62
Obrázek 45: Definice roviny a zobrazení vyrovnaného náboje v prostředí programu Calypso	63
Obrázek 46: Příklad definice válce v SW Calypso	64
Obrázek 47: Příklad definovaných charakteristik a elementů	65
Obrázek 48: Příklad definice funkce řezu.....	66
Obrázek 49: Příklad definice funkce rotačního dělení.....	67
Obrázek 50: Nastavení rotačního dělení.....	67
Obrázek 51: Detail strategie kruhové dráhy	67
Obrázek 52: Příklad funkce projekce	68
Obrázek 53: Volba elementů pro tvorbu 3D přímky.....	68
Obrázek 54: Sestrojení charakteristiky úhlu mezi dvěma 3D přímkami	69

Obrázek 55: Charakteristiky a vyrovnání druhého měření	70
Obrázek 56: CMM Zeiss Prismo v laboratoři ČVUT	71
Obrázek 57: Uchycení náboje do svěráku.....	71
Obrázek 58: Snímač pro měření náboje, vzájemná poloha snímače a náboje a ovládací panel v pravém spodním rohu.....	72
Obrázek 59: Elementy pro manuální vyrovnání	73
Obrázek 60: Exportovaná DWG křivka	74
Obrázek 61: Rozměry měřené konturografem (červeně).....	74
Obrázek 62: Výstupní protokol měření na CMM.....	75
Obrázek 63: Konturograf MarSurf LD 120 od firmy Mahr.....	77
Obrázek 64: Možnosti nastavení asistenta měření kontury.....	78
Obrázek 65: Upnutí součásti pro první měření	78
Obrázek 66: Upnutí součásti pro druhé měření	78
Obrázek 67: Vyrovnaný profil naměřené kontury	79
Obrázek 68: Profil kontury doplněný o rozměry přímo v programu MarWin	79
Obrázek 69: Možnosti importu formátu STL.....	82
Obrázek 70: Grafika náboje v SW Solidworks	82
Obrázek 71: Model nahraný do SW Autodesk Fusion 360	83
Obrázek 72: Chybová hláška po snaze převést model do formátu STEP.....	84
Obrázek 73: Nepřesnost povrchu modelu náboje získaného pomocí výpočetní tomografie.....	84
Obrázek 74: Zobrazení náboje v SW Autodesk Meshmixer, červeně jsou zobrazeny chyby modelu	85
Obrázek 75: Vzhled náboje po redukci trojúhelníků.....	86
Obrázek 76: Zobrazení redukované trojúhelníkové sítě	86
Obrázek 77: Panel nastavení exportu	87
Obrázek 78: Model s přesností 1	87
Obrázek 79: Model s přesností 10.....	87
Obrázek 80: Modelářské funkce v programu PTC Creo	89
Obrázek 81: Funkce skicáře v PTC Creo.....	89
Obrázek 82: Definice geometricky definovaného elementu, žlutě vytvářená hrana.....	89

Obrázek 83: Vytvoření skic kružnic.....	90
Obrázek 84: Rozměrová definice skici kružnice	90
Obrázek 85: Vzhled po potvrzení funkce extrude	90
Obrázek 86: Vytvoření skici na grafickém těle úchytu	91
Obrázek 87: Rozměrová definice geometrie	91
Obrázek 88: Vymodelovaný úchyt.....	91
Obrázek 89: Modelování horních výběžků náboje.....	92
Obrázek 90: Modelování vnitřních osazení.....	92
Obrázek 91: Modelování spodní geometrie náboje a děr	92
Obrázek 92: Vytvořený model náboje ve formátu STEP	93
Obrázek 93: Vytvořený model náboje ve formátu STEP v drátěném řezu.....	93
Obrázek 94: Kritika STL modelu získaného průmyslovým CT	95
Obrázek 95: Kritika výsledného protokolu získaného pomocí CMM	96

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled materiálů kuličky [18]	26
Tabulka 2: Doporučená volba napětí podle typu a tloušťky materiálu	46
Tabulka 3: Parametry skenování pomocí výpočetní tomografie	56
Tabulka 4: Parametry exportovaných STL souborů	60

Seznam grafů

Graf 1: Znázornění velikosti odchyly od nominální hodnoty pro CMM.....	99
Graf 2: Znázornění odchyly od nominální hodnoty pro CT	99
Graf 3: Rozložení času pro měření na CMM.....	101
Graf 4: Rozložení času pro měření na CT	101

Seznam příloh

List charakteristik	Speciální příloha
Výkres náboje ve formátu A3	Speciální příloha