

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Reverzní inženýrství jako zdroj dat pro aditivní technologie výroby

Autor: Bc. Matouš Tesař
Studijní Program: Výrobní inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tesař** Jméno: **Matouš** Osobní číslo: **439105**
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:

Reverzní inženýrství jako zdroj dat pro aditivní technologie výroby

Název diplomové práce anglicky:

Reverse engineering as a data source for additive manufacturing

Pokyny pro vypracování:

Obor reverzního inženýrství, proces a aplikační potenciál
Metody měření využitelné pro reverzní inženýrství
Aditivní technologie pro zpracování polymerů, jejich dělení a základní funkční principy
Aplikace procesu RE na vybranou součást a jeho zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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 svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, software atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne:

.....

Podpis

Poděkování

Zde bych rád poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za odborný dohled, cenné rady, připomínky a vedení při práci. Dále děkuji Ing. Janu Šimotovi za pomoc při praktické části diplomové práce. Také děkuji za podporu své rodině a blízkým.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá reverzním inženýrstvím. Teoretické části se postupně věnují procesem reverzního inženýrství a jeho aplikací, dále metodami měření využitelnými pro reverzní inženýrství a v poslední řadě aditivními technologiemi, které hrají důležitou roli v reverzním inženýrství. Rešeršní část je doplněna o praktickou část, kde je aplikován kompletní postup reverzního inženýrství na vybraný díl a proveden rozbor výsledků.

Klíčová slova

Reverzní inženýrství, aditivní výroba, 3D tisk, CAD model, mrak bodů, CMM, metody měření, digitalizace, rychlé prototypování

Abstract

The thesis deals with Reverse Engineering. Theoretical parts are devoted to the process of Reverse Engineering and its applications, as well as measuring methods suitable for Reverse Engineering and additive technologies with an important role in reverse engineering. The thesis continues with practical part in which is applied complete process of Reverse Engineering and are results being compared.

Keywords

Reverse Engineering, Additive Manufacturing, 3D print, CAD model, point cloud, CMM, digitalization, measurement methods, rapid prototyping

Seznam použitých zkratk

2D	two dimensional	dvojměrný
3D	three dimensional	trojměrný
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren	
ASA	Akrylonitril-styren-akryl	
CAD	Computer Aided Design	počítačová podpora projektování
CAE	Computer Aided Engineering	počítačová podpora analýzy
CAM	Computer aided Manufacturing	počítačová podpora výroba
CCD	Charge-Coupled Device	zařízení s vázanými náboji
CT	Computed Tomography	výpočetní tomografie
DLP	Direct Light Printing	tisk přímým světlem
FDM	Fused Deposition Modeling	tavné poziční modelování
IGES	Initial Graphics Exchange Specification	počáteční specifikace výměny grafiky
IJP	Ink-jet printing	tisk inkoustovou tryskou
LED	Light-Emitting Diode	elektroluminiscenční dioda
LOM	Laminated object Manufacturing	výroba laminovaného objektu
MPEe	Maximum permissible measuring error	největší dovolená chyba měřené délky
MPEp	Maximum permissible probing error	největší dovolená chyba pro sondování
MRI	Magnetic Resonance Imaging	magnetická rezonance
NC	Numerical Control	číslicově řízené ovládání
NURBS	Nonuniform Rational B-spline	Nestejněměrné racionální B-spline
PET-G	polyethylentereftalát-glykol	
PLA	polylactic acid	kyselina mléčná
RE	Reverse Engineering	reverzní inženýrství
SAT	Standard ACIS Text	standardní ACIS text
SHS	Selective Heat Sintering	selektivní slinování teplem
SLA	Stereolithography	stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering	selektivní slinování laserem
SRE	Software Reverse Engineering	softwareové reverzní inženýrství
STEP	Standard for the Exchange of Product Data	standard pro výměnu produktových dat
STL	Standard Triangulation Language	Standardní trojúhelníkový jazyk
UV	Ultraviolet	ultrafialové

Obsah

1. Úvod	8
2. Reverzní inženýrství	9
2.1. Historie reverzního inženýrství	11
2.2. Letecký průmysl a kosmonautika	11
2.3. Medicína.....	13
2.4. Opravy součástí.....	15
2.5. Automobilový průmysl.....	17
2.6. Výroba nástrojů a forem	20
3. Postup reverzního inženýrství.....	22
3.1. Snímání bodů	22
3.2. Zpracování naměřených bodů	23
3.3. Vznik 3D modelu	23
3.4. Software pro reverzní inženýrství	24
4. Metody měření	27
4.1. Kontaktní metody měření	27
4.2. Bezkontaktní metody měření.....	29
4.3. Bezdotykové snímací systémy na trhu	37
5. Aditivní technologie pro zpracování polymerů.....	45
5.1. Aditivní technologie pro polymery.....	46
5.2. Materiály pro aditivní výrobu z polymerů.....	51
6. Aplikace procesu RE na vybranou součást	53
6.1. Skenování	55
6.2. Tvorba parametrizovaného modelu	66
6.3. Aditivní výroba součástí	79
7. Závěr.....	85

1. Úvod

Reverzní inženýrství, jak název napovídá, funguje opačným způsobem než kreativní způsob tvorby, jakým inženýři v praxi běžně postupují. Tedy od představy přes návrh až po výsledný produkt.

Na počátku reverzního inženýrství je existující objekt, ke kterému nemáme k dispozici technickou dokumentaci, počítačový model, ani žádné další informace o výrobě. Tím pádem jediným zdrojem informací je objekt samotný. Za pomoci měření, a počítačové podpory jsme schopni získat dostatečné množství informací, které můžeme využít pro vytvoření dokumentace, analýzu objektu, výrobu objektu nového a pro mnoho dalších aplikací.

Tato diplomová práce se zabývá, vytvořením kopie předmětu, za pomoci dat získaných reverzním inženýrstvím a výrobou nového předmětu technologií aditivní výroby.

První část práce popisuje reverzní inženýrství jako celek, zkoumá jeho historii a různé možnosti jeho aplikace v odlišných oborech současné inženýrské praxe, jako je např.: medicína, letecký, nebo automobilový průmysl a další. Ve druhé části je popsán kompletní postup reverzního inženýrství, včetně počítačových programů na jeho podporu. Třetí část mapuje a popisuje možnosti měření, kterými jsou získávána vstupní data procesu. Poslední teoretická část se zabývá aditivní výrobou, konkrétně pak technologiemi pro zpracování plastových materiálů, jejich dělením a principy.

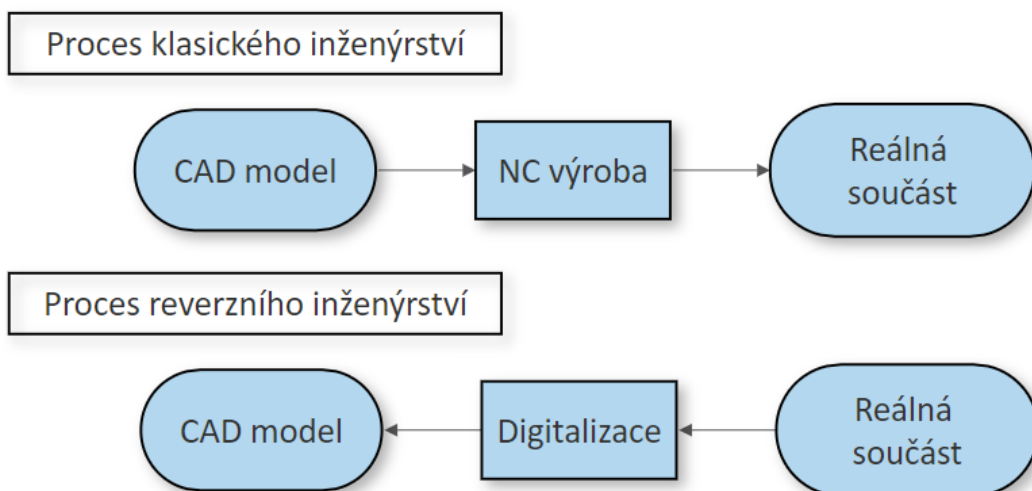
V praktické části, která je poslední kapitolou práce, je ukázána aplikace procesu reverzního inženýrství a následná aditivní výroba dílu historického motocyklu. Vzhledem ke stáří motocyklu jsou totiž náhradní díly špatně dostupné a jedinou možností, jak se dostat k náhradnímu dílu, je tvorba repliky. Pro měření a akvizici dat jsou využity 2 snímací systémy, které jsou v kapitole porovnány.

2. Reverzní inženýrství

V dnešní době velmi konkurenčního prostředí světového trhu je zapotřebí neustále vymýšlet způsoby, jakými lze zkrátit vývoj nových produktů, tak aby odpovídali požadavkům. Je masivně investováno do CAD/CAM software, velký rozmach zažívá také rapid prototyping (technologie pro zrychlenou výrobu prvních prototypů za pomoci 3D tisku). [2] [3]

Jedním ze způsobů, jak urychlit proces vývoje je reverzní inženýrství, anglicky Reverse Engineering odkud pochází používaná zkratka RE.

Na rozdíl od tradičního procesu vývoje produktu, kde vývoj začíná určitou představou, pokračuje přes návrh a končí výsledným produktem, reverzní inženýrství začíná již existujícím produktem. Klasické inženýrství se na rozdíl od RE zaměřuje na kreativitu a originalitu. V případech, kdy nemáme k dispozici výrobní dokumentaci, ani jiné podklady, nezbývá než duplikovat již existující součást, počítačový model, software, nebo celou sestavu dílů. Důležitou součástí reverzního inženýrství je také získání technické dokumentace produktu, dále pak analýza, měření a kontrola původního výrobku a zjištění původního výrobního postupu. [2]



Obrázek 1: Porovnání klasického a reverzního inženýrství

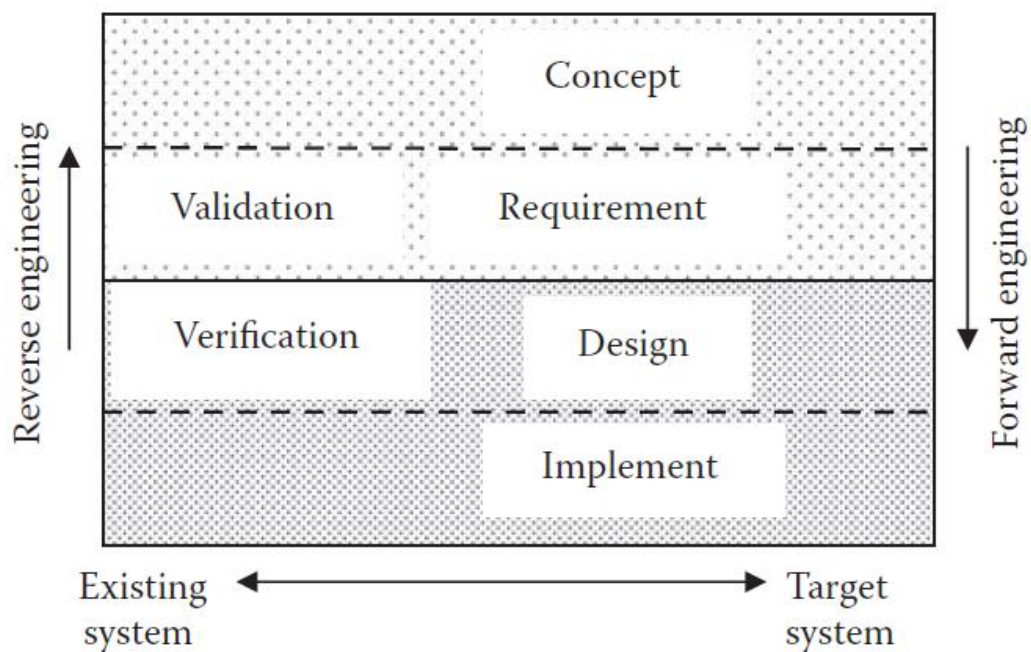
RE může být definováno také jako získávání CAD modelu z 3D bodů, které získáme za pomoci skenování povrchu dílu použitím kontaktních, nebo nekontaktních metod snímání. [2] [4]

Využití nachází reverzní inženýrství v oblastech od výroby drahých komerčních součástí, přes medicínu, až po restauraci, nebo kopírování historických předmětů, případně uměleckých děl. Uplatnění nachází také ve šperkařství. Důležitou možností využití RE je také oprava poškozených

součástí bez výkresové dokumentace. Širokou oblastí využití je také průmyslová špionáž, kde se výrobci snaží zjistit, jak konkurenční výrobek funguje, nebo jakým způsobem je vyráběn tak, že aplikují procesy reverzního inženýrství na cizí produkt. [1] [2]

V současnosti je jednou z nejrozšířenějších oblastí je softwarové RE (SRE). Je to proces analýzy daného systému za účelem vytvoření systému vyšší úrovně. Zdrojový kód, případně algoritmus, je pak často směsí již dříve použitých kódů a algoritmů. [1] [2]

Obr. 2. znázorňuje úrovně výstavby softwaru. Obvyklý postup je od shora dolů, začínající konceptem a pokračující přes požadavky a design až po končnou implementaci systému. Opačným směrem postupuje reverzní inženýrství tedy začíná analýzou implementace skutečného systému, dále přes design a požadavky dojde syntézou informací až na úroveň odhalení konceptu původního systému. [1]



Obrázek 2: Úrovně vývoje softwaru [1]

Využití nachází SRE především při přepisování kódu, který není běžně dostupný a pak také při odstraňování chyb (ladění) pro lepší zabezpečení softwaru, nebo naopak jejich využití k síťovým útokům. [1]

Vzhledem k podstatě RE, kdy se jedná o kopírování již existujícího produktu, je třeba myslet také na právní stránku věci. Především v oblasti softwarového RE se vede složitá debata o zákonech a také jejich uplatňování. [2]

2.1. Historie reverzního inženýrství

Reverzní inženýrství není pouze nástrojem pro výrobu levnějších produktů a konkurenční boj, ale slouží také jako podpora průmyslového vývoje. Ve starověku trval vývoj předmětů často i století, v dnešní době je však životní cyklus většiny produktů mnohem kratší. Reverzní inženýrství je nástroj, který slouží k urychlení vývoje. Díky RE je možné přizpůsobit se rychlému pokroku a krátkému životnímu cyklu produktů. Současně tento postup vede ke snižování cen produktů, díky menším nákladům na vývoj. [1]

Hnacím motorem rozmachu reverzního inženýrství je především letectví a kosmonautika, automobilový a válečný průmysl, medicína a softwarové inženýrství.

2.2. Letecký průmysl a kosmonautika

Za formu reverzního inženýrství je možné také považovat inspiraci v přírodě. Letadlo je zde jedním z nejvýraznějších příkladů, když bratři Wrightové navrhovali svá první letadla podle tvaru létajících ptáků. Ani dnes, po více než století vývoje, nejsme schopni se alespoň přiblížit ptactvu co se manévrovatelnosti ve vzduchu týče. Reverzní inženýrství může být základem pro rozklíčování a pochopení základů létání u zvířat a napomocť tak k vývoji další generace letadel s lepší stabilitou a manévrovatelností. [1]

Jednoho z největších pokroků poslední doby dosáhl Boeing. Letadla typu 777 byla první letadla na světě, která byla 100% vytvořena a sestavena v počítači za pomoci 3D CAD programů. Bylo tím dosaženo vyšší přesnosti a o 50 % byly sníženy chyby při montáži. Tento úspěch vedl k pokroku především v oblasti náhradních dílů. [1]



Obrázek 3: Boeing 777 -300ER společnosti Emirates [5]

V leteckém průmyslu je velká část náhradních dílů vyráběna na zakázku a díky existenci 100 % digitálních modelů dílů letadla Boeing 777 je možné tyto díly vyrobit okamžitě. Zároveň to ukazuje na nutnost využití reverzního inženýrství u typů letadel, kde není takto detailně vytvořená dokumentace. [1]

Reverzní inženýrství v leteckém průmyslu bude klíčové pro budoucnost letectví tak, jako byl CAD důležitý pro Boeing 777 především kvůli: [1]

1. Vytvoření databáze dílů a forem dílů, které nemají původní CAD modely.
2. Zdolání problému výměny dat mezi jednotlivými softwary a integrity dat.
3. Pochopení a vyřešení problémů vzniklých nesrovnalostmi mezi CAD daty a skutečnými díly, nebo nástroji.
4. Zabezpečení výkonu a kvality díky počítačové podpoře kontroly kvality a počítačové analýzy.

Jedním z nejznámějších případů RE, který spojuje letectví a vojenskou špionáž, je ruský Tupolev Tu-4. Za 2. světové války bylo několik Amerických bombardérů Boeing B-29 nuceno přistát na Ruském území (tehdejším SSSR) po bombardování Japonska. Přes Americké požadavky byly letouny zadrženy a prozkoumány společností Tupolev. Na jejich základě vznikl právě Tu-4 na Obr. 4., který je B-29 na Obr. 5. nápadně podobný. [1] [6]



Obrázek 4: Tupolev Tu-4 [7]



Obrázek 5: Boeing B-29 [8]

2.3. Medicína

Lidské tělo je možné označit za dokonalé inženýrské dílo. Vzhledem k pochopitelnému nedostatku výkresové dokumentace částí lidského těla, může reverzní inženýrství sloužit jako způsob, jak vyrobit podobné struktury, případně napodobit celé „součásti“. Příkladem může být výroba umělých kloubních náhrad. Výroba a nahrazení existujících částí patří mezi základní

využití RE (především ve spolupráci s aditivními technologiemi výroby), proto se tento přístup velice dobře uplatňuje v medicíně. Kloubní náhrady vyžadují vysokou přesnost a použití vhodných materiálů, aby bylo možné dosáhnout požadované funkce a životnosti. [1]

Velkou výhodou pro reverzní inženýrství v oboru medicíny je také nutnost personalizace, tedy výroby součástí na míru danému člověku. Toto výrazně omezuje možnosti sériové produkce a RE a metody rychlého prototypování tak získávají výraznou výhodu. [2]

V moderní medicíně je trendem využívat co možná nejméně invazivní a nejvíce precizní operace. Reverzní inženýrství je v tomto ohledu velmi nápomocné vytvořením komplexních virtuálních modelů. [12]

Konkrétní příklady využití reverzního inženýrství je možné rozdělit do několika kategorií:

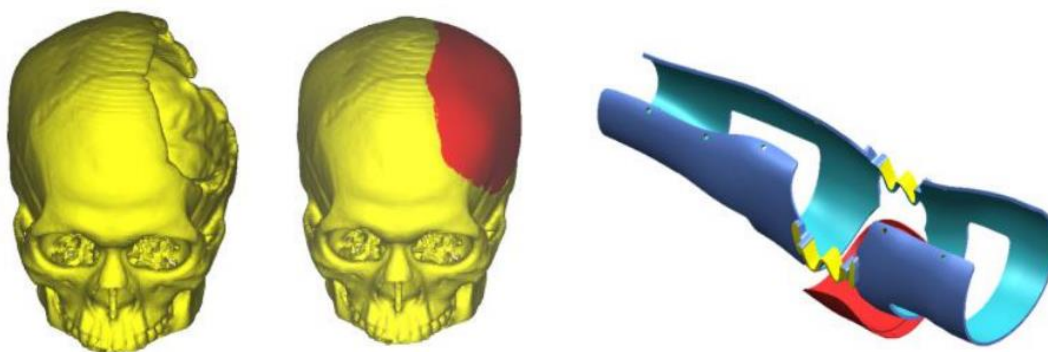
1. Komunikace mezi doktorem a pacientem, nebo mezi doktory prostřednictvím 3D modelů.
2. Vizualizace pro diagnostiku a plánování léčby.
3. Simulace a optimalizace operace.
4. Výroba implantátů, protéz, dlah, nebo operačního náčiní. [12]

Také ve stomatologii nachází RE široké uplatnění. Například firma Align Technology, Inc. přišla díky reverznímu inženýrství s úplně novým produktem. Jedná se v podstatě o neviditelná rovnátka, viz Obr. 6. Vzhledem ke složitosti tvaru zubů a jejich jedinečnosti by výroba takového produktu nebyla možná bez využití moderních metod skenování a rychlého prototypování. Spolu s vývojem speciálního materiálu, vlastním zařízením pro skenování ústní dutiny, které využívá laser scanner, a softwarem, který předpovídá pohyb zubů, tak poskytuje komplexní službu. [2][13]



Obrázek 6: Vlevo neviditelná rovnátka a vpravo skenovací systém od Align Technology, Inc. [13]

Dalšími příklady využití RE v medicíně jsou např.: Lebeční implantáty, nebo na míru dělané ortézy a mnoho dalších, viz Obr. 7. [14]



Obrázek 7: Příklady využití RE v medicíně [14]

2.4. Opravy součástí

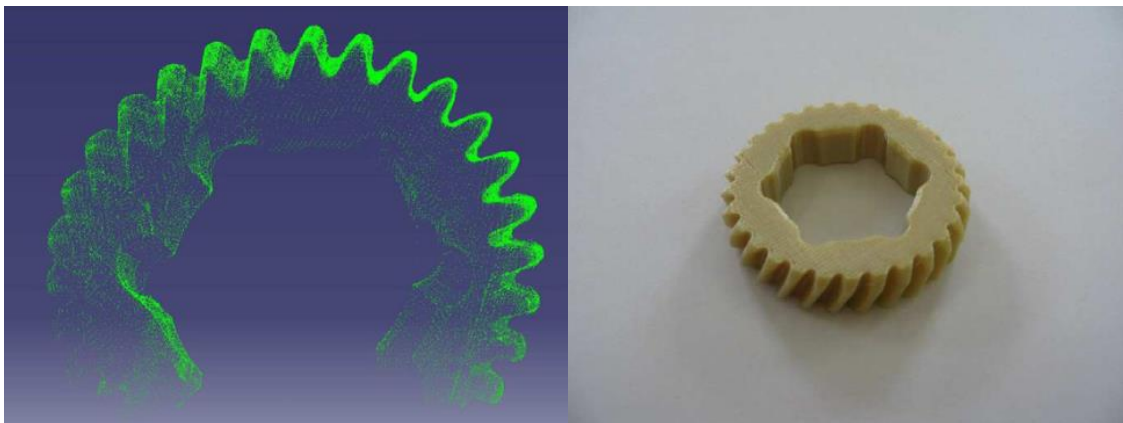
Poškození součástí strojů je častým problémem, který je zapotřebí řešit. Nefunkčnost stroje ovlivňuje plynulost výroby a může způsobit finanční ztráty. Je možné se setkat s případy, kdy z nějakého důvodu není možné sehnat náhradní díl (např.: stáří stroje), případně alespoň dokumentaci k jeho výrobě, nebo je zapotřebí 3D model pro rychlou výrobu 3D tiskem. V takovém případě se nabízí využití reverzního inženýrství pro získání CAD modelu a následnou výrobu nového dílu. Model je pak vhodné zařadit do databáze náhradních dílů, což usnadní další opravy. [9]

K součástem, u kterých dochází k častému poškození patří ozubená kola. Napětí, které působí na kola, může způsobit abrazi, nebo dokonce poškození kol např.: vylomení zubů. Příkladem může být nevratně poškozené plastové ozubené kolo na Obr. 8. Je vidět, že kolo má jednak vylomenou část, a také došlo k poškození některých dalších zubů a bude zapotřebí jej nahradit. [9]



Obrázek 8: Poškozené ozubené kolo [9]

Kvůli vylomení části ozubeného kola bylo zapotřebí nejenom naskenovat součást a převést ji do 3D modelu, ale musela se také dodělat chybějící část v CAD programu. Posledním krokem bylo vtištění kola za pomoci 3D tiskárny. [9]

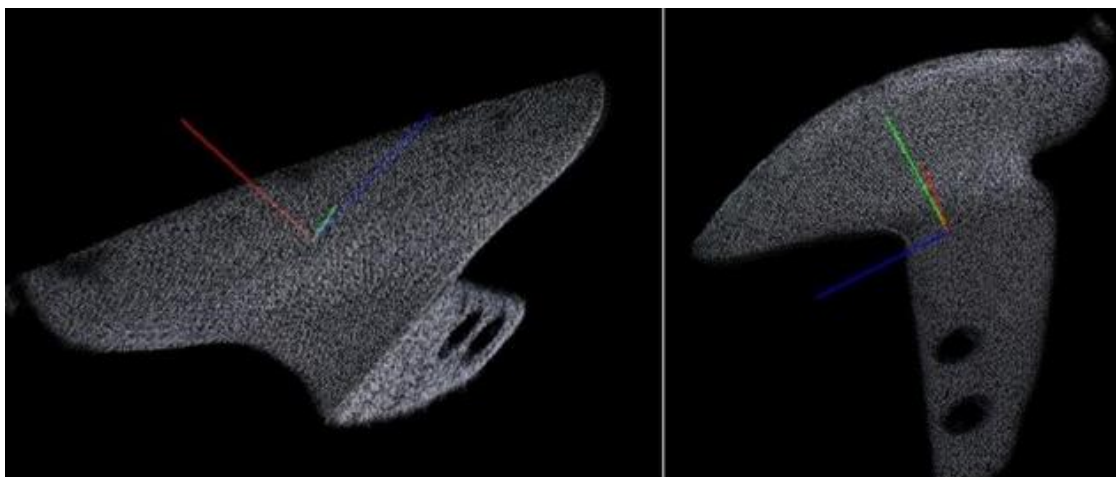


Obrázek 9: Vlevo body získané skenováním, vpravo výsledné ozubené kolo [9]

Dalším příkladem může být náhrada rozbitého blatníku na modelu ve velikosti 1:12 Ducati Panigale, kde poškození vzniklo špatnou manipulací při sestavování modelu. Jedná se o poměrně malý předmět ve velikosti několika centimetrů. Velikost objektu společně s velice detailním provedením modelu vyžadovalo precizní skenování a zároveň přesný 3D tisk. [11]



Obrázek 10: Model Ducati Panigale s novým blatníkem [11]



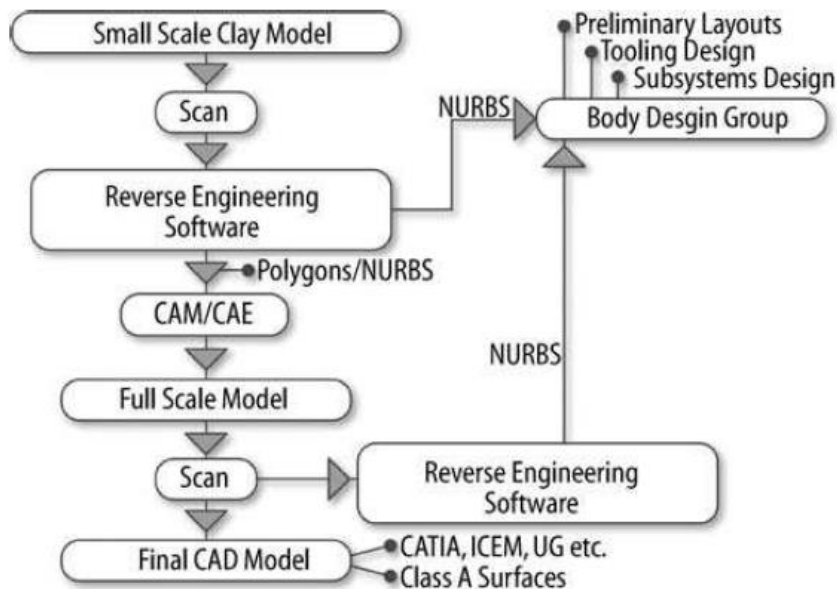
Obrázek 11: Naskenované mraky bodů [11]

2.5. Automobilový průmysl

Při pohledu do historie automobilového průmyslu můžeme vidět několik klíčových změn a malých revolucí. Za první z nich je možno určit samotný přechod od vozů taženými koňmi k samostatně poháněným automobilům. Dalším velkým milníkem bylo zvýšení produktivity díky systému hromadné výroby Henryho Forda. Pokračováním byl počátek využívání metod zlepšení kvality výroby a standardizace, což s sebou přineslo další zlevnění automobilů, jejich celkovou vyšší kvalitu, a také standardizované díly, které zajišťovaly snadnou opravu. V dnešní době se pak jedná o kombinaci výše zmíněné masové produkce, nejvyšší možné kvality výroby a také o uspokojení nejrůznějších individuálních přání zákazníka a různých požadavků modifikace. [2]

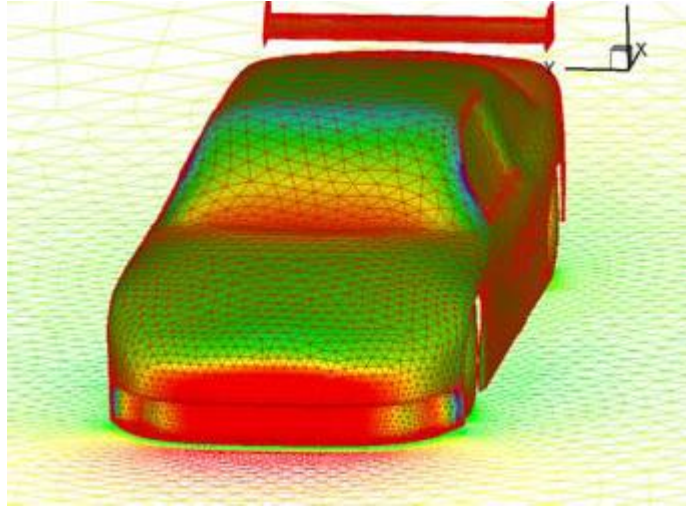
Reverzní inženýrství je klíčovým nástrojem k vytvoření komplexního produktu, který splňuje všechny požadavky zákazníka. Hlavní důvody pro jeho využití jsou:

- Vytvoření free-form tvarů, které je těžké přesně geometricky vyjádřit a vytvořit v CAD softwaru.
- Řešení problémů s výměnou dat a zajištění jejich celistvosti.
- Získání geometrických tvarů, které nemají CAD model.
- Řešení problémů vzniklých rozdíly mezi skutečnými nástroji, reálnými díly a CAD modelem.
- Rychlejší vývoj v oblastech, kde CAD model často představuje nepotřebný krok, jako např.: aerodynamika, použití již existující geometrie, nebo ergonomie.
- Využití reverzního inženýrství ke kontrole a analýze. [2]



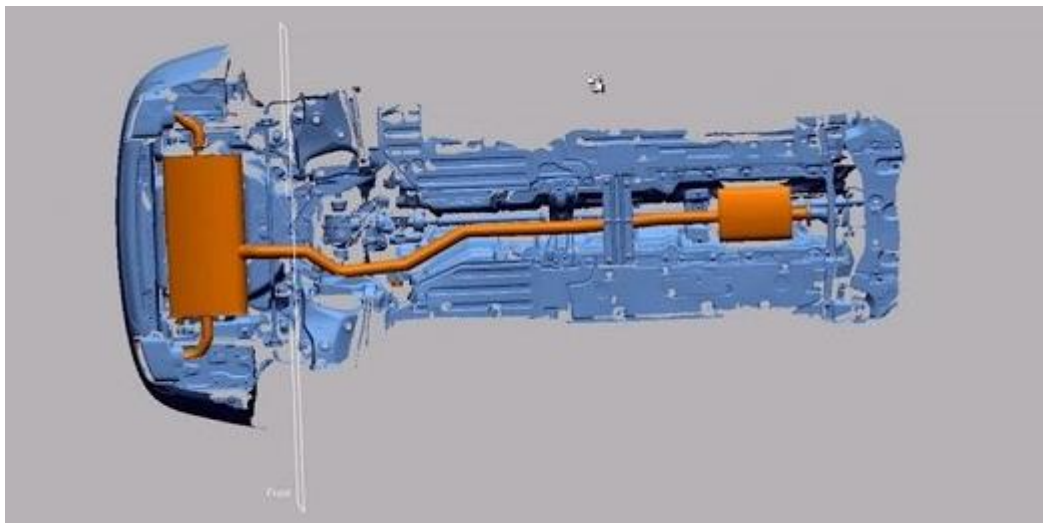
Obrázek 12: Využití reverzního inženýrství při návrhu designu automobilu [2]

Velké využití nachází RE v oboru aerodynamiky, kde díky němu není nutné používat větrné tunely, ale vše je možné simulovat počítačově. To šetří jak finance, tak především čas při vývoji. [15]

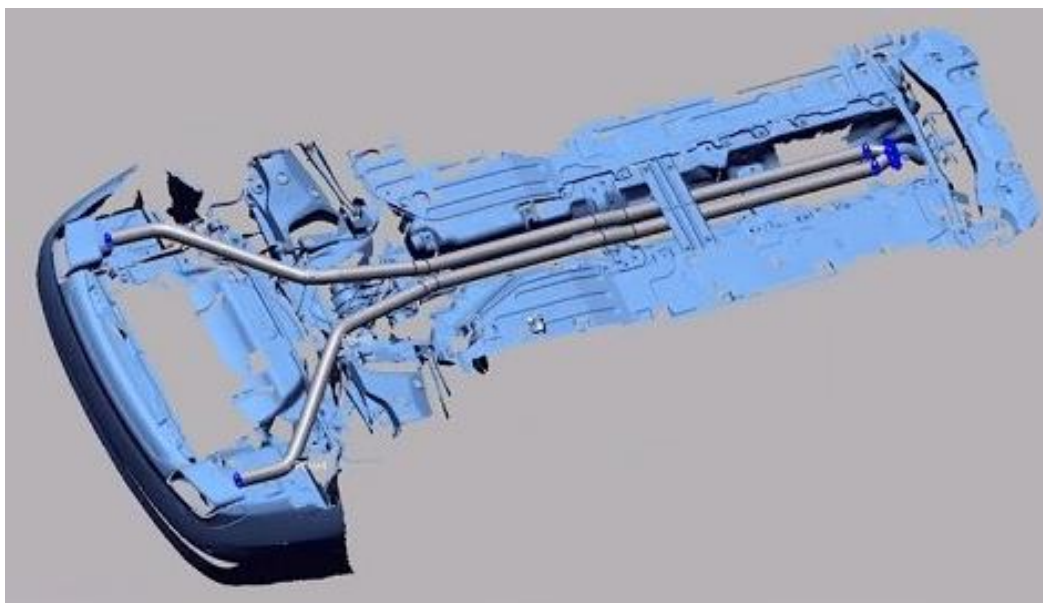


Obrázek 13: Naskenovaný závodní automobil NASCAR pro počítačovou simulaci aerodynamiky [15]

Za pomoci nástrojů reverzního inženýrství je možné také vyrobit náhradní díly, které jsou již nedostupné, případně se dají vytvořit díly nové, vylepšené, jako například při náhradě výfukového potrubí na Volvu XC90 na obrázcích 14 a 15. Při této aplikaci byly využity skenery a software od firmy Artec 3D. [16]



Obrázek 14: Původní systém výfukového potrubí [16]



Obrázek 15: Nový systém výfukového potrubí [16]

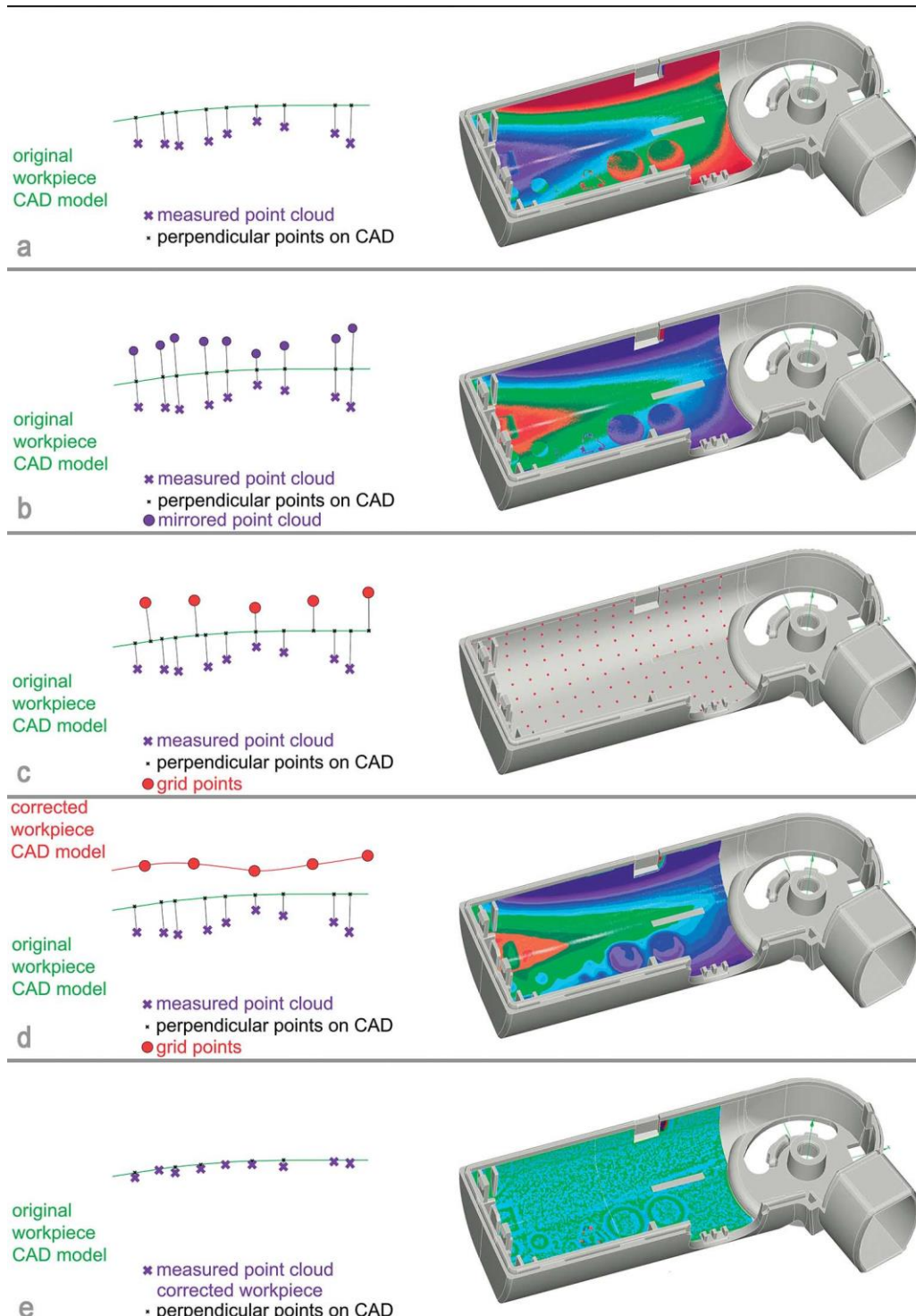
2.6. Výroba nástrojů a forem

Nástroje a formy pro lisování plechů, případně vstřikování plastů vyžadují vysokou přesnost výroby a také dlouholeté zkušenosti s výrobou, aby bylo možné produkovat díly s požadovanou přesností. I přes využití sofistikovaných simulací výrobních procesů dochází k odchylkám skutečné součásti od původního modelu a součásti nesplňují geometrické požadavky. Tyto chyby jsou způsobeny např.: špatně odhadnutým smršťováním, nebo relaxací dílu. Proto před schválením nástroje dochází k jeho postupným korekcím tak, aby byly splněny výrobní požadavky. [17] [18] [19]

Reverzní inženýrství se zde používá k porovnání požadovaného CAD modelu a skutečného výrobku. Moderní software, jako například ZEISS Reverse Engineering dokáže odchylky reálné součásti promítnout do modelu nástroje, který je upraven a následně je vyroben další díl, který se opět změří a porovná s požadovaným tvarem. [17] [18]

Postupný iterační proces probíhal ve výrobě nástrojů vždy, ovšem dříve se mnohem více spoléhal na zručnost a zkušenosti pracovníků. Díky RE byl také výrazně snížen počet nutných iterací k dosažení uspokojivého výsledku, čímž se urychluje výrobní proces forem a nástrojů. [17] [18]

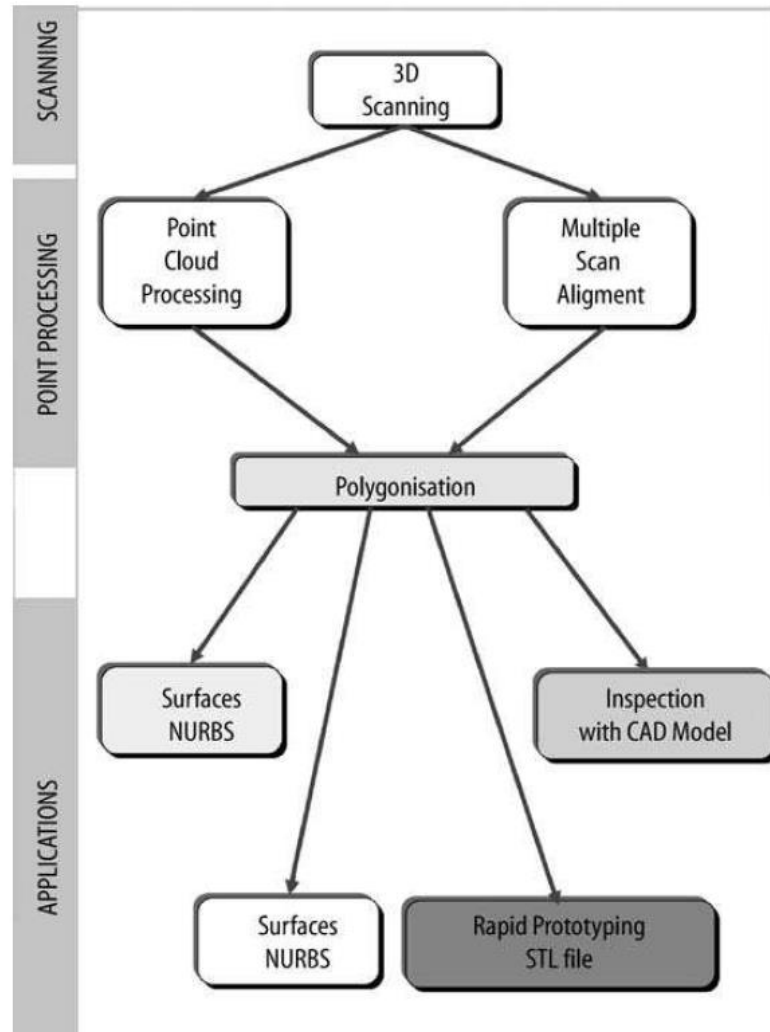
Obdobný postup se využívá např. také při výrobě hypoidního ozubení. [19]



Obrázek 16: Postup úpravy CAD modelu [17]

3. Postup reverzního inženýrství

Celkový proces reverzního inženýrství by se dal rozdělit do 3 navazujících částí, jak je vidět na Obr. 17. První fází je 3D skenování, následuje zpracování naměřených bodů a poslední částí je získání a aplikace výsledného 3D modelu. [2]



Obrázek 17: Proces reverzního inženýrství [2]

V procesu se musí brát v úvahu několik základních věcí, jako důvod reverzování součásti, počet a velikost skenovaných dílů, složitost součásti, tvrdost a povrchová úprava součásti (na měkkou součást se nehodí dotykové metody snímání, u lesklých povrchů je zapotřebí úprav před optickým skenováním) a v neposlední řadě požadovaná přesnost měření. [2]

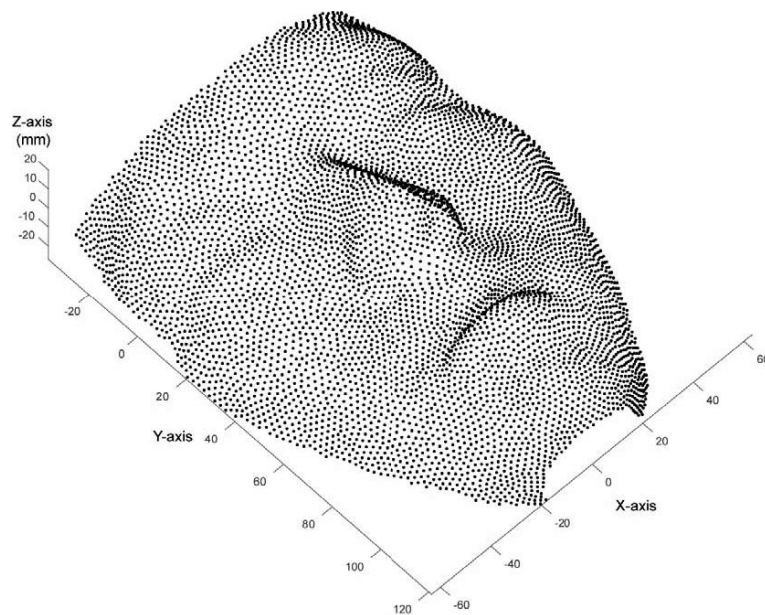
3.1. Snímání bodů

Dobrá vstupní data jsou základem pro každý proces RE. Tato část zahrnuje výběr vhodného skenovacího systému, výběr správné strategie, přípravu součásti ke skenování a samotné

skenování součásti tak, aby bylo možné získat informace o všech požadovaných geometriích na předmětu. Výstupem 3D skenerů je pak tzv. point cloud (mrak bodů), kde každý jeden bod povrchu předmětu má přesně přiřazené souřadnice v prostoru. Tyto mraky bodů samy o sobě nemají přímé využití, musejí být zpracovány do požadovaného formátu, Existuje velké množství různých zařízení, která nám umožňují tato data získat, kterým bude věnována samostatná kapitola. [1][2]

3.2. Zpracování naměřených bodů

V druhé části procesu probíhá zpracování již získaných bodů. Cílem je odstranit chybné body a snížit jejich počet. Tento proces probíhá manuálním odstraněním části bodu operátérem, nebo za pomoci různých filtrů, které mají různé algoritmy určení nepotřebných bodů. Dále v této fázi probíhá spojení jednotlivých mraků do jednoho celku bodů, které určují součást. Také se redukuje překrývající se data, která vznikají většinou z nutnosti skenovat součást z více stran (směrů). Výsledkem této operace je čistý, ucelený mrak bodů, který sám o sobě nemá velké využití, ale bude z něj následně vytvořen 3D model. [1][2]



Obrázek 18: Obličej jako mrak bodů [20]

3.3. Vznik 3D modelu

Vytvoření 3D modelu je práce pro speciální software pro reverzní inženýrství. Mraky bodů jsou převáděny do CAD formátů za pomoci různých postupů. Základní metodou je vytvoření trojúhelníkové sítě povrchu ze sousedících bodů. Jedná se tedy o reprezentaci povrchu za pomoci trojúhelníků. Zmenšování trojúhelníků může vést k přesnější reprezentaci získaných bodů jako povrchu, ovšem roste objem dat. Záleží na přesnosti měření a požadavků na přesnost

výsledného modelu, jak hustou síť zvolit. Takto vytvořená síť ve formátu STL (Standard Triangulation Language) již může být využita například pro 3D tisk. Případně se dá dále zpracovat na parametrizované CAD modely, nebo NURBS (Nonuniform Rational B-spline) povrchové modely. Následovat budou kapitoly o konkrétních softwarech pro reverzní inženýrství. [1][2]

3.4. Software pro reverzní inženýrství

ZEISS REVERSE ENGINEERING

Software od společnosti ZEISS si zakládá na jednoduchosti uživatelského rozhraní a krátké době zaškolení operátora. Software zvládne zpracovat data naměřená různými způsoby a vede uživatele krok za krokem. Po importu existujícího mraku bodů, nebo STL souboru je jen otázkou chvilky, kdy je za pomoci různých funkcí možné dostat CAD model v jednom z formátů IGES, STEP, nebo SAT. Vestavěnou součástí tohoto softwaru je také přímá úprava nástrojů, čímž eliminuje časovou náročnost manuálního promítání výsledků měření do nástrojů a také odstraňuje případně vzniklé chyby. [21]

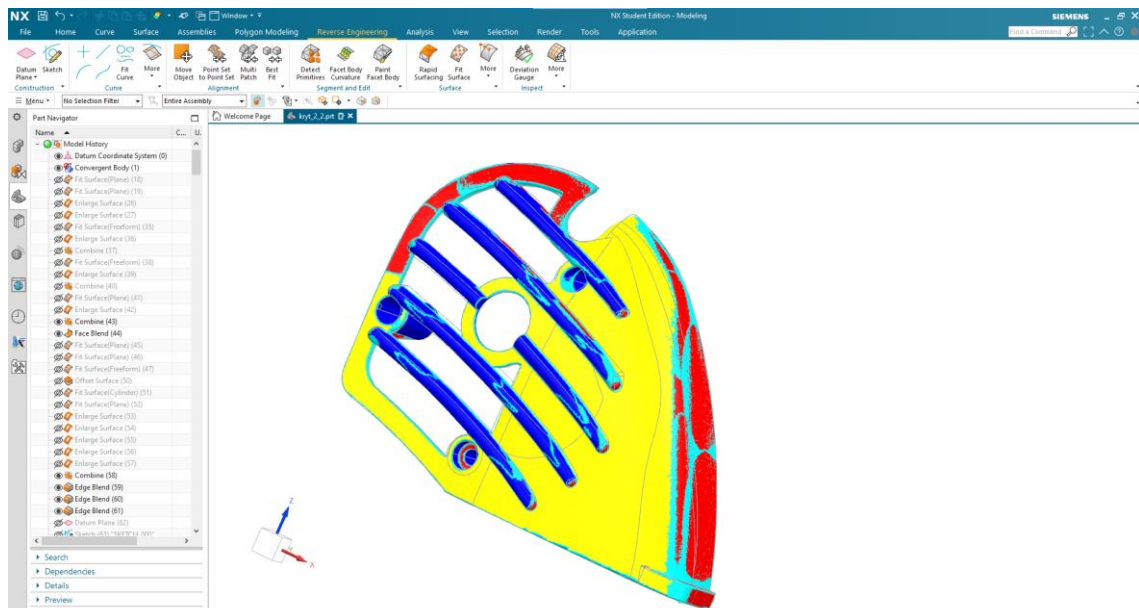
Siemens NX

Tento komerční program slouží jako kompletní nástroj pro inženýry jako podpora konstrukce a výroby. Disponuje klasickými CAD možnostmi, ale také programování NC obráběcích centrech CAM (Computer Aided Manufacturing). Součástí programu je také CAE (Computer Aided Engineering) složka, která slouží především pro analýzu součásti, nebo sestavy. [27]

Součástí programu jsou také funkce určené pro reverzní inženýrství. Program dovoluje na základě importovaného STL modelu, který byl získán měřením skutečné součásti, vytvořit parametrizovaný CAD model. Díky vyspělým funkcím pro rozpoznání tvarů a následnému přiřazení povrchů k naskenovaným tvarům je práce v software NX příjemná a vhodná i pro začátečníky.

Software obsahuje také pokročilé funkce pro podporu aditivní výroby. Díky tomu se jedná o jeden z nejkompaktnějších nástrojů na trhu.

V tomto softwaru bude zpracováno také měření v této diplomové práci. Konkrétně bude využita studentská verze programu. STL soubory budou importovány z programů, které zajišťují měření součásti a v Siemens NX budou trojúhelníkové sítě převedeny do parametrizovaného CAD modelu.

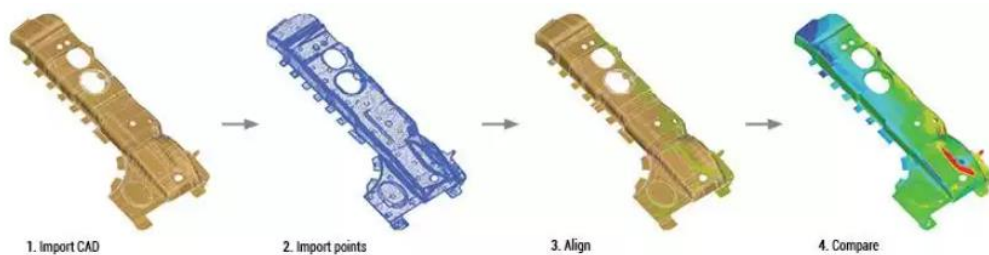


Obrázek 19: Ukázka z programu Siemens NX

Focus Inspection – Nikon

Focus Inspection je software vyvinutý firmou Nikon, která se zabývá také výrobou skenovacích zařízení. Jeho hlavní předností jsou integrované funkce pro kontrolu, tedy porovnání skutečné součásti s CAD modelem a následný výstup v podobě protokolu o měření. Stejně jako software společnosti ZEISS nabízí jednoduché a intuitivní ovládání. [22]

Software dokáže rozpoznat a analyzovat geometrické objekty, které jsou určeny k posouzení. Výhodou je také precizní spojení s vlastními měřicími zařízeními. [22]



Obrázek 20: Postup při kontrole v programu Focus Inspection [22]

GOM Inspect

Stejně jako předchozí 2 programy, nabízí i GOM Inspect kompletní škálu funkcí od skenování, přes vytvoření CAD modelu z mraků bodů, až po práci s modelem a vyhodnocení jeho geometrických tolerancí. Nabízí i pár speciálních funkcí, jako kontrola lopatek, případně objemovou inspekci. Jak napovídá název programu, vyvíjí jej společnost GOM, která v současnosti spadá pod ZEISS a má také vlastní produktovou řadu skenovacích zařízení. [23]

Geomagic Design X

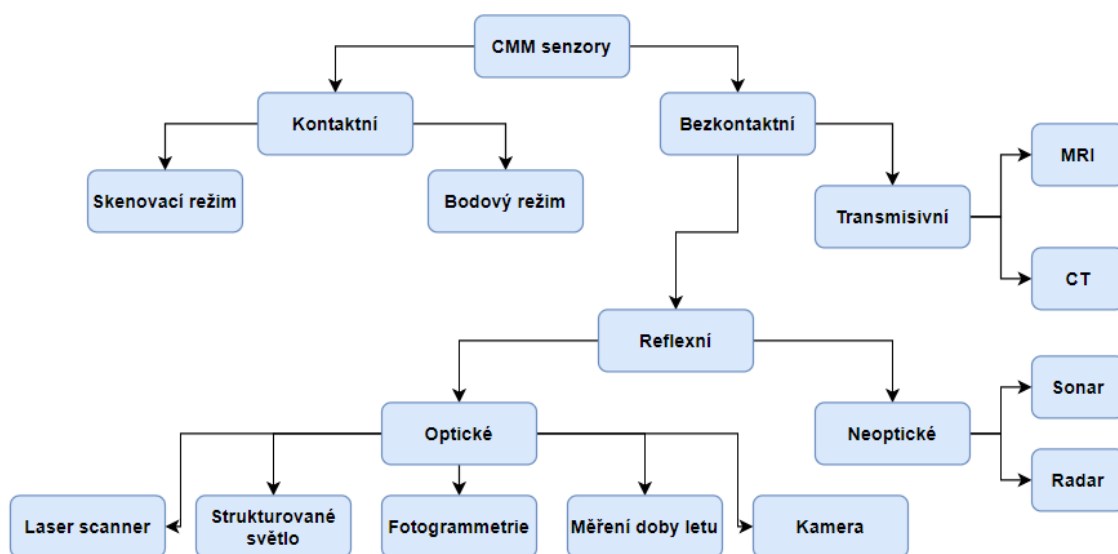
Geomagic Design X je software vytvořený společností Artec3D, která také spadá do kategorie výrobců 3D skenerů, kteří vyvíjí i vlastní software. Opět se jedná o velice komplexní nástroj, který nabízí veškeré běžně dostupné funkcionality pro reverzní inženýrství. Jedná se o nástroj vyvinutý především za účelem vytvoření CAD modelu ze skenovaných dat a pro tento účel také nabízí spoustu automatických funkcí pro vytvoření parametrizovaného modelu. Podporuje také přirozený export do většiny používaných CAD programů jako SOLIDWORKS, Siemens NX, Solid Edge, Autodesk Inventor atd. [24]

Firma Artec3D nabízí i mnoho dalších softwarových produktů, jako např. Geomagic for SOLIDWORKS, který, jak název napovídá, slouží jako modul do programu SOLIDWORKS a umožňuje přímé importování 3D dat do CAD modelu. [24]

4. Metody měření

Měření součástí stojí na počátku celého procesu reverzního inženýrství. Je proto potřeba kvalitním měřením položit základy dobré práce. V dnešní době jsou naštěstí dostupná kvalitní a přesná zařízení pro získání dat. [1]

Základními skupinami měřicích systémů jsou technologie kontaktní, nekontaktní a destruktivní. Nejčastěji využívané metody jsou kontaktní a nekontaktní, z nekontaktních pak konkrétně různé typy 3D scannerů. Obě tyto metody snímají body pouze z povrchu součásti pro získání geometrických tvarů a rozměrů. Dnes je možné na souřadnicových strojích využít také kombinaci více senzorů najednou. [1][2]



Obrázek 21: Přehled CMM senzorů

4.1. Kontaktní metody měření

Kontaktní metody měření fungují na jednoduchém principu kontaktu snímače s měřeným objektem. Snímač, složený z hlavy, dřívku a doteku zaznamenává přesný okamžik dotyku sondy s povrchem a zaznamená okamžitou polohu. Tento snímač může být umístěn buď na souřadnicovém měřicím stroji (CMM), nebo na měřicích ramenech.

Tyto metody se dělí dle režimu provozu. První možností provozu je spínací neboli bodový režim s dotykovou sondou. Manuálně řízená sonda na rameni, nebo počítačově řízená sonda na CMM se přiblíží k povrchu součásti a při dotyku zaznamená bod. Poté se snímač od povrchu vzdálí a postup se opakuje v dalším požadovaném místě měření. Tento postup je z časového hlediska velmi náročný a rychlost zaznamenávání bodů je nízká. Souřadnicový stroj disponuje vyšší přesností, na druhou stranu měřicí ramena jsou mobilní, poskytují více stupňů volnosti a je tedy

možné s nimi dosáhnout do složitějších míst součásti. Ramena také nevyžadují programování pohybu snímače. [2]

Druhou možností provozu je skenovací režim se skenovací sondou. Sonda je v tomto případě instalována výhradně na souřadnicovém měřicím stroji a na rozdíl od bodového režimu zde po dotyku následuje plynulý pohyb po povrchu měřené součásti, který je dán naprogramováním stroje. Sonda pak poskytuje navazující řadu nasnímaných bodů povrchu, které jsou získávány s výrazně větší rychlostí než v případě bodového měření. Programování pohybu sondy je zde nezbytné především kvůli udržení odchylky sondy v jejím stanoveném maximálním rozsahu vychýlení. [2]

Mezi hlavní výhody použití kontaktních metoda patří: [2]

- Nízké náklady.
- Vysoká přesnost.
- Není senzitivní vůči barvě, nebo průhlednosti měřené součásti.
- Možnost měřit hluboké dutiny.

Jako nevýhody lze určit: [2]

- Pomalé snímání dat.
- Není vhodně pro měření předmětů z elastických, nebo měkkých materiálů.

Základní konfigurace dotykové sondy

Aby sonda dokázala plnit její funkci, tedy aby rozpoznala, kdy dochází k dotyku, musí mít některé základní komponenty:

Musí být zajištěn mechanický dotyk se zkoumaným předmětem. K tomu slouží kulička na špičce sondy. Kulička musí být velmi přesná a velmi tvrdá. Zároveň musí být otěruvzdorná, obvykle jsou tyto kuličky vyrobeny z rubínu. [25]

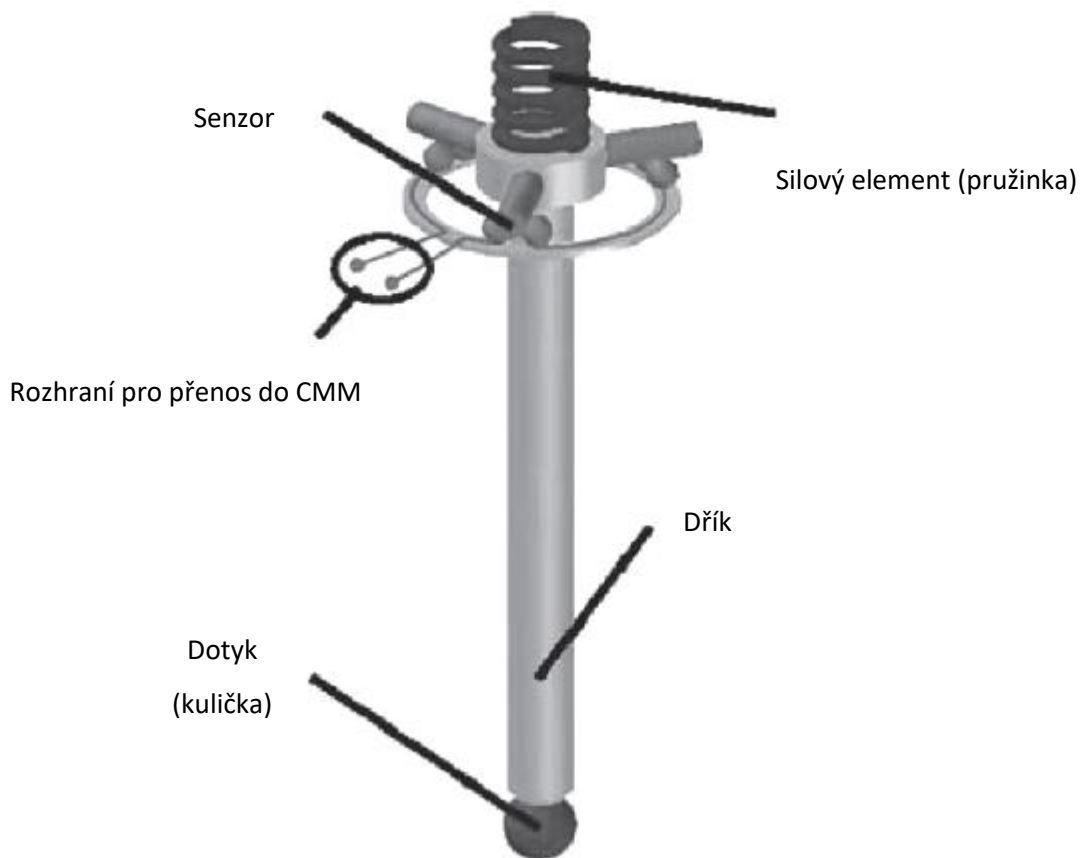
Další důležitou součástí je zařízení dřík, na jehož konci je umístěn dotyk. Ten slouží pro přenesení informace o kontaktu, respektive o síle dotyku. Dřík musí být pevný, musí mít nízkou teplotní roztažnost a také nízkou hmotnost. Příkladem materiálu, ze kterého se dřík vyrábí, může být ocel, keramika nebo plastové kompozity. [25]

Pro stabilizaci sondy v základní poloze je nutné mít nějaký element, který vytváří definovanou sílu snímání např. pružinku. Sílu snímání je nutné volit s přihlédnutím k měřenému předmětu a vlastnostem dříku a dotyku. Dále může tento element řešit okolní vlivy jako vibrace, nebo prach

na povrchu součásti. V moderních měřicích zařízeních může být síla řízena dynamicky a silové systémy jsou složitější než obyčejná pružinka. [25]

Kvůli rozpoznání momentu dotyku je nutný senzor. Moderní senzory dokážou vyhodnotit také míru a směr vychýlení. Poslední základní složkou je rozhraní pro přenos informace o dotyku do CMM, aby bylo možné zapsat polohu bodu. [25]

Silový element, senzory dotyku a rozhraní pro přenos do CMM jsou součástí snímací hlavy.



Obrázek 22: Základní dotykový snímací systém [25]

4.2. Bezkontaktní metody měření

Bezdotykové měřicí systémy jsou druhou hlavní kategorií senzorů, jak je vidět na Obr. 21. Z obrázku je také patrné, že nekontaktních metod měření je velké množství a využívají různé principy. Z názvu je patrný hlavní rozdíl oproti metodám kontaktním a to ten, že není zapotřebí fyzického kontaktu mezi snímačem a měřeným objektem a také je možné snímat více bodů najednou a měřit tak rychleji.

V případě nekontaktních metod je geometrie měřeného objektu reprezentována 2D řezy, nebo pomocí mraků bodů. Tyto řezy a mraky bodů jsou získány projekcí energetických zdrojů, jako je světlo, zvuk, nebo magnetická pole, na objekt zájmu. Poté je pozorována buď energie, která měřeným předmětem prošla, nebo energie, která se odrazila. [2]

Tvar měřeného předmětu je pak vypočítán triangulací, interferencí vln, algoritmy na zpracování obrazu, nebo měřením doby letu. Hlavní je, že v žádném případě nedochází ke kontaktu s objektem. [2]

Výhody bezkontaktního měření: [2]

- Rychlá digitalizace objemných předmětů.
- Není žádný fyzický kontakt předmětu se sondou.
- Možnost skenování elastických a měkkých předmětů.
- Dostatečné rozlišení a dobrá přesnost pro běžné aplikace.
- Možnost snímat také barvy.

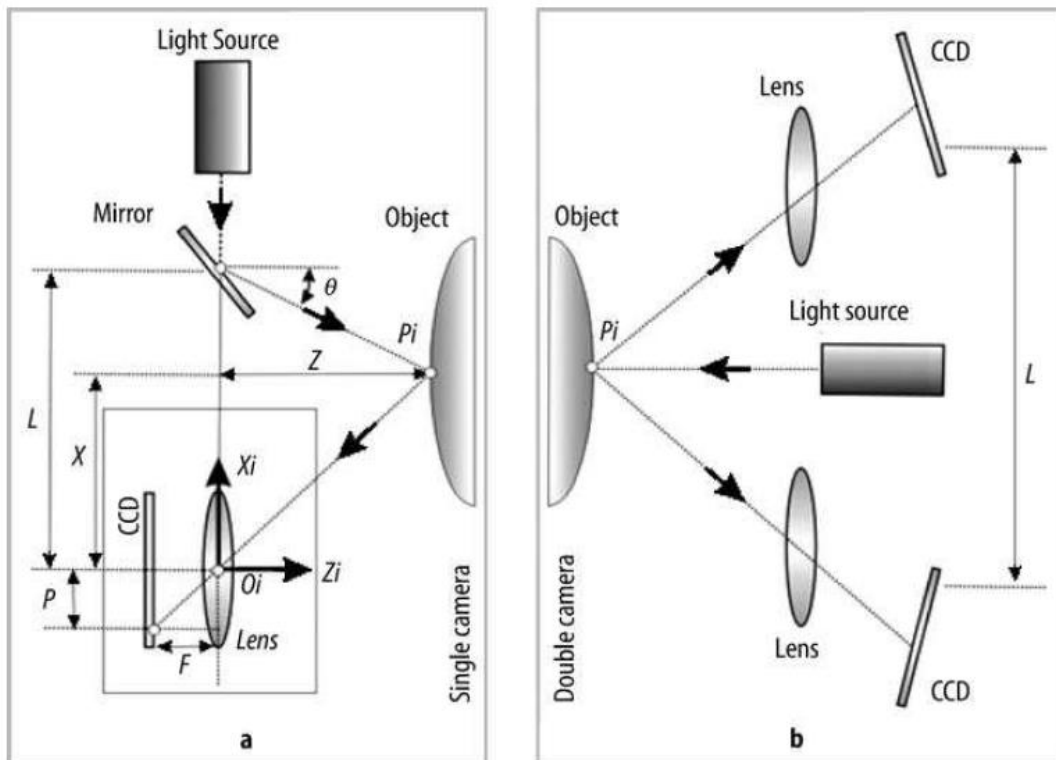
Nevýhody bezkontaktního měření: [2]

- Nižší přesnost ve srovnání s dotykovým měřením.
- Limity triangulačních metod při měření složitých, průhledných a lesklých předmětů.
- Možné problémy u některých barev povrchu.
- Oproti dotykovým metodám je senzitivní například na nečistoty na povrchu měřené součásti a povrch tak musí být důkladněji připravený.

Laser scannery

Většina laser scannerů využívá geometrickou triangulaci pro určení souřadnice povrchu zkoumaného předmětu. Triangulace je metoda, kdy vzdálenosti a úhly mezi zdrojem světla a fotosenzitivními čipy (většinou CCD – charge-coupled device kamerou) slouží k výpočtu souřadnic bodu. [2]

Obr. 23 znázorňuje dvě různé možnosti uspořádání triangulačních zařízení, která využívají CCD kamery: systém s jednou kamerou a se dvěma kamerami. V rozložení s jednou kamerou zařízení přenáší světelný bod, nebo linii na měřený objekt pod určitým úhlem. CCD kamera následně zaznamenává pozici bodu (nebo linie) na povrchu předmětu. Při použití dvou kamer není důležitý úhel ani pozice zdroje světla, který opět může vysílat bod, nebo například přímku. Výpočet polohy vzniká pouze ze záznamu obou kamer.[2]



Obrázek 23: Triangulační metody a) jednokamerový b) dvoukamerový systém

Princip triangulační metody je dobře patrný na Obr 23. a). Silný a soustředěný paprsek je promítán na měřený objekt pod určitým úhlem (θ). Fotosenzitivní čip následně zachytí odražený paprsek. Díky známé vzdálenosti mezi zdrojem světla a CCD kamerou (L) můžeme za pomoci triangulace vypočítat pozici snímaného bodu (linie). [2]

$$Z = \frac{F * L}{P + F * \tan \theta}$$

$$X = L - Z * \tan \theta$$

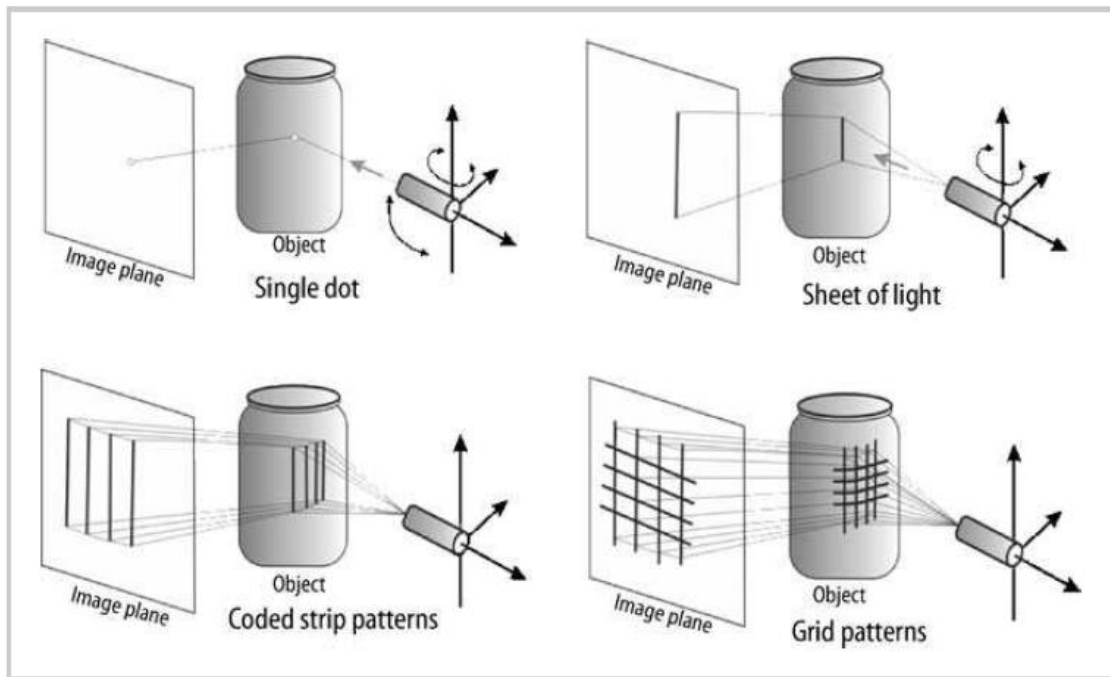
Chyba měření je přímo úměrná výšce trojúhelníka (Z) a nepřímo úměrná ohniskové vzdálenosti (F) a základní vzdálenosti (L). Proto je možné zvětšením vzdálenosti mezi CCD kamerou a zdrojem světla zvýšit přesnost měření. Vzhledem ke konstrukci laser scannerů a jejich omezené maximální velikosti není možné tuto vzdálenost zvětšit moc. Proto jsou scannery používány především pro měření z krátké vzdálenosti. [2]

Proužková projekce

Proužková projekce využívá promítání světelného vzoru pod známým úhlem na povrch měřené součásti. Následně je zachytáván výsledný odražený obraz. Analýzou obrazu dojdeme k souřadnicím bodů na povrchu. Princip vyhodnocení bodů je stejný jako v triangulační metodě,

liší se tedy pouze použitím složitějšího vzoru světelného zdroje. Světlo nemusí být pouze v podobě pruhového vzoru, ale může být využita také mřížka. [2]

Použitím více pruhů světla oproti triangulační metodě můžeme zvýšit kvalitu snímání určitých povrchů. Výhody oproti laserovým triangulačním systémům jsou především v ještě vyšší rychlosti snímání povrchu objektu, možnosti snímání barvy povrchu a také není zapotřebí laserového zdroje. [2]



Obrázek 24: Různé vzory světla pro použití při proužkové projekci

Měření doby letu (Time of flight)

Pro měření vzdálenosti lze využít také metodu, která využívá k výpočtu konečné rychlosti šíření světla. Principem je měření doby, za jak dlouho se vrátí odražený paprsek světla, případně laserový paprsek, nebo elektromagnetické záření, od zkoumaného objektu. Protože rychlost světla je známá, je možné spočítat délku trasy letu světla, pokud známe délku doby letu světelného paprsku. [2][26]

Vztah pro určení dráhy:

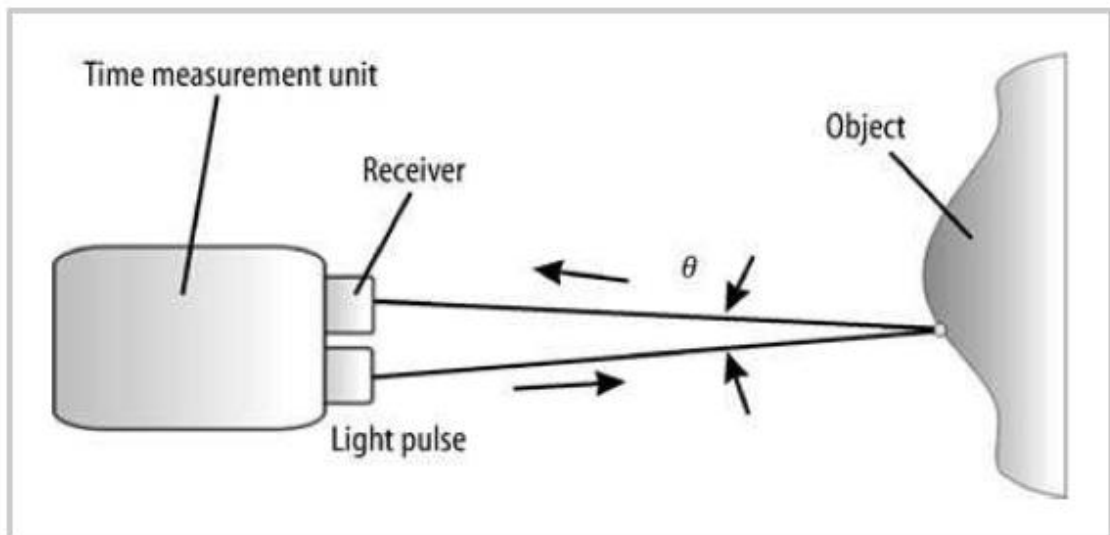
$$d = \frac{c * t}{2}$$

Kde:

- c – rychlost šíření elektromagnetického záření ve vakuu

- d – vzdálenost předmětu
- t – změřená doba letu

Během měření je nutné zachovat homogenní prostředí pro šíření elektromagnetického záření. Metoda má výhodu především v možnosti měření velkých vzdáleností, na krátké vzdálenosti (malé předměty) metoda není vhodná. Používá se například při měření velkých, nebo velmi vzdálených objektů, jako jsou budovy, nebo mosty. [2][26]



Obrázek 25: Princip měření doby letu [2]

Z obrázku je patrné, jak funguje scanner na principu doby letu. Pro většinu aplikací je úhel θ velice malý, a proto nemá žádný vliv na celkové měření. Díky rychlosti pohybu světla je možné udělat tisíce měření za vteřinu. [2]

Hlavní nevýhodou přístrojů na měření délky letu je jejich velikost a zároveň neschopnost zachytit texturu povrchu objektu, pouze tvar. Také rychlost měření předmětu je velmi nízká a tato zařízení nejsou vhodná pro malé předměty. [2]

Fotogrammetrie

Díky vzrůstající poptávce po geometrických 3D modelech v různých odvětvích lidského zájmu jako je filmový průmysl, mapování povrchu, nebo ulic (Street View od Google) a v neposlední řadě strojírenství je nutné mít také systém, který není tak složitý a především drahý, jako předchozí metody bezkontaktního měření. [28] [29]

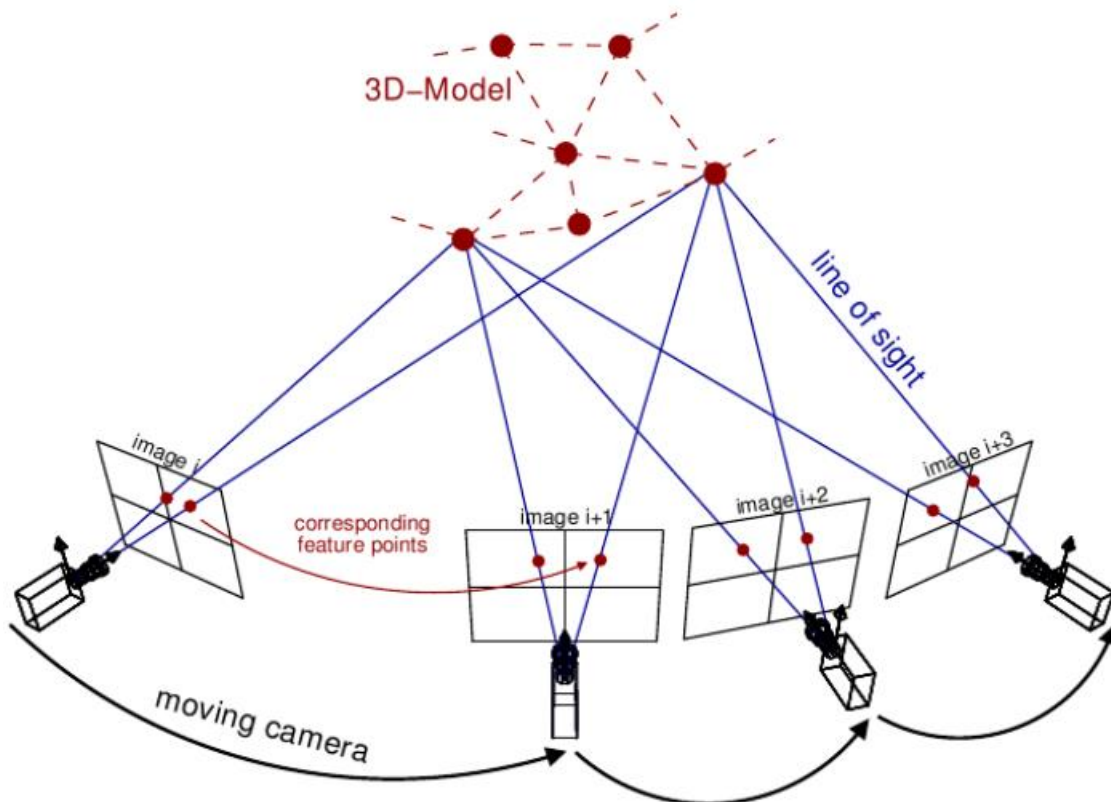
Toto umožňuje právě fotogrammetrie, která je schopna generovat 3D modely z obrázků. Výhodou je, že obrázky mohou být pořízeny jakýmkoliv způsobem, takže tato technologie velice těží z rozmachu digitální fotografie. Na základní rekonstrukci objektu dnes stačí uživateli běžný

mobilní telefon s kamerou. Výhodu této technologii poskytuje stále zvětšující se rozlišení a lepší kvalita digitálních fotografií, a také obrovské databáze snímků, které jsou dnes běžně k dispozici každému z nás. Dnes nachází široké uplatnění také využití běžně dostupných dronů, což dává této technologii další rozměr. [28]

Fotogrammetrii lze dělit dle několika základních vlastností: [29]

- Polohy odkud jsou fotografie pořízeny (letecká, blízká, pozemní).
- Způsobu záznamu obrazu.
- Metody zpracování.
- Počtu snímků.

Samotná tvorba 3D modelů se skládá z pořízení několika snímků objektu. Je důležité, aby snímky byly pořízeny v co nejvyšší možné kvalitě a bylo co nejvíc snímků z různých pohledů na měřený objekt. Tyto snímky jsou následně za pomoci softwarových algoritmů zpracovány a model je pak také rozměrově kalibrován. Na zpracování snímků existuje mnoho softwarových nástrojů, z nichž některé jsou dostupné i zdarma, jako například: COLMAP, Meshroom, Regard3D, nebo 3DF Zephyr. [28][31]



Obrázek 26: Schéma postupu snímání objektu při fotogrammetrii [30]

Měření kamerou

Podobně jako u fotogrammetrie spadá tato metoda do takzvané pasivních metod, které se vyznačují tím, že nevyžadují ke své funkci žádnou projekci světla na povrch měřeného objektu. [2]

Tato měření se často využívají pro měření malých objektů a většinou slouží pouze pro kontrolu rozměru ve 2D.

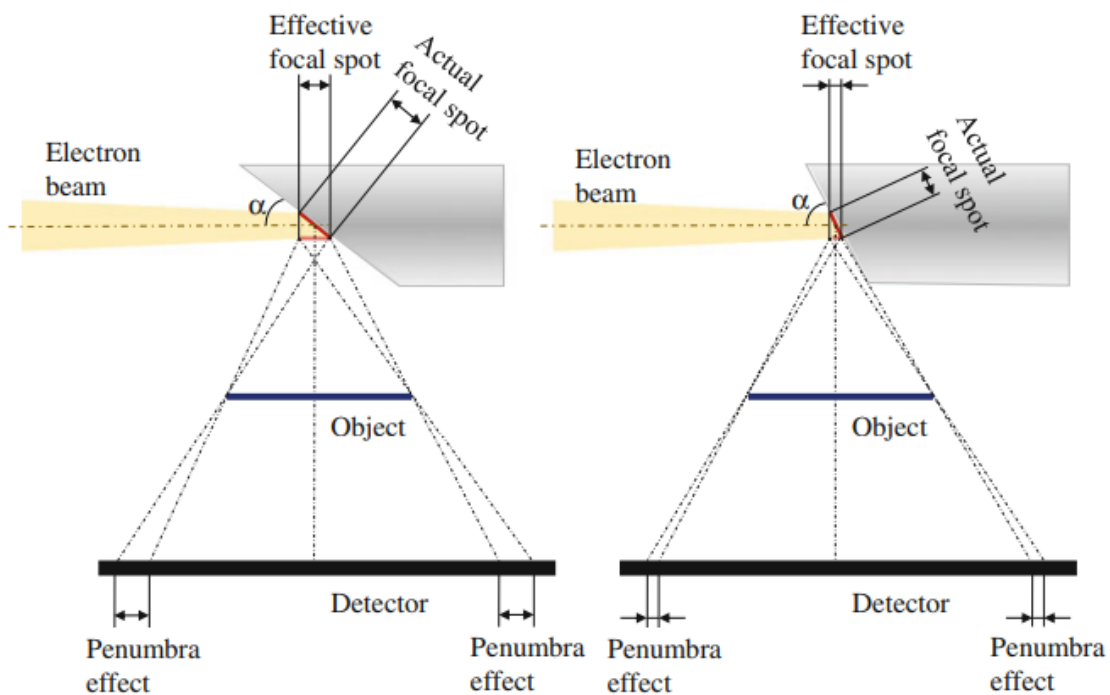
Všechny bezkontaktní metody, které jsou zmíněny výše, spadají do metod optických a využívají ke své funkci nějakou formu CCD čipu. Následovat budou metody, které by se v kategorii bezkontaktních daly označit souhrnně neoptické. Spadají sem metody jako akustický sonar, mikrovlnný radar, nebo výpočetní tomografie.

Výpočetní tomografie

Výpočetní tomografie (CT – Computed Tomography), je nedestruktivní bezkontaktní metoda měření, která pro svojí funkci využívá rentgenového záření. Tato metoda je stále rozšířenější v průmyslu, kde se využívá především pro měření rozměrů a inspekci dílů. Data pořízená touto technologií obsahují jak informace o povrchu, tak také o vnitřní stavbě, díky čemuž se hojně využívá pro kontrolu vnitřních vad. [2] [32]

Vznik rentgenového záření probíhá v rentgenové trubici (rentgenka). Principem je katodové záření, které vzniká ve vakuové trubici s anodou a katodou, na které je přiváděno napětí. Elektrony jsou vyzářeny z katody, elektrické napětí je urychlí a vzniká tak elektronový svazek. Tento svazek následně dopadá na terč z těžkého kovu (často z wolframu), kde je svazek zbrzděn a energie je přeměna na teplo a na emitované fotony rentgenového záření. [32]

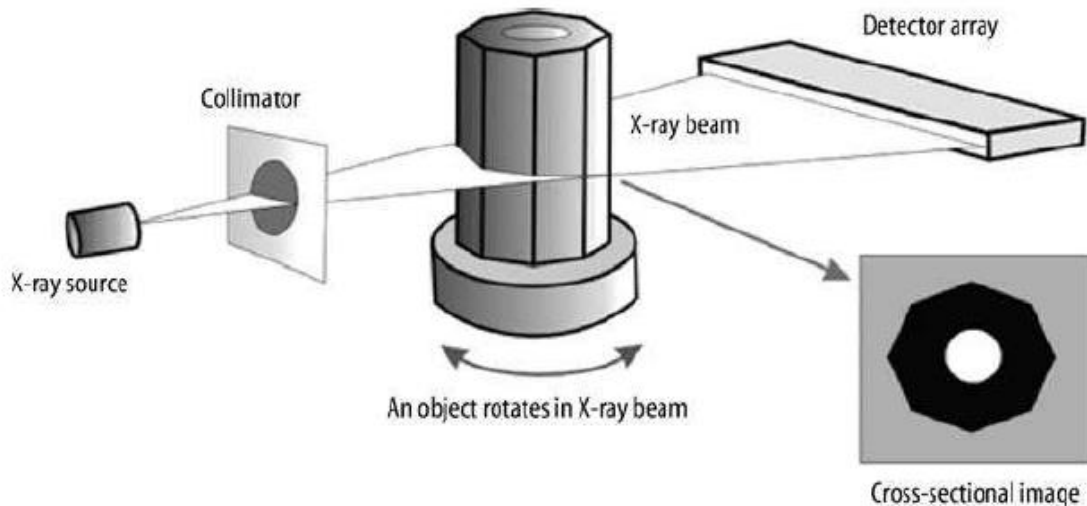
Dopadající elektronový svazek má vliv na velikost ohniska, ze kterého je z wolframového terče vyzařováno rentgenové záření. Velikost ohniska má vliv na rozmazání výsledného obrazu, jak je vidět na Obr. 27. Tomuto efektu se říká penumbra. [33]



Obrázek 27: Vliv ohniska na výsledný obraz [33]

Každý materiál absorbuje určitou dávku záření a absorbovaná část také záleží na objemu materiálu, kterým záření prošlo. Absorpce je závislá na atomovém čísle prvku konkrétního materiálu. Pro rentgenování plastů je tak zapotřebí výrazně menší výkon rentgenky než pro díly z kovů. [32]

Princip měření pak spočívá v pořízení snímků díky rentgenovému záření. Záření prochází měřeným objektem, který pohltí jeho část, a následně je zbylé záření zachytáváno na detektoru, jak je patrné z Obr. 28. Tím je vytvořen snímek v určité poloze. Měřený díl se nadále otáčí (je možné použít kontinuální otáčení a zároveň otáčení po krocích) a jsou zaznamenávány další snímky, kterých je velké množství. Následně jsou jednotlivé snímky spojeny softwarem a vzniká tak 3D obraz součásti (vznikají zde rozměrové pixely, tzv. voxely – objemové pixely) včetně vnitřní struktury. [2] [32]



Obrázek 28: Princip výpočetní tomografie [2]

Výpočetní tomografie poskytuje spoustu výhod, jako je získání vnitřní stavby součásti, poměrně rychlé skenování a další. Nevýhodami jsou například malé maximální rozměry měřeného předmětu, které závisí na velikosti přístroje, dále pak vysoká spotřeba energie pro materiály s vyšší hustotou. Problémem je také rentgenování součásti z různých materiálů, kde se složitě nastavuje výkon rentgentky a na výsledných snímcích vznikají různé nežádoucí odrazy, které je zapotřebí následně softwarově odstranit. [32] [34]

Náklady na pořízení tomografu jsou vysoké, srovnatelně vysoké však mohou být náklady na pořízení počítačového vybavení, které musí měření zpracovávat a ovládat zařízení. Při požadavku na okamžité vyhodnocení chyb výrobku, např. na výrobní lince, mohou být pořizovací náklady na počítače i vyšší než cena tomografu. Dále jsou zde i vysoké náklady na provoz v porovnání s ostatními bezdotykovými metodami.

4.3. Bezdotykové snímací systémy na trhu

ZEISS COMET L3D 2

COMET L3D 2 je jeden z nejnovějších systémů vyvinutých firmou ZEISS. Jedná se o kompaktní zařízení, které pracuje na principu proužkové projekce. Světelným zdrojem je zde modrý LED projektor, jak je vidět na Obr. 29. ZEISS toto zařízení dodává se softwarem colin3D pro nastavení a provedení měření. [35]

Výhodou zařízení je, že se dodává včetně otočného stolu, a že je možné jej jednoduše sbalit a přenést na potřebné místo. Díky otočnému stolu je možné provést několik různých měření bez úpravy polohy součásti a tím je měření rychlejší. Zařízení disponuje škálou objektivů, které zaručují ideální poměr mezi maximální velikostí součásti a nejvyšším možným rozlišením snímků.

Zařízení je využitelné pro aplikaci ve většině aplikacích využívajících bezdotykové měřicí systémy.

Tabulka 1: Parametry ZEISS COMET dle výrobce pro objektivy s nejmenším a největším zvětšením [35]

Rozlišení kamrey	2448 x 2050 pixelů
Objem měřitelného prostoru (objektiv 45)	45 x 38 x 30 mm
Rozteč bodů v prostoru (objektiv 45)	18 μm
Objem měřitelného prostoru (objektiv 500)	481 x 404 x 250 mm
Rozteč bodů v prostoru (objektiv 500)	196 μm



Obrázek 29: ZEISS COMET L3D 2

Nikon L100 a LC15Dx

Nikon L100 a LC15Dx jsou laser skenery určené pro použití ve spolupráci se souřadnicovými měřicími stroji. Nabízejí bezkontaktní měření s vysokou přesností. [36]

L100 je vhodná na aplikace, kde jsou vyžadovány co nejlepší výsledky v co nejkratším čase. Má skenovací rychlost až 200 000 bodů za sekundu v maximálním rozlišení a při velmi nízké úrovni šumu. Skener disponuje funkcí adaptivního řízení intenzity laseru, která se nastavuje podle intenzity posledních měřených bodů. [36]

Tabulka 2: Parametry L100 dle výrobce [36]

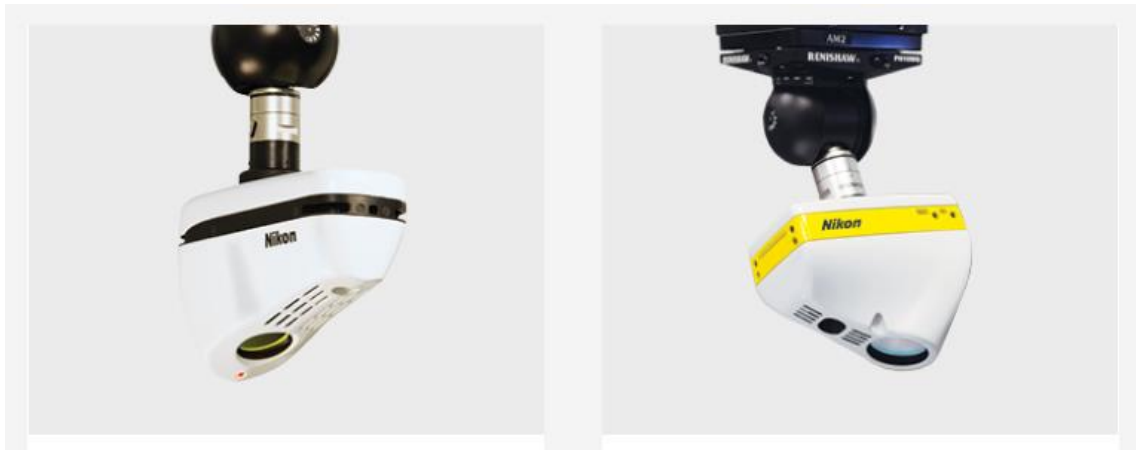
Přesnost snímání (MPEp)	6,5 μm při 1σ
Chyba měření délky na ball baru (MPEe)	6 + L/350 μm
Rozptyl nasnímaných bodů	26 μm
Rychlost snímání bodů	200 000 bodů/s

LC15Dx je jeden z nejpřesnějších laser skenerů, které jsou momentálně dostupné na trhu. Teoretická chyba měření udávaná výrobcem se přibližuje měření dotykovou sondou. Tento skener se tedy hodí na velmi přesné měření menších součástí, případně jejich částí, kde je měření dotykem obtížné. Zároveň je měření stále velice rychlé oproti kontaktnímu měření díky měření 70 000 bodů za sekundu. [36]

Skener disponuje adaptivní intenzitou paprsku a citlivostí kamery. Zároveň skener obsahuje nejlepší možnou optiku firmy Nikon. [36]

Tabulka 3: Parametry LC15Dx dle výrobce [36]

Přesnost snímání (MPEp)	1,9 μm při 1σ
Chyba měření délky na ball baru (MPEe)	4+ L/350 μm
Rozptyl nasnímaných bodů	22 μm
Rychlost snímaných bodů	70 000 bodů/s



Obrázek 30: L100 vlevo a LC15Dx vpravo [36]

ModelMaker H120

ModelMaker H120 je laser skener od firmy Nikon. Na rozdíl od předešlých laser skenerů však slouží pro ruční měření. Používá se především ve spolupráci s měřicími rameny. Díky tomu je tento měřicí systém mobilní, velice flexibilní a dokáže obsáhnout měření a objemných předmětů. Díky vysoké snímkovací frekvenci až 450 Hz a 2000 snímaných bodů na jeden pruh se jedná o velice efektivní zařízení. [37]

Tabulka 4: Parametry LC15Dx dle výrobce [37]

Přesnost snímání	7 μm při 1 σ
Šířka snímacího pruhu	120 mm
Rozptyl nasnímaných bodů	35 μm
Počet snímaných bodů na jeden pruh	2 000 bodů
Frekvence snímání	450 Hz



Obrázek 31: ModelMaker H120 [37]

Pro měření s laser skenerem H120 je vhodné využít také měřicích ramen od společnosti Nikon. Jako příklad může sloužit rameno Nikon MCAx S. Jedná se o přesné 7osé souřadnicové rameno, které dokáže bez problému měřit uvnitř dílů, tak také okolo nich. Tato zařízení jsou vhodná pro měření větších součástí, jako jsou například dveře automobilu. Výhoda ramene je také jeho přenosnost. [37]



Obrázek 32: Ukázka celého měřicího systému Nikon MCAx S + ModelMaker H120 [37]

APDIS MV4x0 Laser Radar

APDIS MV4x0 Laser Radar je bezkontaktní měřicí zařízení, které pracuje na principu měření doby letu. Obecně se dá říct, že všechny laser radary pracují právě na tomto základě. Tento konkrétní model je od společnosti Nikon a je určen pro rychlé měření velkých celků. Podle zvoleného typu zařízení je maximální pracovní rozsah 30, nebo 50 m. [38]

Přesnost při měření délkových rozměrů je $20 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}/\text{m}$. Rychlost skenování je až 1000 bodů za sekundu u nejvyšší řady přístroje. Laser radar nachází široké využití od měření větších dílů v automotive, jako jsou dveře, boční díly, a další, až po skenování velkých sestav jako mohou být letadla. [38]



Obrázek 33: APDIS MV4x0 Laser Radar [38]

Dodavatelé výpočetních tomografií

Výrobou výpočetních tomografií se zabývá mnoho společností. Mezi přední výrobce patří například Carl ZEISS, General Electric, Siemens, Nikon Metrology a další. Společnosti se zajímají výrobou jak tomografií pro strojní využití, tak také pro využití v oblasti medicíny. V práci bude věnován menší rozbor tomografií společnosti Carl ZEISS.

Společnost ZEISS nabízí širokou paletu tomografií. Dají se rozdělit do 4 kategorií, kde každá se hodí na určitý typ provozu a využití. Hlavní parametry, kterým se od sebe stroje odlišují jsou: Rozlišení, přesnost, maximální velikost měřené součásti a rychlost měření.

První kategorií jsou stroje typu METRONOM, které jsou popsány jako řada pro vysoce precizní metrologii a inspekci na úrovni laboratorního využití. Její hlavní předností je tedy vysoká

přesnost. Rozlišení je spíše průměrné, maximální velikost součásti je nadprůměrná a rychlost měření je průměrná. [39]

Druhou řadou určenou pro laboratorní podmínky je Xradia. Ta vyniká nejvyšším možným rozlišením, naopak velikost pracovního prostoru je nejmenší a stejně tak rychlost měření. Přesnost v porovnání s ostatními produktovými řadami výrobce neudává. [39]



Obrázek 34: Vlevo tomograf řady Xradia, vpravo řada METRONOM [39]

Další dvě řady jsou určené do výrobních závodů. Vyznačují se tak především vyšší rychlostí měření oproti laboratorním strojům, aby bylo možné kontrolovat výrobky okamžitě ve chvíli výroby, a také možností automatizace měření.

Zde se produktové řady dělí podle toho, zda inspekce probíhá v režimu 2D, nebo 3D. Pro 2D kontrolu je řada BOSELLO, rozlišení je velmi nízké a přesnost není uvedena. Maximální velikost součástí se pohybuje v závislosti na konkrétním typu od průměrné velikosti až po nejvyšší možnou ze všech tomografů firmy ZEISS. Rychlost měření je vyšší oproti tomografům pro 3D analýzu. [39]

Poslední kategorií jsou stroje VoluMax, které jsou schopny analýzy ve 3D. Rozlišení je střední až nízké, podle konkrétního typu. Přesnost není uváděna. Velikost strojů (a jejich pracovních prostorů) je velmi variabilní od podprůměrných až po maximální velikosti v porovnání s celým portfoliem. Rychlost měření je o trochu menší než v případě strojů pro 2D měření, stále však vysoká oproti laboratorním zařízením. [39]



Obrázek 35: Vlevo tomograf řady BOSELLO, vpravo řada VoluMax [39]

5. Aditivní technologie pro zpracování polymerů

Aditivní technologie, nebo také 3D tisk, je technologie výroby, která vytváří hmotné objekty jejich výstavbou vrstvu po vrstvě. To je velký rozdíl oproti klasickým technologiím, které jsou většinou substraktivní, tedy odebírají materiál na přesně určeném místě daným způsobem, nebo oproti technologiím tváření a odlévání, kde se pracuje rovnou s celým objemem součásti, kdy se součást dává dohromady jako celek. Proces aditivní výroby nevyžaduje přípravu nástrojů, ani plánování jejich pohybů. [2] [40]

Místo složitých přípravných procesů před fází výroby aditivní výroba začíná přímo po vytvoření 3D CAD modelu. Model je rozdělen (rozsekán) na mnoho malých vrstev, která následně slouží jako geometrická data pro vytvoření každé vrstvy. Po vytvoření kompletní vrstvy následuje další vrstva v pořadí a tímto postupným procesem je vytvořen kompletní objekt. Příklad je vidět na Obr. 36. [40]

Ve spojitosti s aditivní výrobou se často používá termín rapid prototyping. Pokud bychom porovnali samotnou rychlost výroby 3D tiskem a jinou technologií, jako třeba odléváním, pak jeden odlitek bude s velkou pravděpodobností vyroben rychleji než jeden vytisknutý díl. Velký rozdíl je však v čase nutném pro přípravu výroby. Pokud by byl díl odléván, trvalo by i týdny, než se vytvoří forma, aby mohl vzniknout odlitek, zatímco při aditivní výrobě je možné díl vytvořit ihned po jeho návrhu v CAD softwaru. Právě díky těmto vlastnostem je tato technologie vhodná pro co nejrychlejší tvorbu prototypů. [40]



Obrázek 36: Podstata skládání vrstev při aditivní výrobě [41]

Díky rychlosti převedení 3D modelu do reality se aditivní výroba využívá také pro zrychlení výroby nástrojů a forem. Tímto způsobem nazývaným rapid tooling je výrazně snížena také cena výroby nástrojů a k prvním vyrobeným dílům je možné dostat se rychleji a levněji. Výhodou je také to, že není nutné skladovat velké množství nástrojů, ale dají se rychle vyrobit. Toto je velkou výhodou v oblasti náhradních dílů jako takových a může tím být zaručena dostupnost náhradních dílů i dlouho po ukončení výroby daného stroje.

V dnešní době je možné využít aditivní výrobu nejen pro plasty, ale také kovy a další materiály, jako jsou například stavební materiály. V této práci zůstane u přehledu aditivní výroby, která jako materiál využívá polymery.

Výhody aditivní výroby: [2]

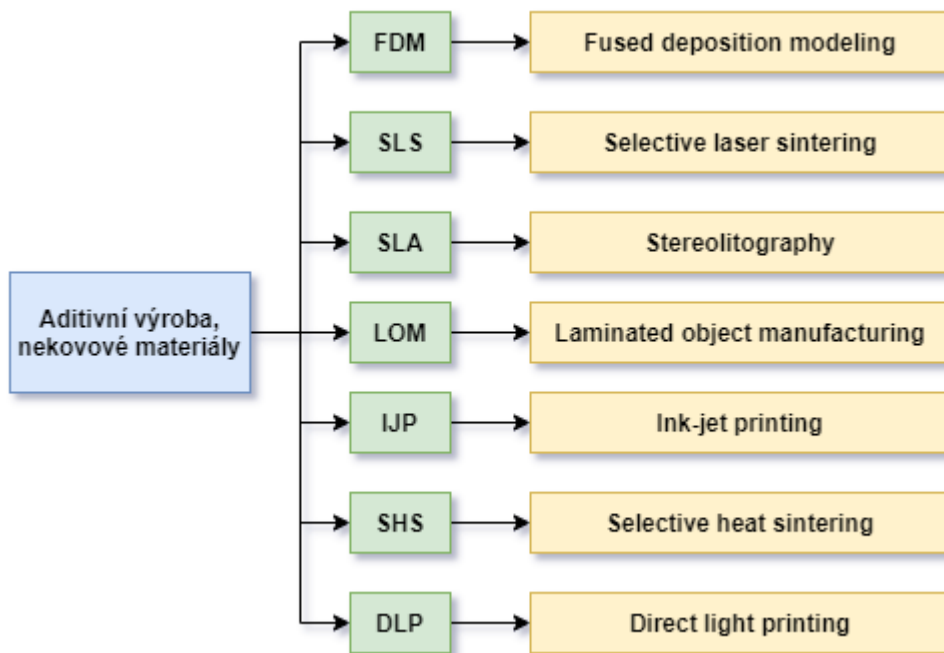
- Velká volnost, co se týká složitosti tvaru výrobku. Je možné tvořit složité komplexní díly a jejich sestavy.
- Dobrá a jednoduchá automatizace.
- Jednoduchá příprava vrstev před výrobou.
- Snižuje cenu výroby prototypů a dílů, které se nevyrábí ve velkých sériích.

Nevýhody: [2]

- Přesnost aditivní výroby nedosahuje úrovně klasických technologií.
- Většinou je nutný postprocessing součásti.
- Mohou vznikat nespojitosti ve vlastnostech materiálu v objemu celé součásti.

5.1. Aditivní technologie pro polymery

Aditivní technologie má mnoho specifických metod a postupů. Mnoho výrobců uvádí na trh přístroje a technologie s velmi rozdílným přístupem ke stavbě jednotlivých vrstev tisku. Metody se dají dělit dle druhu materiálu, který využívají, jako např.: plasty, kovy a další. Dále dle formy, v jaké je materiál dodáván, tedy v podobě drátu, prášku, granulátu, nebo v tekuté formě. Dělení může být také v závislosti na dodávané energii pro vytvrzení vrstvy, nebo roztavení materiálu. Je možno využít například laseru, UV světla, elektronového paprsku, nebo odporového ohřevu v tryskách.

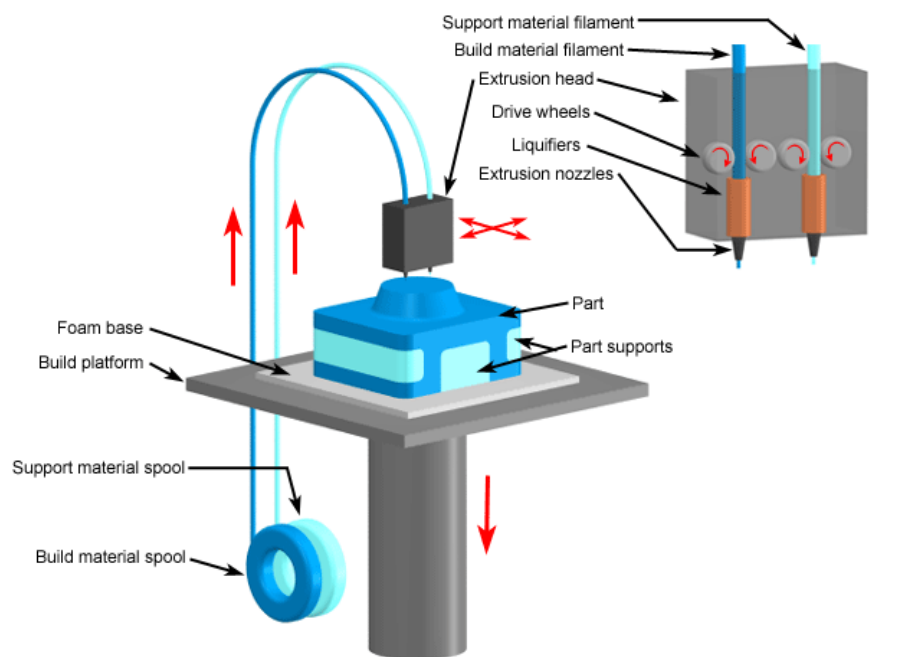


Obrázek 37: Technologie aditivní výroby pro polymery

FDM – Fused deposition modeling

FDM funguje na principu vrstvení materiálu za pomoci tavicí trysky, do které je přiváděn materiál nejčastěji ve formě drátu. Materiál může být také ve formě prášku, nebo granulátu. Vzhledem k nutnosti tavení materiálu používá tato technologie termoplasty, tedy takové polymery, které je možné roztavit a následně nechat ztuhnout. Tryska drží určitou teplotu tavení a postupně v dané vrstvě nanáší materiál, který následně tuhne a spojuje se s předchozí nanesenou vrstvou. Jakmile je vytvořena celá vrstva, sníží se platforma, nebo stoupne tryška a nanáší se vrstva další. [40]

Tato technologie, původně vyvinuta firmou Stratasys, je momentálně jedna z nejrozšířenějších. Zejména díky firmám jako Průša3D je cenově dostupná pro širokou veřejnost. Tiskárny často nabízejí také možnost použití více trysek a tisknout tak více materiálů v jednom dílu. Toto je vhodné například pro tisk podpor z materiálu, který je jednodušší odstranit.



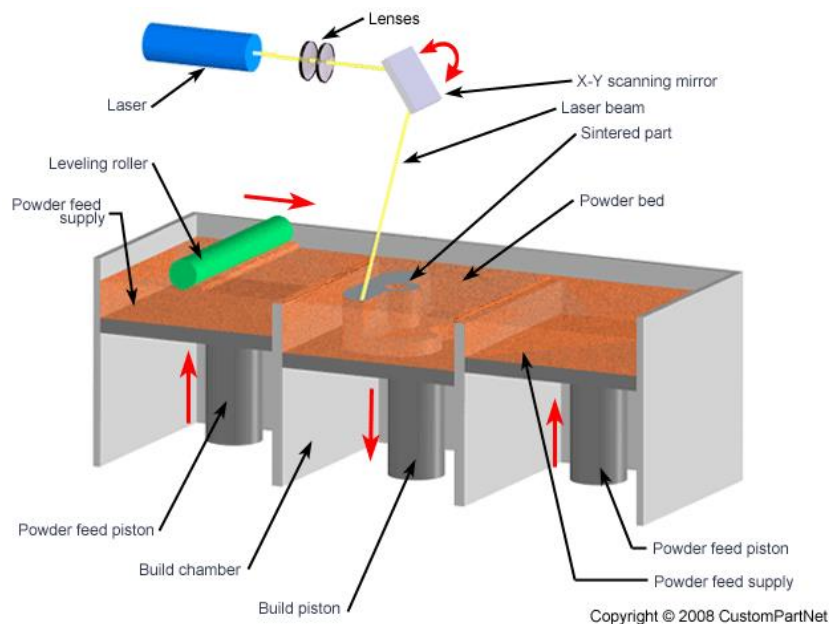
Obrázek 38: Technologie FDM [40]

SLS – Selective laser sintering

Technologie SLS funguje na principu práškového lože. Na pracovní desku je nanášena prášková vrstva materiálu, která odpovídá jednomu řezu modelu. Nanášená vrstva je následně v daných místech vytvrzována za pomoci pohyblivého laserového paprsku. Po vytvrzení jedné vrstvy dojde

k poklesu pracovní plochy, nanesení nové vrstvy prášku a jejímu opětovnému vytvrzení, dokud není součást kompletní. [40]

Velkou výhodou této technologie je odpadnutí nutnosti stavět podpory pro díl, protože přebytečný prášek v loži slouží jako podpora. Nevýhodou je, že není možné vytvářet uzavřené struktury, jelikož je třeba myslet na následné odstranění zbylého prášku po dokončení součásti. Zbylý prášek lze recyklovat a znovu použít. [40]

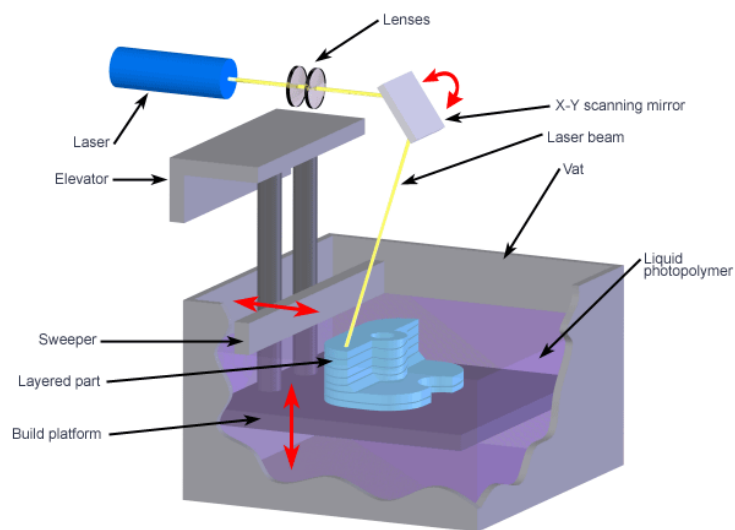


Obrázek 39: Technologie SLS [40]

SLA – Stereolithography

Stereolitografie je považována za nejrozšířenější metodu 3D tisku. Jedná se také o nejstarší technologii aditivní výroby. Její pomocí je možné vytvořit velmi přesné a detailní díly. SLA využívá podobně jako SLS lože, které v tomto případě není plněno práškovým polymerem, ale tekutým fotopolymerem. Fotopolymer je vytvrzován UV paprskem, který svým pohybem kopíruje geometrické tvary právě tvořené vrstvy. Zbylá místa zůstávají tekutá. Po dokončení vrstvy dojde k poklesu pracovní plochy, doplní se fotopolymer a začne se tvořit nová vrstva. Tento postup se opakuje, dokud není dokončena celá součást. Po jejím dokončení se součást ještě může UV vytvrdit jako celek. [40]

Nevýhodou technologie je, že tekutý fotopolymer netvoří přirozenou podporu pro vyráběné struktury a je tedy nutné podpory přidávat. Bohužel zde není možnost zvolit pro podpory jiný druh materiálu (jako u FDM) a celý díl je ze stejného materiálu. Proto může být následné odstranění podpór složitější.

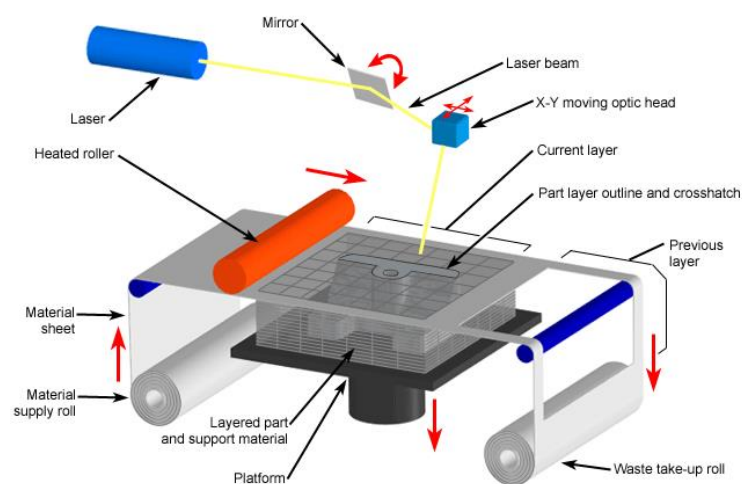


Copyright © 2008 CustomPartNet

Obrázek 40: Technologie SLA [40]

LOM – Laminated object Manufacturing

Princip této metody spočívá v nanesení fólie (listu) materiálu na celou vrstvu pracovní plochy, kde dojde k jejímu spojení s předchozí, již hotovou vrstvou. Po spojení vrstev se laserem odřízne přebytečná část horní vrstvy, pracovní plocha klesne přesně o výšku fólie a podavač podá na horní plochu novou fólii. [40]



Copyright © 2008 CustomPartNet

Obrázek 41: Technologie LOM [40]

IJP – Ink-jet printing

Technologie IJP spočívá ve využití trysek, ze kterých konstantně odkapávají malé kapičky materiálu, který je připraven v tekuté fázi. Po dopadu na plochu kapky okamžitě chladnou a tuhnou a takto dojde k vytvoření celé vrstvy. [40]

Proces ink-jet printing je oproti ostatním technologiím aditivní výroby pomalý, na druhou stranu je možné dosahovat vysoké přesnosti a kvality povrchu. Proto je tato technologie využívána hlavně na high-tech produkty. [40]

5.2. Materiály pro aditivní výrobu z polymerů

V současnosti je možné v aditivní výrobě používat nepřeberné množství materiálů od klasických, jako jsou plasty a kovy, až po tisk potravinářských materiálů, nebo stavebních materiálů a z nich celých budov. Bude následovat přehled vybraných plastových materiálů používaných pro 3D tisk.

ABS

ABS tedy Akrylonitrilbutadienstyren je amorfni termoplastický kopolymer. Jedná se mechanicky odolný, houževnatý a tuhý plast. Dobře odolává nízkým i vysokým teplotám, je zdravotně nezávadný, málo nasákvavý a dobře opracovatelný. ABS dobře odolává kyselinám, hydroxidům, olejům a tukům. [42]

Materiál je vhodný pro funkční díly a nástroje pro běžné použití. Nehodí se pro venkovní použití, protože není dlouhodobě odolný povětrnostním vlivům. Je také náchylný na změny teplot, a při tisku vznikají velká smrštění. Proto je důležité použít při tisku vyhřívanou podložku a součást následně ochlazovat pomalu. Teplota tisku je 220-240 °C. [42]

PLA

PLA celým názvem polylactic acid (kyselina mléčná) je polymer významný zejména svojí plnou odbouratelností biologickým způsobem. Je vyráběna z bramborového, nebo kukuřičného škrobu, nebo také z cukrové třtiny. Podíl využití tohoto materiálu v 3D tisku roste. [42]

Teplota tisku je 185–235 °C, která je poněkud nižší a je třeba na tento limit dbát např. při broušení výrobku. Jinak se jedná o materiál velice univerzální a je vhodný pro tisk předmětů rozličných tvarů a velikostí především metodou FDM, ve které se jedná společně s ABS o nejvyužívanější materiál. Nevýhodou je vyšší nasákvavost a může tak absorbovat vzdušnou vlhkost. [42]

ASA

Akrylonitril-styren-akryl, jak zní celý název polymeru, je materiál, který slouží jako alternativa k ABS a má oproti ABS vyšší odolnost vůči povětrnostním vlivům. Jedná se kvalitní termoplast s vysokou odolností vůči UV záření. Mezi další výhody patří mechanická odolnost, tuhost, dobrá zpracovatelnost na 3D tiskárnách a teplotní odolnost. [42]

Teplota tisku je 250–255 °C a materiál je vhodný na většinu aplikací. Jeho tuhost je vyšší než ABS, a proto se hodí na náročnější aplikace. Je také dražší. Stejně jako u ABS je vhodné využít vyhřívanou podložku a je vhodné jej tisknout v uzavřené komoře s vyšší teplotou. Problém s teplotou při tisku je možné vyřešit použitím různých variant materiálu. Například ASA 275 má tiskové parametry podobné spíše PLA, ale jsou zhoršené mechanické vlastnosti. Odolnost vůči UV však zůstává zachována. [42]

PET

Materiál polyethyltereftalát je jedním z nejvíce využívaných plastů na světě. Používá se především na lahve, nádoby a obaly na potraviny a na oděvní vlákna. V aditivní výrobě se většinou využívá modifikovaná varianta PET-G, kde „G“ znamená modifikovaný glykol, protože je jednodušeji tisknutelný a je odolnější vůči nárazu. [42]

PET-G je dobrým kompromisem mezi vlastnostmi ABS (mechanická a teplotní odolnost) a PLA (jednoduchý tisk). Materiál je možné recyklovat. Teplota tisku je 210–235 °C a při tisku je vhodné zahřívat podložku. PET-G má dobrou odolnost vůči kyselinám a rozpouštědlům a dobře odolává nízkým i vysokým teplotám. [42]

Následující tabulka ukazuje cenové srovnání materiálů. Ceny vychází z obchodu jednoho prodejce ve stejnou dobu.

Tabulka 5: Ceny výše uvedených materiálů [42]

ABS	535 Kč/kg
PLA	490 Kč/kg
ASA	625 Kč/kg
PET-G	480 Kč/kg

6. Aplikace procesu RE na vybranou součást

Během experimentální části práce bude aplikován kompletní postup reverzního inženýrství, který byl popsán v teoretické části práce, na vybranou součást. Objektem zájmu bude plastový kryt karburátoru z mopedu Stadion S22, který je vidět na Obr. 42. Moped se vyráběl v letech 1960 až 1965 a je dnes velmi žádaným zbožím pro sběratele.



Obrázek 42: Kryt karburátoru mopedu Stadion S22

Tento díl se na motorkách málokdy dochoval v původním stavu. Především část se žebry bývá často poškozená a sběratelé ji tak potřebují nahradit novým dílem. Jedinou možností, jak se k novému dílu dostat je vytvořit repliku, jelikož náhradní díly jsou již vzhledem ke stáří motocyklu obtížně dostupné. Na Obr. 23 je vidět dobová fotografie mopedu, na které je i originální kryt karburátoru.



Obrázek 43: Stadion S22 na oficiální dobovém snímku [43]

Plastový díl jako takový byl vyráběn na vstříkovacím lisu. Při detailním prozkoumání součástí jsou vidět dělicí roviny a místa, kde byl do forem vstříkován materiál. Na určitých místech je také patrná nutnost ručního dokončování dílu.

Aby bylo možné kryt karburátoru namontovat a sestavit na motoru motocyklu, je tato součást složena ze 4 dílů. Jedná se tedy o sestavu 4 dílů, jak je patrné z Obr. 44. Dva jednodušší díly „misky“ slouží k uzavření spodního otvoru a jsou shodné. Jejich nasazení do větších dílů „krytů“ není úplně jednoduché, avšak obě pasují do obou krytů a výsledné spojení působí těsně. Stejně tak spasování obou krytů do sebe je kvalitní a na svoje stáří působí sestava celkově hezkým a kvalitním dojmem.



Obrázek 44: Rozložený kryt karburátoru

Pro co nejlepší výsledky skenování součásti bylo prvním krokem očištění součásti. Za pomoci rozpouštědla a štětce byly odstraněny všechny nečistoty, usazeniny a mastnota. Především záhyby vnitřních částí byly značně zanesené provozními kapalinami, na kterých ulpívala další nečistota. Všechny tyto nečistoty by do výsledného mraku bodů vnesly spoustu chyb, a proto bylo zapotřebí provést očištění precizně.

6.1. Skenování

Pro měření součástí byly zvoleny dva různé snímací systémy, aby bylo možné porovnat jejich výsledky a následně vybrat lepší data pro následné zpracování v programu Siemens NX Student Edition:

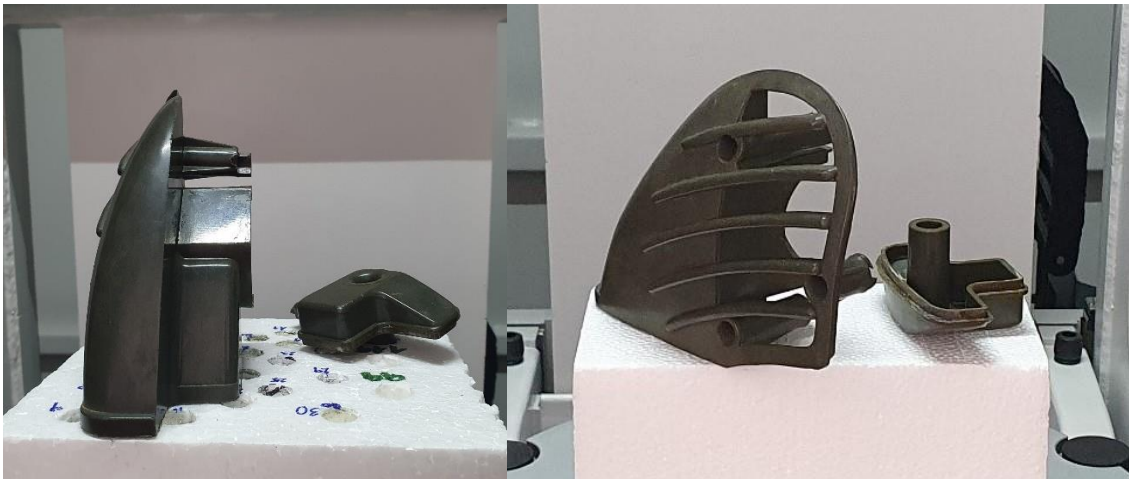
- Výpočetní tomografie.
- Triangulační metoda s využitím proužkové projekce.

Oba měřicí systémy jsou bezdotykové, avšak každý pracuje na zcela jiném principu, což umožní dobré porovnání těchto technologií. Především kvůli časové náročnosti a požadované přesnosti nebylo rozumné využít snímání dotykovou sondou.

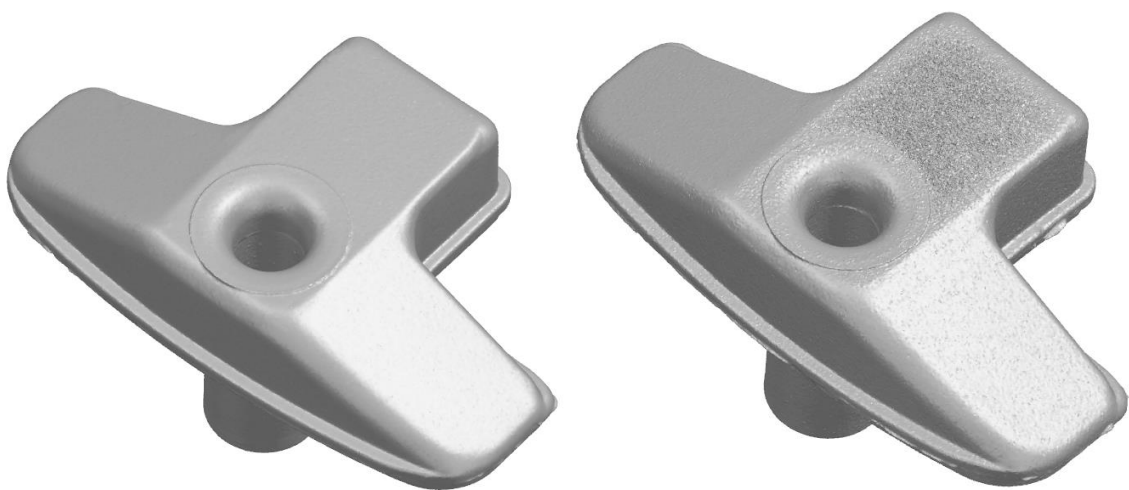
Skenování výpočtovou tomografií

První měření probíhalo na tomografu METRONOM 1500 (Obr. 45), který je umístěn ve fakultních laboratořích.

Skenování probíhalo vždy ve dvojici kryt-miska. Díly je zapotřebí upnout v materiálu s nízkou hustotou, aby jej bylo možné jednoduše prozářit a neovlivňoval výsledky skenování. K uchycení byl použit polystyren. Obě dvojice dílů byly položeny trochu odlišně, viz Obr 45., což umožnilo následné porovnání vhodnosti uložení. Obecně je vhodné, aby žádná plocha nebyla ve vodorovné, ani horizontální poloze, ale byly minimálně lehce skloněny. Hlavní rozdíl je v pozici misky, která byla v jednom případě zapíchnuta do polystyrenu, oproti tomu v druhém případě ležela plochou na polystyrenu. Sken misky, která ležela plochou na polystyrenu, měl právě tuto plochu výrazně horší a byla přítomna výrazná pórovitost povrchu, viz Obr. 46.

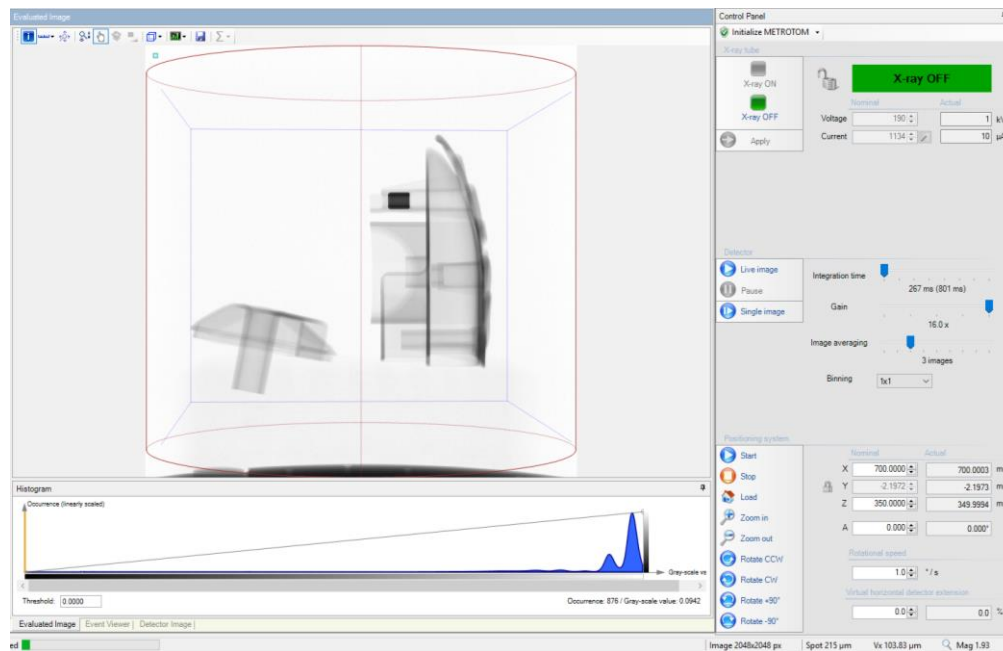


Obrázek 45: Rozdílná uložení v tomografu



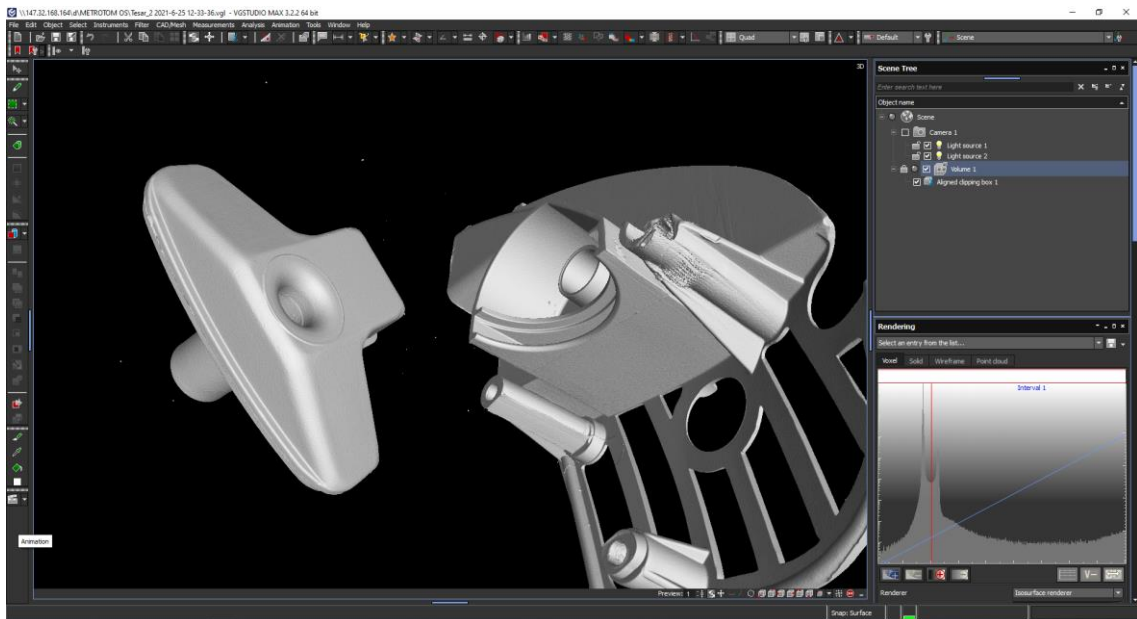
Obrázek 46: Vlevo miska, která byla zapíchnuta v polystyrenu, vpravo miska, která při skenu ležela na horní ploše

Po uložení dílů do pracovního prostoru stroje následuje nastavení parametrů skenování, viz Obr 47. V pravé části pracovního rozhraní jsou vidět všechny nastavitelné parametry. První oddíl se týká hodnot napětí a proudu, které jsou použity pro rentgenování. Prostřední oddíl upravuje parametry detekce obrazu. V posledním oddílu je nastavení pozice pracovního otočného stolu vůči zdroji rentgenového záření a detektoru. Je nutné upravit pozici tak, aby byly obě součásti v detekovaném prostoru pro každý úhel natočení stolu. Na spodní liště je poté patrné rozlišení detektoru, které je 2048x2048 pixelů.



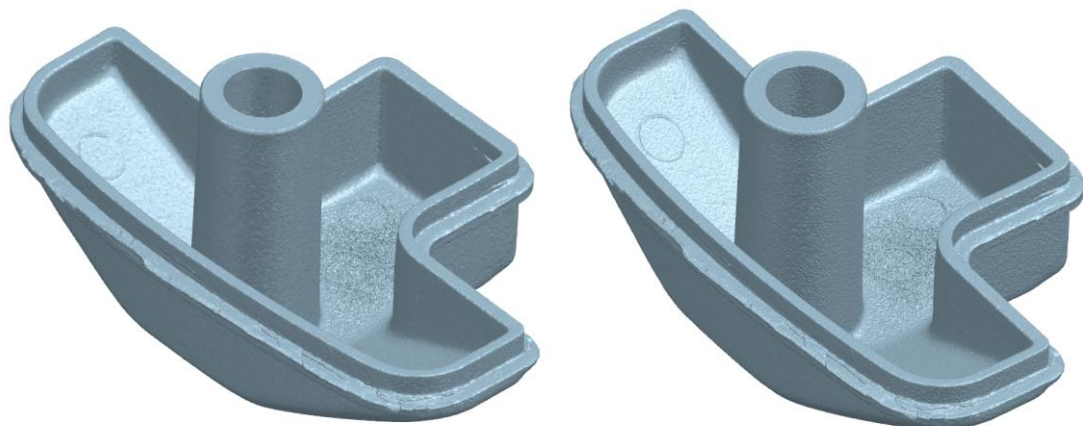
Obrázek 47: Parametry skenování tomografem

Po nastavení všech potřebných údajů proběhlo měření, které samotné trvalo přibližně 2 hodiny. Po měření je nutné nechat software rekonstruovat 3D obraz skenovaných součástí. Další úpravy probíhají v programu VGSTUDIO, kde jsou také odděleny jednotlivé díly do samostatných souborů a provede se export do STL souborů.



Obrázek 48: Náhled do programu VGSTUDIO

Při exportu je možné zvolit výslednou kvalitu 3D modelu v STL souboru. Byl proveden zkušební export v normální kvalitě s použitím zjednodušení a export ve vysoké kvalitě bez zjednodušení. Porovnání lze vidět na Obr. 49. Na pohled není patrná žádná ztráta důležitých dat, a bude tak vhodné využít zjednodušenou variantu exportu. Díky tomuto srovnání a zdůvodnění, že není třeba exportovat součásti v maximální kvalitě, bude zjednodušení použito i na ostatní díly pro zmenšení náročnosti na výpočetní techniku.



Obrázek 49: Vlevo zjednodušená verze, vpravo plná verze STL souboru

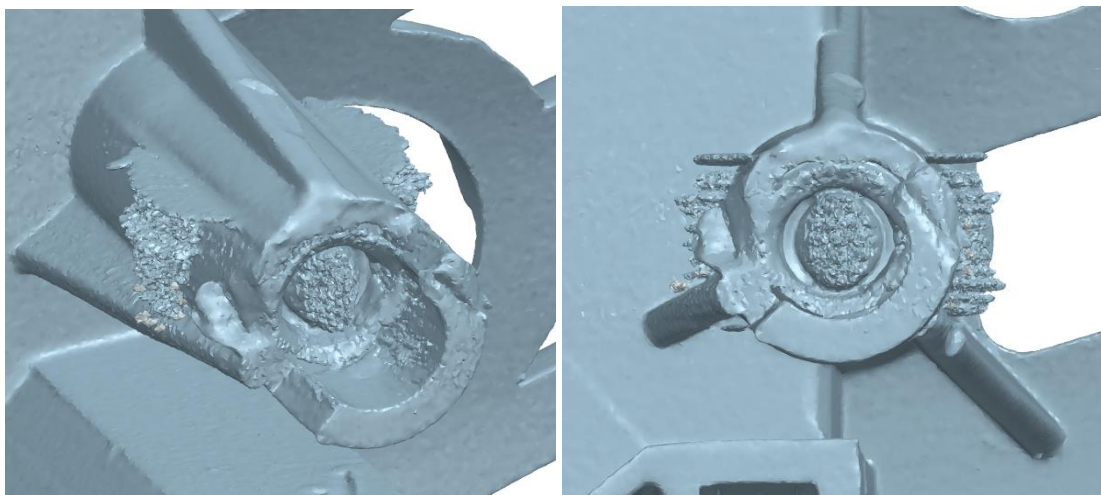
Po tomto srovnání a zdůvodnění, že není třeba exportovat součásti v maximální velikosti, bude zjednodušení použito i na ostatní díly pro zmenšení náročnosti na výpočetní techniku. STL soubor tohoto menšího dílu bez zjednodušení má 230 296 kB a po zjednodušení pouze 43 541 kB. To je více než pětkrát méně. U většího dílu došlo k redukci z 981 471 kB na 130 315 kB, což je víc než 7krát méně.

Během skenování v CT bylo odhaleno, že jedna součást není kompletně plastová, ale obsahuje také jednu kovovou závitovou vložku. Již na 2D rentgenogramu Obr. 47 je v náhledu jasně vidět místo, které je výrazně tmavší než zbytek snímku. Díky nastavení histogramu ve VGSTUDIO je možné nechat zobrazit pouze některé materiály a díky tomu bylo možné zobrazit vložku, viz Obr 50.



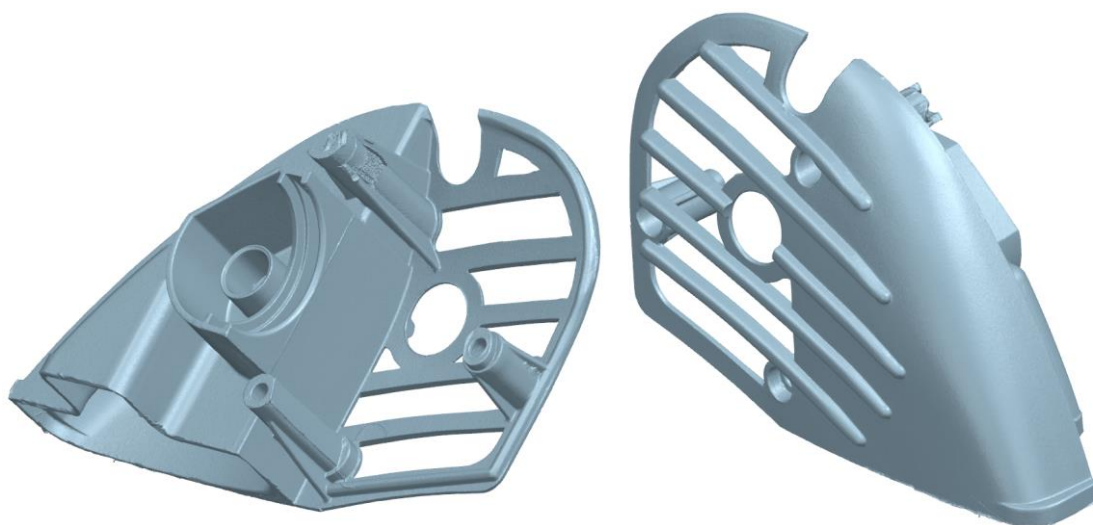
Obrázek 50: Závitová vložka

Bohužel pokud jsou v tomografu skenovány součásti výrazně odlišných hustot, dochází k odrazům rentgenového záření a chybám ve výsledném obrazu. Tyto nedostatky jsou patrné na Obr. 51. Závitová vložka je umístěna v průchozím válci, na skenech je však vlivem těchto chyb válec uzavřený. Dále jsou jasné patrné odrazy i v okolí válce. Existuje možnost pokusit se tyto chyby softwarově opravit aplikací filtrů. Tento proces je však výpočetně, a tím pádem i časově, velice náročný. Proto byly tyto chyby v exportovaném souboru zachovány a bude nutné se s nimi vypořádat při tvorbě parametrizovaného CAD modelu.



Obrázek 51: Dva pohledy na chybu způsobenou kovovou vložkou

Celková doba skenování, úpravy modelů a veškerý další postup až po export jednotlivých dílů do formátu STL v programu VGSTUDIO trval přibližně 3 hodiny. Vzhledem k tomu, že každá polovina sestavy byla rentgenována zvlášť, celkový čas je 6 hodin. Výsledný model misky je vidět na Obr. 49. Výsledný model krytu je na Obr 52. Vzhledem k tomu, že jsou oba kryty téměř symetrické, je na obrázku vidět pouze jeden z krytů karburátoru.



Obrázek 52: Exportovaný model krytu z VGSTUDIO 2 pohledy z různých stran

Skenování proužkovou projekcí

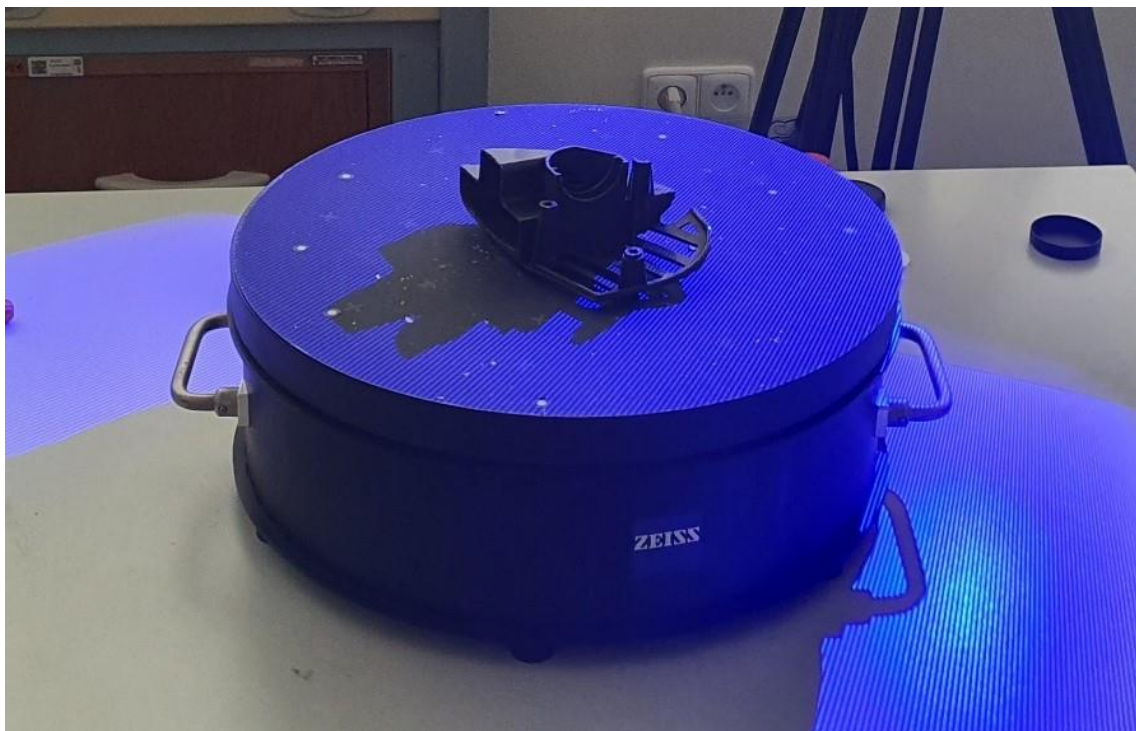
Druhé měření probíhalo na skeneru ZEISS COMET L3D 2, který pracuje na principu proužkové projekce. Detailní parametry stroje byly popsány v kapitole „Bezdotykové snímací systémy na trhu“. Zařízení, včetně využívaného otočného stolu, je vidět na Obr. 29. Na Obr. 53 je vidět detailní pohled přímo na skener. Měření probíhalo v laboratoři fakulty.



Obrázek 53: ZEISS COMET L3D 2

Na skeneru byl umístěn a kalibrován objektiv 500, tedy objektiv s největším možným obsahem pracovního prostoru, který se ke stroji dodává. V odpovídající velikosti byla také optika projektoru.

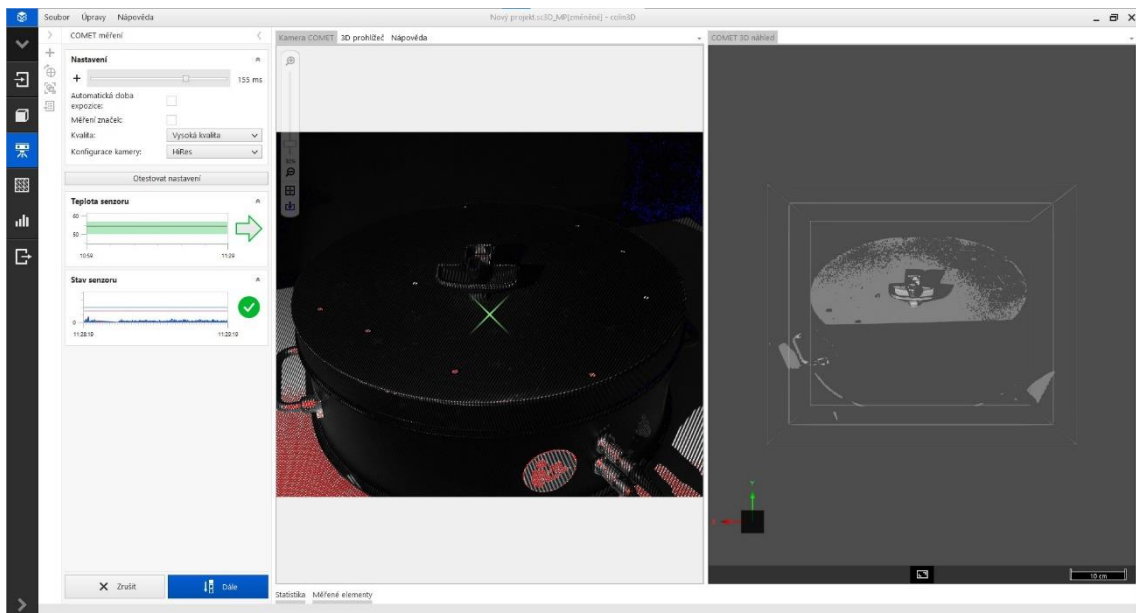
Oproti měření na výpočtové tomografii zde byl měřen každý díl samostatně. Umístění jednoho z krytů je patrné na Obr. 54. Na rozdíl od měření na CT zde bylo zapotřebí měření jednoho dílu opakovat v různých polohách, aby bylo možné změřit co největší plochu součásti. V základní zvolené poloze bylo provedeno 12 měření s automatickým otáčením stolu po 30°.



Obrázek 54: Kryt na pracovní ploše skeneru

S dílem umístěným je možné začít skenování. Pro měření ve spolupráci se zařízením COMET slouží program colin3D, také od firmy ZEISS, který provádí postupem měření od založení projektu až po skládání jednotlivých snímků do výsledného modelu a jeho exportu pro další zpracování ve formátu STL.

Na Obr. 55 je vidět pracovní prostředí programu. Uprostřed se nachází pohled kamery, v levé části je nastavení parametrů, kde je možnost volby kvality, a především nastavení doby expozice. Je možné nechat kameru volit expozici automaticky, nebo expozici upravit ručně. V okně s pohledem kamery jsou patrné červené části obrazu, což znamená, že pro daná místa je expozice moc vysoká a nebudou tak zachycena. V pravém okně je pak vidět, jaké povrchy je kamera s momentálním nastavením expozice schopna sejmout.



Obrázek 55: Nastavení expozice měření

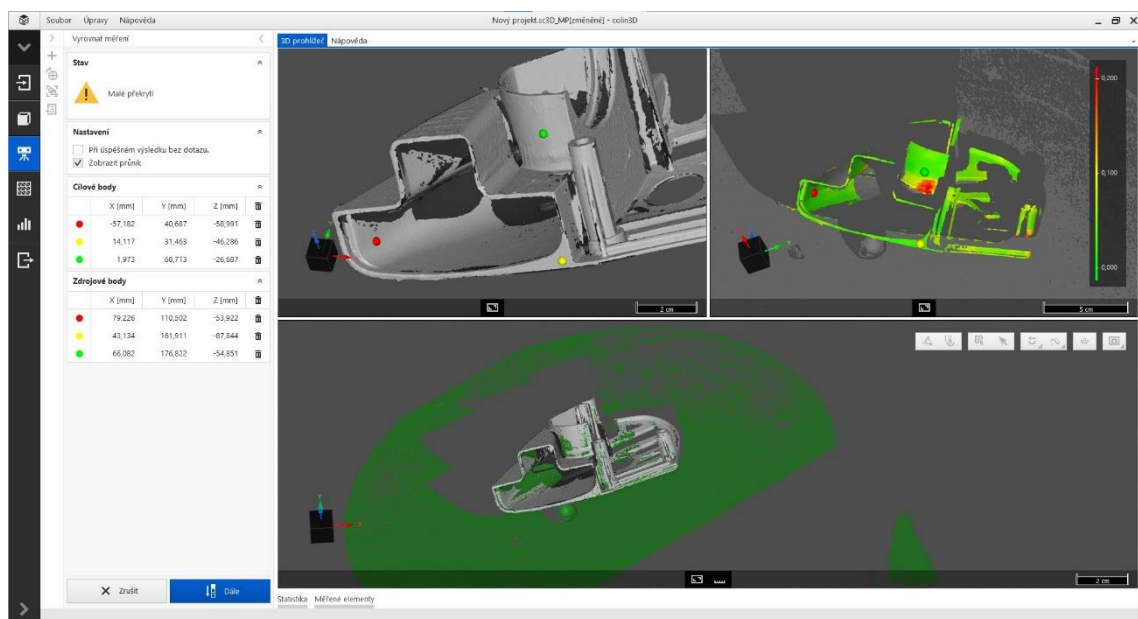
V levé části se nachází také 2 grafy, které se aktualizují v reálném čase. První graf je teplota snímače, který zobrazuje zelené rozhraní, ve kterém by se měla teplota držet, aby bylo možné zaručit správnost měření při dané kalibraci. Zelenou šipkou je udáván trend vývoje teploty (zelená barva značí, že teplota je v pořádku, v opačném případě by se barva změnila na červenou).

Druhý graf zobrazuje vibrace, které skener zaznamenává. Vibrace, které by byly přítomné při měření vnášejí chybu a díky tomuto grafu je možné je zaznamenat a měření opakovat.

Po nastavení expozice se spustí samotné měření. Pokud je nastavena sekvence měření s automatickým pootáčením stolu, software ve spolupráci se skenerem ji automaticky provede. Jednotlivé snímky obsahují také povrch pracovního stolu. Při prvním snímku sekvence je nutné

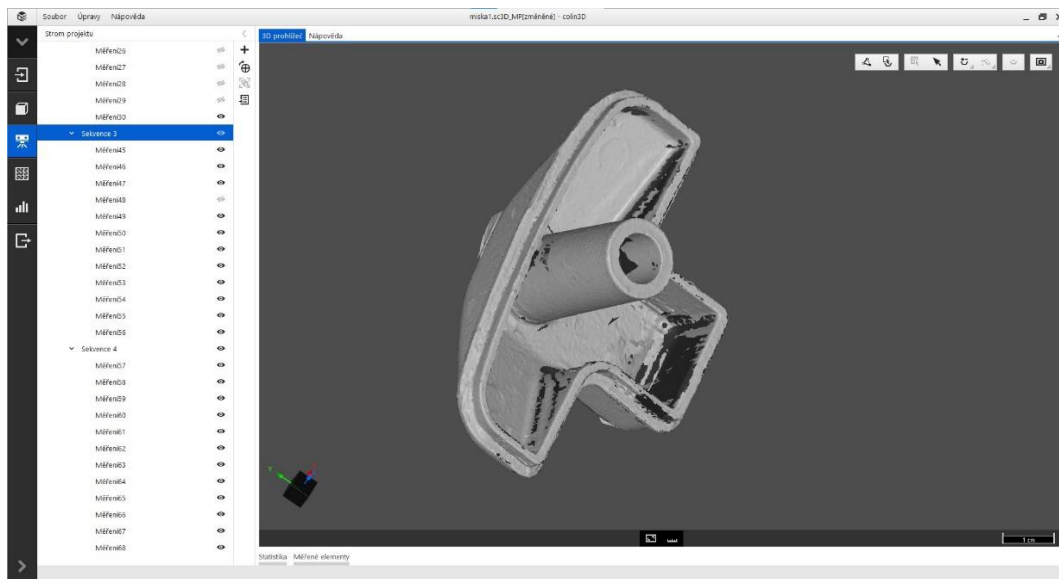
plochu určit výběrem několika bodů a program ji poté automaticky ze všech měření vyřízne, což velice usnadňuje následné zpracování.

Vyrovnání jednotlivých měření zvládá software většinou automaticky. Metoda vyrovnání je best fit. V případech, kdy program spojení nezvládne automaticky, je nutné vyrovnat jednotlivá měření ručně, ruční vyrovnání je vidět na Obr. 56. Provádí se výběrem bodů v přibližně stejných místech na obou měření (na Obr. 56 jsou jednotlivá měření v oknech nahoře). Ve spodním okně je pak vidět výsledek vyrovnání. Po vyrovnání opět dojde k automatickému ořezu pracovní plochy rotačního stolu.



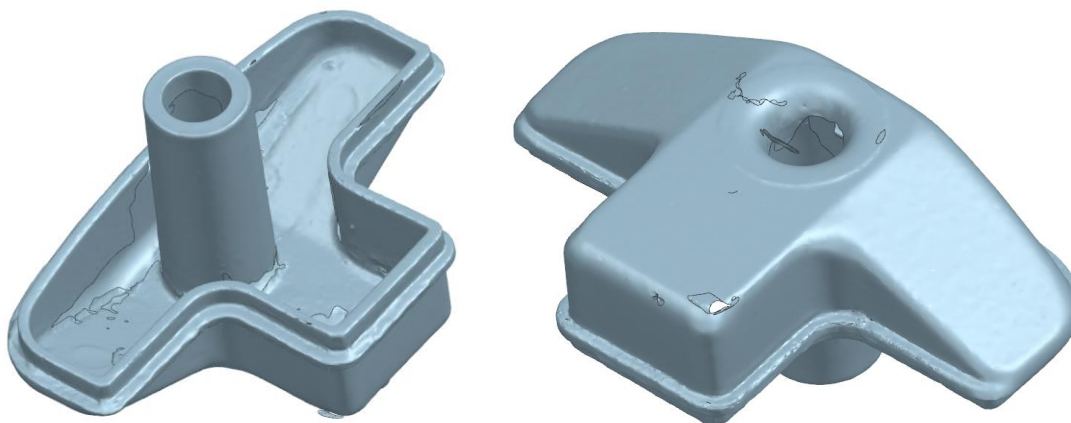
Obrázek 56: Pasování jednotlivých měření

Aby bylo možné zaznamenat každou plochu dílu, je potřeba provést mnoho měření. Většina součástí byla měřena minimálně třemi sekvencemi po 12 měřeních v různých polohách. Pro dosažení optimální polohy bylo často zapotřebí využívat modelíny pro upevnění dílu na pracovní plochu. Na Obr. 57 je vidět obraz získaný čtyřmi měřicími sekvencemi. Jsou patrné velké plochy, které nejsou zaznamenány. Pro vylepšení celistvosti zaznamenaných dat byla prováděna již pouze jednotlivá měření, bez otáčení stolu.

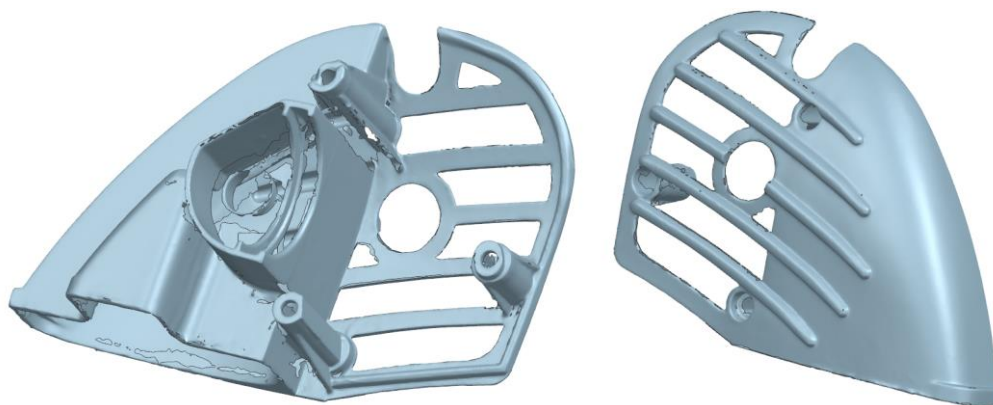


Obrázek 57: Výsledný obraz po 4 sekvencích měření

Ve chvíli, kdy byly změřeny veškeré dostupné plochy, byla vytvořena trojúhelníková síť a provedl se export dat do STL souboru. Výsledný STL model misky je vidět na Obr. 58. Model krytu je na Obr. 59. Měření všech 4 dílů až po export STL zabralo dohromady 4 hodiny.



Obrázek 58: Exportovaný STL soubor misky, pohled z různých stran

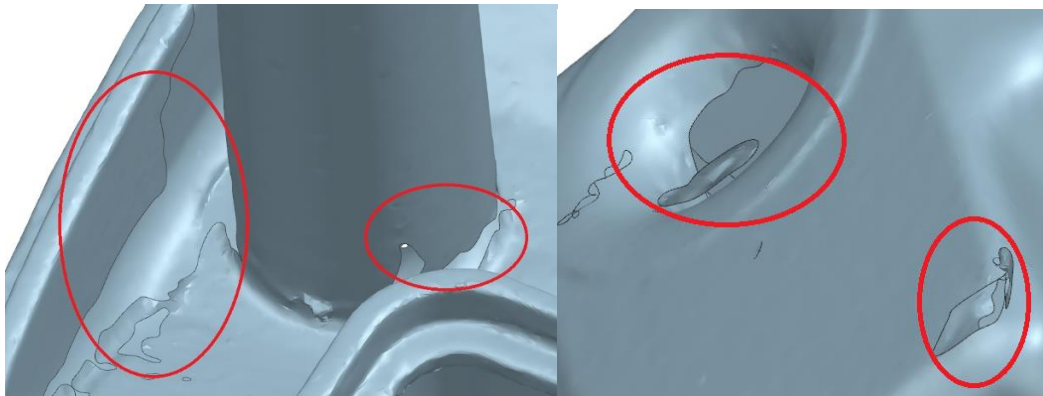


Obrázek 59: Exportovaný STL soubor krytu, pohled z různých stran

I přes změny poloh a práci s nastavením expozice zůstávala na předmětech místa, která nebyla zaznamenána. Na Obr. 60 jsou znázorněny nedostatky modelu.

Chyby jsou způsobeny jednak z principu funkce triangulačních metod. Jsou místa, na která se projektované proužky z projektoru nemohou dostat tak, aby se zároveň odrazily do kamery. Díky tomu vznikají slepá místa, kde chybí data.

Druhým důvodem chyb je barva a lesk povrchu součástí. Přestože je barva tmavá a nezdá se, že by součásti měly vysoký lesk, měl skener se zachycením povrchu dílů problémy. Hlavně v rozích docházelo k odleskům, a ani velmi nízká hodnota expozice problém nevyřešila. Ideální by bylo použít speciální sprej, kterým se na povrch dílů nanese povlak, který je pro skenery dobře viditelný. Tento však v laboratoři nebyl k dispozici.



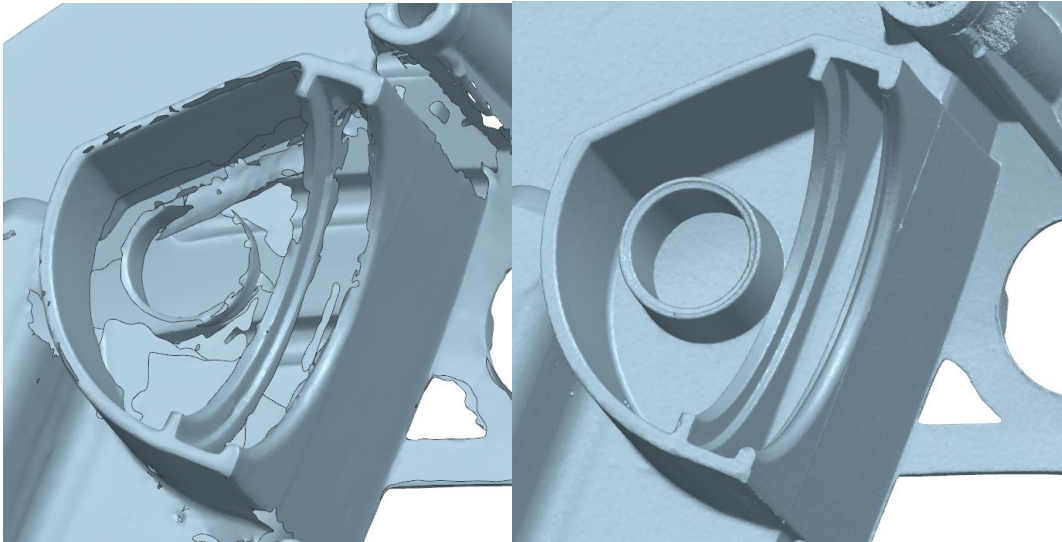
Obrázek 60: Chybějící povrchy modelu

Porovnání modelů

K porovnání modelů se dobře hodí střední část krytu karburátoru, která je vidět na Obr. 61. Model vytvořený na základě dat ze skeneru COMET má spoustu chybějících ploch, protože složitost dílu v této části je moc veliká. COMET se pro snímání takové části vyloženě nehodí. Naproti tomu model na základě dat z CT je celistvý.

Povrch součásti je uhlazenější v případě STL ze skeneru COMET, ale to nehraje žádnou roli, vzhledem k tomu, že STL modely budou předělány do parametrizovaného CAD objemového modelu.

COMET má výhodu v části kolem kovové závitové vložky v pravé horní části obrázků, kde pro něj není žádný problém dobře zaznamenat povrch bez chyb. Na druhou stranu nebýt chyb při zobrazení u výpočetní tomografie ani bychom nezjistili, že uvnitř dílu je kovová závitová vložka.



Obrázek 61: Porovnání kritické části krytu. Vlevo model na základě měření COMET, vpravo na základě měření CT

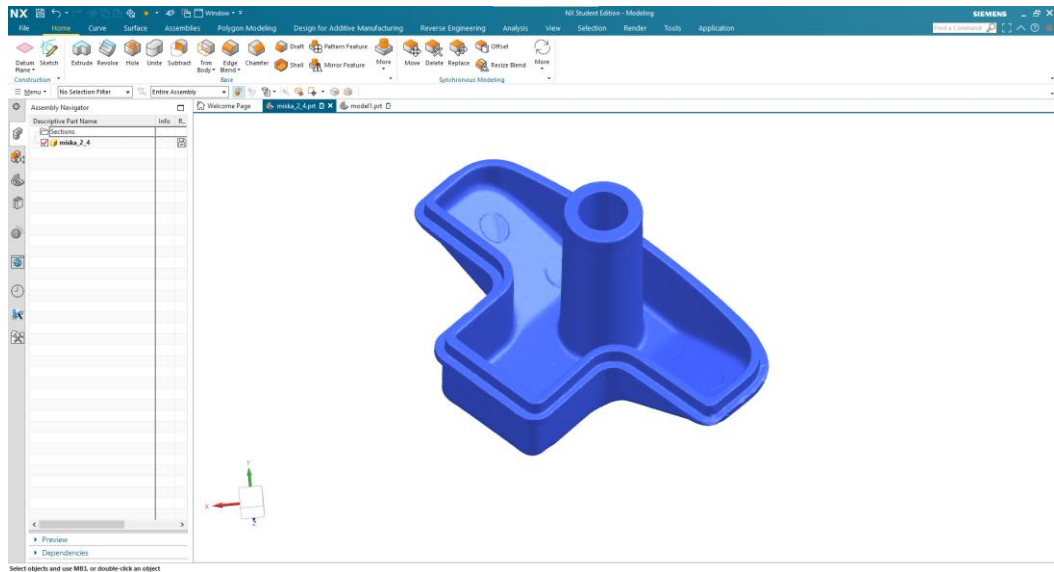
Čas měření byl o trochu rychlejší v případě skeneru COMET (4 hodiny) oproti 6 hodinám měření na CT. Model z výpočetní tomografie je ovšem celkově lepší a bez velkých vad. Pro rekonstrukci na objemové CAD těleso byly tedy vybrány STL modely misky a krytu pořízené výpočetní tomografií.

6.2. Tvorba parametrizovaného modelu

Pro vylepšení tvaru, odstranění chyb vzniklých při měření a pro zlepšení kvality povrchu bude naskenovaný model předělán na parametrický. STL model, který vznikl z výpočetní tomografie, by bylo možné okamžitě vytisknout na 3D tiskárně, ovšem obsahoval by zmíněné chyby. Tvar i povrch by byl vzhledem k přesnosti aditivním výroby metodou FDM dostatečně kvalitní, aby se mohlo rovnou tisknout a pokud by byl požadavek na vysokou rychlost vytvoření dílu, bylo možné jej vyrobit již v této fázi.

Co se týká výstupu ze skenování metodou proužkové projekce, zde by bylo, vzhledem k množství chybějících ploch, nutné předělat jej na CAD model, aby bylo možné součást vytisknout. Jak již bylo zmíněno, pro CAD model se však bude vycházet z výstupu měření na CT a bude vytvořena jedna miska a jeden kryt. Druhý kryt bude pouze lehce upraven v původním STL formátu.

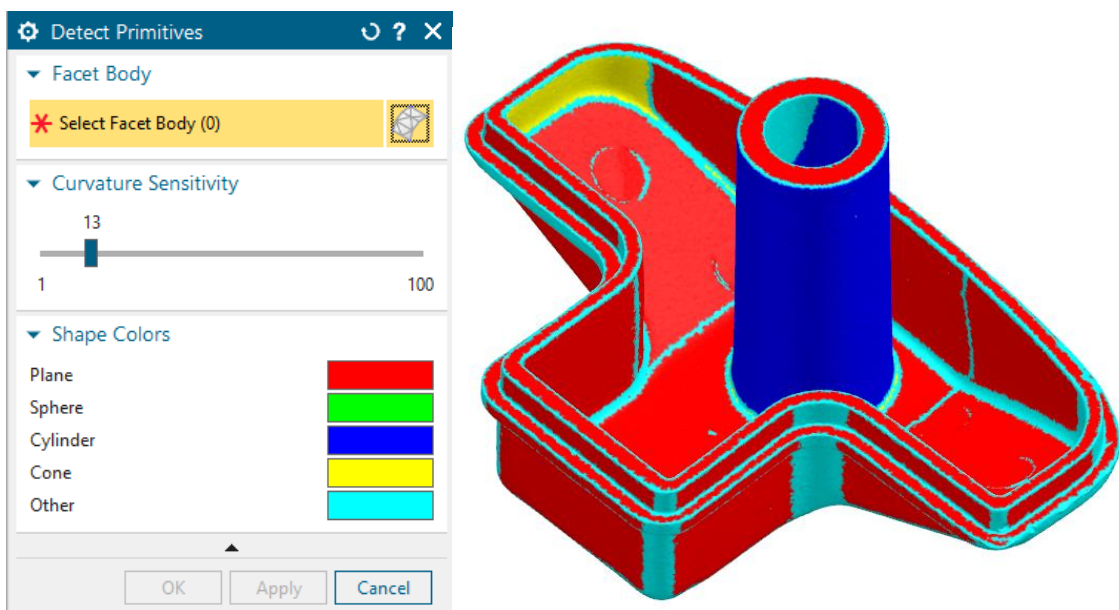
Prvním krokem je nahrání STL souboru z výpočetní tomografie do programu Siemens NX, ve kterém bude vytvořen CAD model. Jak bylo zmíněno výše, pracovat se bude se zjednodušeným souborem pro rychlejší práci.



Obrázek 62: Prostředí programu Siemens NX s importovaným modelem

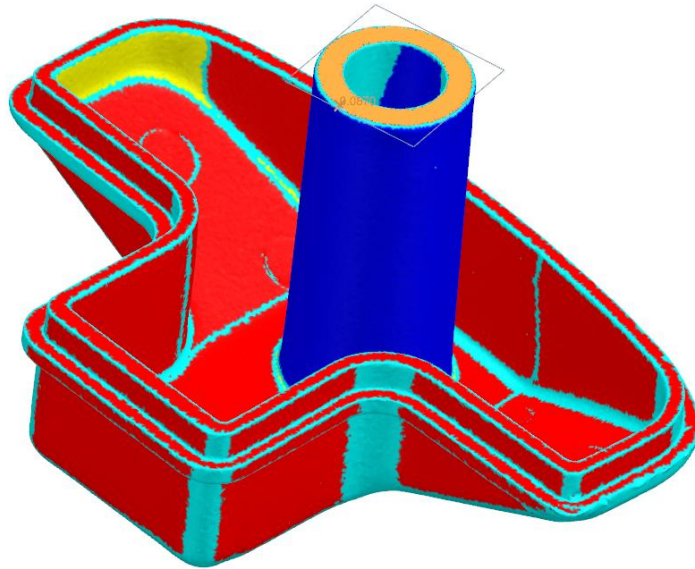
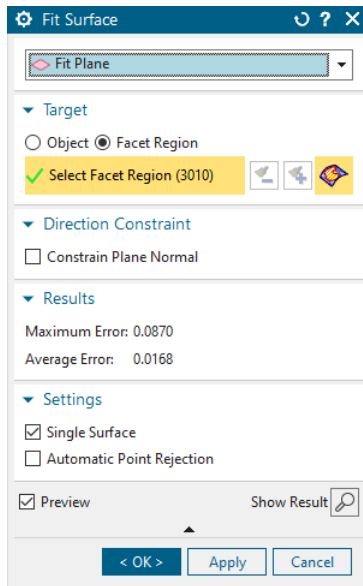
Po importu naskenovaného dílu byla využita funkce programu „Detect Primitives“, která barevně rozdělí všechny plochy podle jejich základního tvaru, viz Obr. 63. Na základě nastavení citlivosti tedy vznikne rozdělení na roviny, koule, válce, kužely a ostatní. Je vidět, že automatické vybarvení není úplně 100% přesné např.: žlutě vybarvená plocha určitě není kuželová, ale pro základní rozdělení to stačí.

Konkrétní barva totiž není důležitá, jde hlavně o rozdělení ploch, jelikož výběrem barevného regionu se určují body, které budou použity pro výpočet budoucího tvaru. Navíc barvy je možné následně upravit štětcem. Funkce vybarvení plochy se využívá často a díky ní je možno upravit rozdělení bodů povrchu, podle kterých se budou prvky vypočítávat.



Obrázek 63: Barevné rozdělení ploch dle tvaru

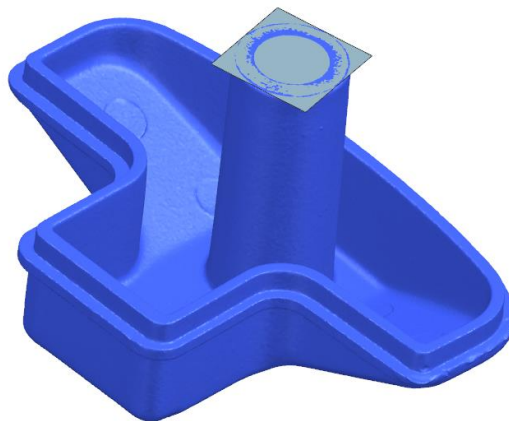
Poté co je hotové barevné rozdělení, je možné začít vytvářením povrchů. Ve funkci „Fit Surface“ je nutné zvolit, jaký tvar bude mít nový povrch, zde byla vybrána rovina. Následně se zvolí jedna z barevných oblastí, čímž se vyberou body (na Obr. 64 oranžové body), kterými bude proložena rovina. Je možné vybrat také víc oblastí, v případě rovny na vrcholu dutého kuželu je však jedna oblast naprosto dostačující a výstižná.



Obrázek 64: Vytvoření roviny v programu Siemens NX

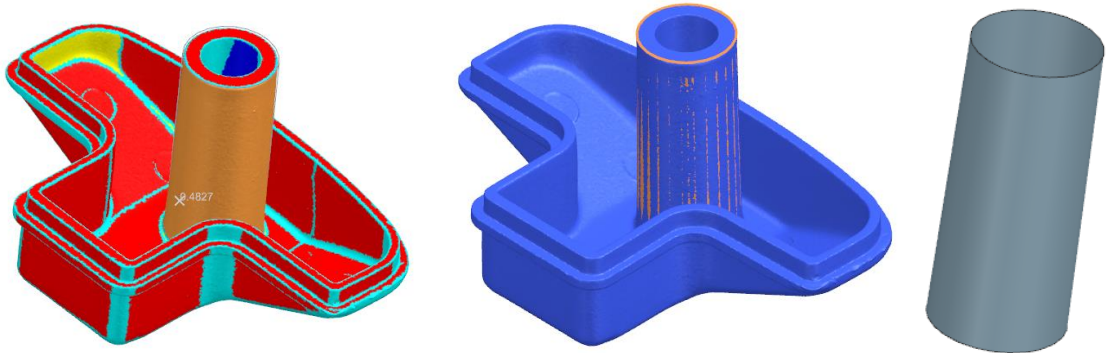
V dialogovém okně je vidět také výsledek přiřazení roviny. Je zde uvedena hodnota maximální chyby (maximální vzdálenosti jednoho bodu od vytvořené roviny) a hodnota průměrné chyby. Velikost průměrné chyby pod 0,02 mm je velmi dobrá, vzhledem k reálně dosažitelné přesnosti originálního dílu i příspěvku k variabilitě měření ze strany výpočetní tomografie.

Po přepnutí z barevného zobrazení do klasického stínovaného modelu je na Obr. 65 vidět výsledný povrch.



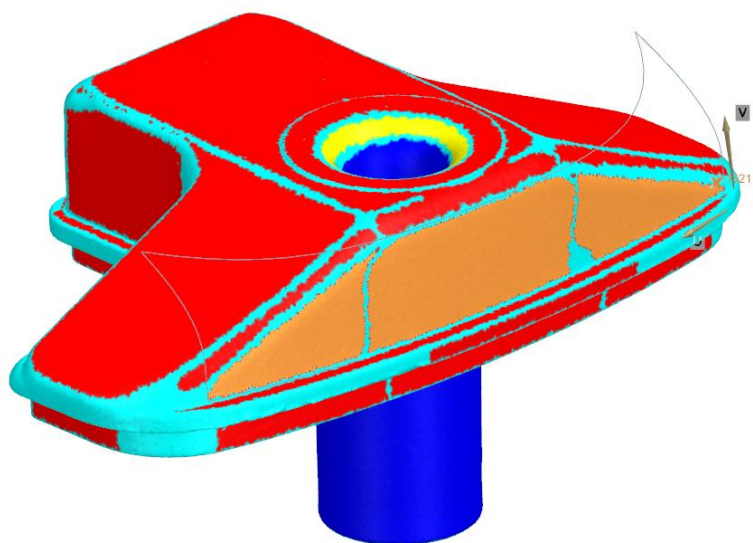
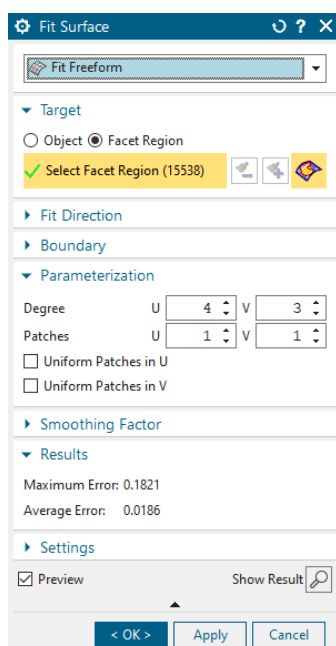
Obrázek 65: Nově vytvořená rovina

Obdobný postup je aplikován také na ostatní roviny, které budou k tvorbě modelu zapotřebí. Stejně tak se vytváří válcové a kuželové plochy. Po volbě oblasti dojde k přiřazení plochy zvoleným bodům. Na Obr. 66. je vidět kuželová plocha. U válcových ploch se kromě chyby přiřazení ukazuje také průměr válce. V případě kuželových ploch je vidět kromě průměru také úhel sklonu kužele.

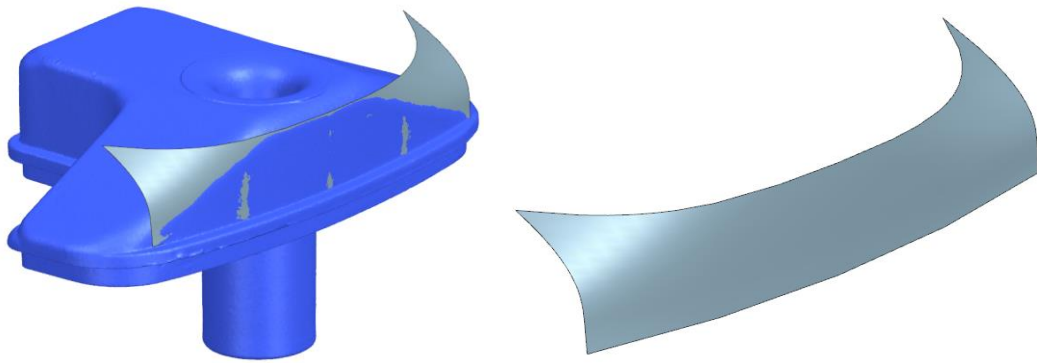


Obrázek 66: Vlevo region pro tvorbu povrchu, uprostřed povrch se vstupním modelem, vpravo samotný kužel

Tímto postupem jsou vytvořeny všechny základní plochy. Pro složitější tvarové plochy je za potřebí přiřazovat volné plochy, anglicky „Freeform“. Zde je zapotřebí nastavit parametry rovnice plochy. Důležité je nastavení stupňů rovnice ve směru vektorů U a V. Nejjednodušší je řídit se výslednými chybami a zkusit správné nastavení hodnot. Při dosažení optimálních parametrů vchází poměrně přesné přiřazení, viz Obr. 67 a 68.



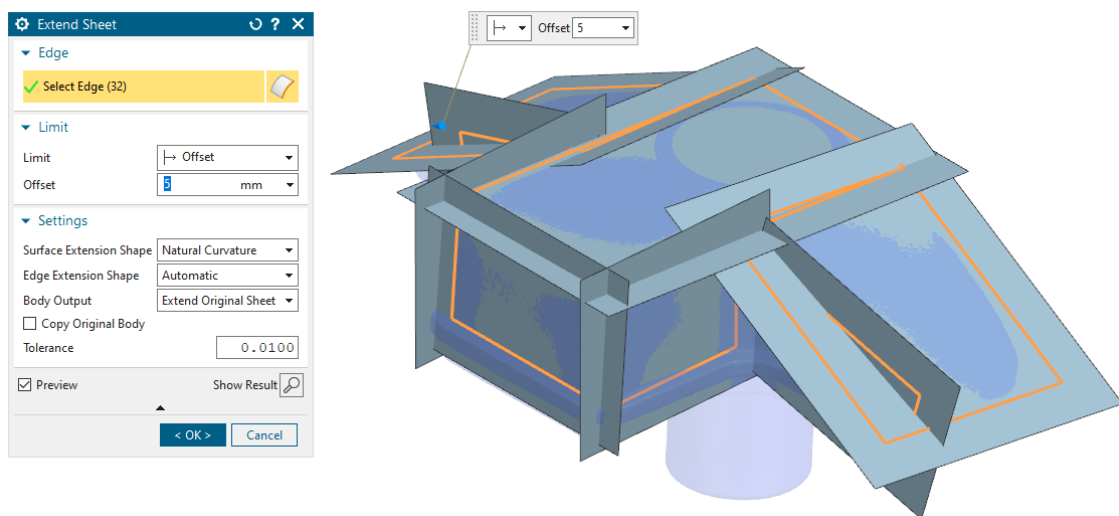
Obrázek 67: Tvorba "Freeform" plochy



Obrázek 68: Výsledná plocha v porovnání s předlohou a samotná

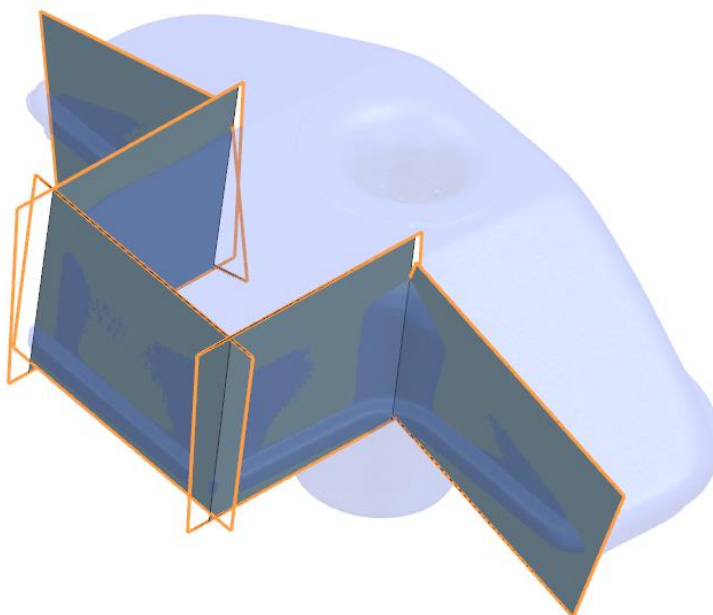
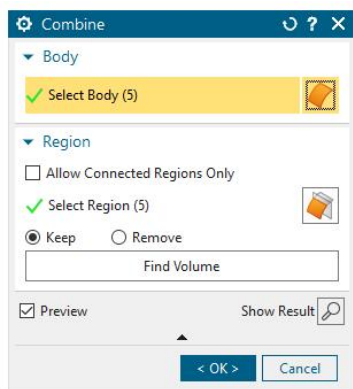
Když jsou vytvořené plochy, může začít jejich skládání do výsledného objektu. Pokračování tedy je prodloužení a spojení vytvořených ploch do většího celku.

Funkcí „Extend sheet“ se prodlouží vybrané roviny tak, aby se překrývaly, jak je vidět na Obr. 69. Vybírají se hrany rovin, které mají být prodlouženy a nastaví se dostatečná délka prodloužení. Druhou možností pro zvětšení ploch může být funkce „Enlarge“, která slouží pro rozšíření jedné roviny. Je vhodnější, zejména pokud je zapotřebí zvětšit plochu, která není rovina např.: freeform, nebo válcová plocha, která není uzavřena do kompletního válce.

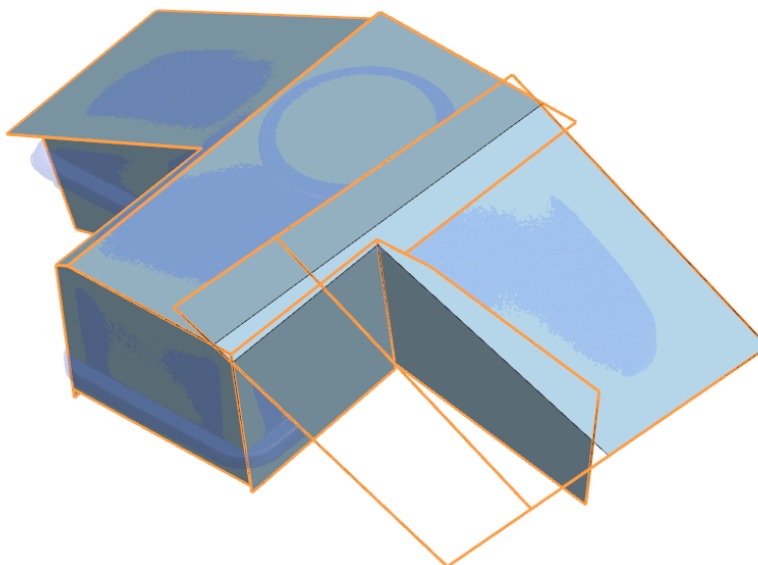
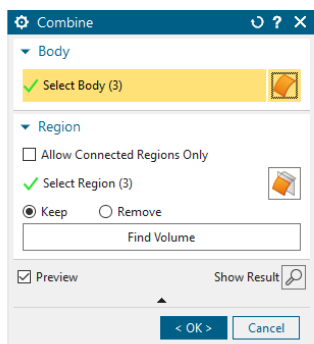


Obrázek 69: Prodloužení rovin

Prodloužené roviny je poté nutné spojit do jednoho celku. Je vhodné spojovat plochy postupně do menších celků a k těm následně přidávat další plochy. Na Obr. 70 je vidět funkce „Combine“, která slouží pro spojení ploch. Plochy se spojí a také navzájem oříznou, čímž začne vznikat základní tvar pro další práci. Jakmile dojde spojením rovin k uzavření objemu, vytvoří se automaticky objemové těleso.

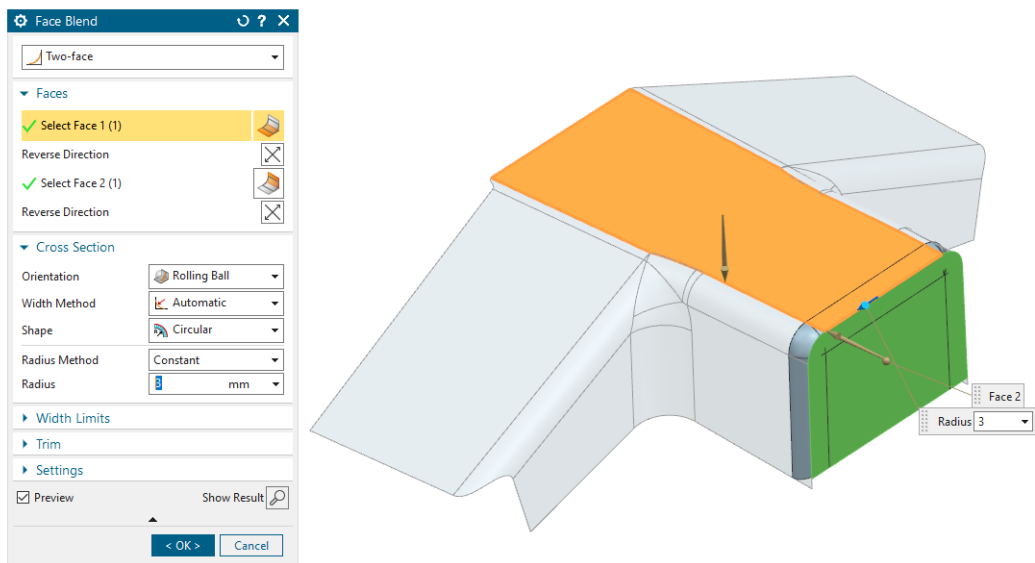


Obrázek 70: Spojení ploch

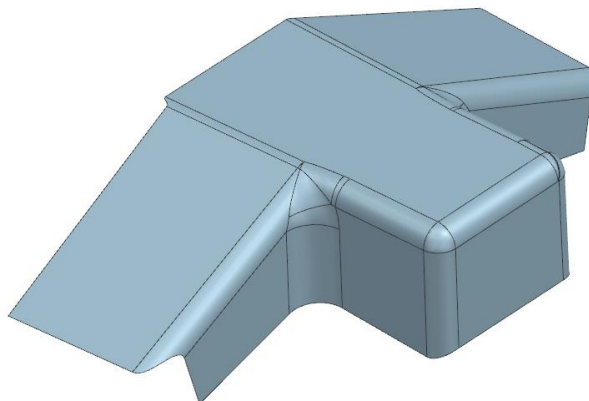


Obrázek 71: Přidání dalších ploch

Posledním krokem pro dosažení optimálního tvaru je zaoblení hran tak, aby nový tvar co nejpřesněji odpovídal původnímu modelu. Pro zaoblení ve stavu, kdy se stále jedná pouze o povrchy, slouží funkce „Face Blend“. Vyberou se 2 plochy, kde má dojít k zaoblení, nastaví se rádius zaoblení a vyberou další parametry, které jsou vidět na Obr. 72. Po zaoblení všech nutných hran může průběžný výsledek vypadat jako na Obr. 73.



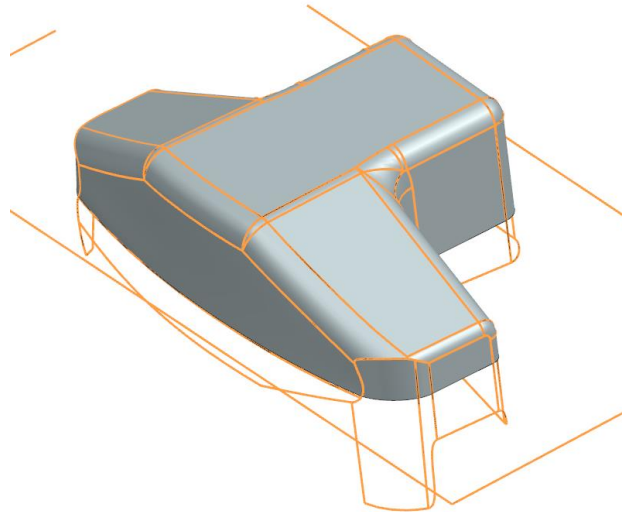
Obrázek 72: Zaoblení přechodů ploch



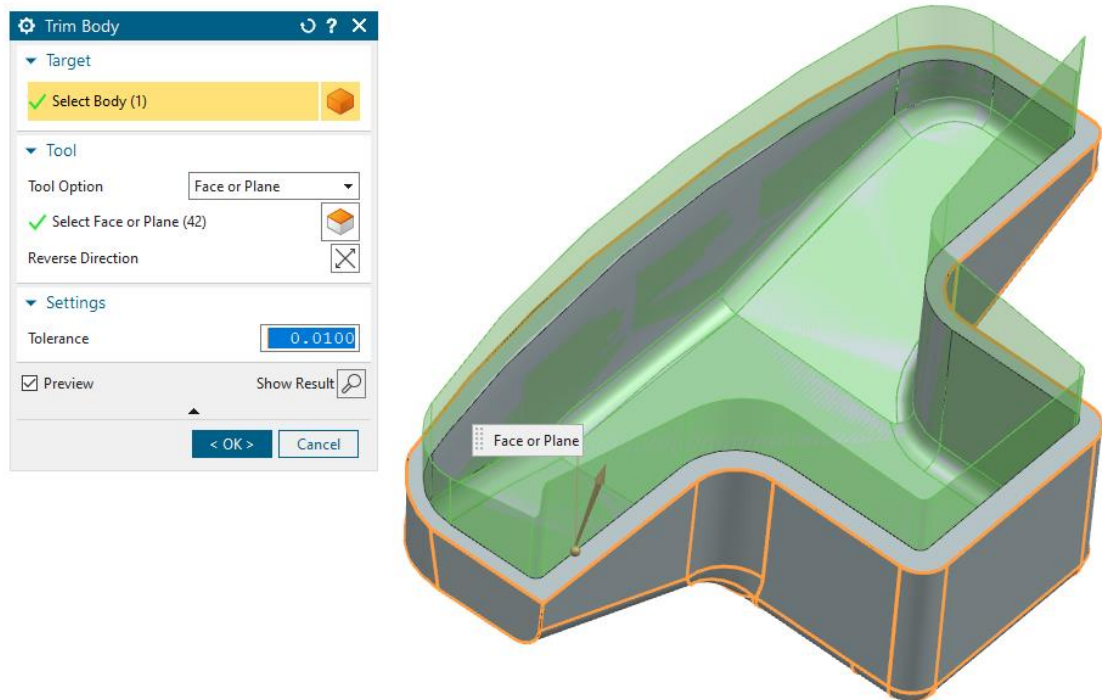
Obrázek 73: Průběžný výsledek po zaoblení hran

Postup se opakuje, dokud nedojde k uzavření objemu a vytvoření tělesa, viz Obr. 74. Dále je třeba pokračovat tvorbou dalších částí a dalších objemů, a tím se co nejvíce přiblížit k požadovanému tvaru naskenovaného modelu.

Častým způsobem, jak přistupovat k modelování, je vytvořit základní tvar jako objem a následně materiál dalšími plochami odebírat. Tento postup je vidět na Obr. 75, kde je zase trochu blíže k finálnímu tvaru součásti.



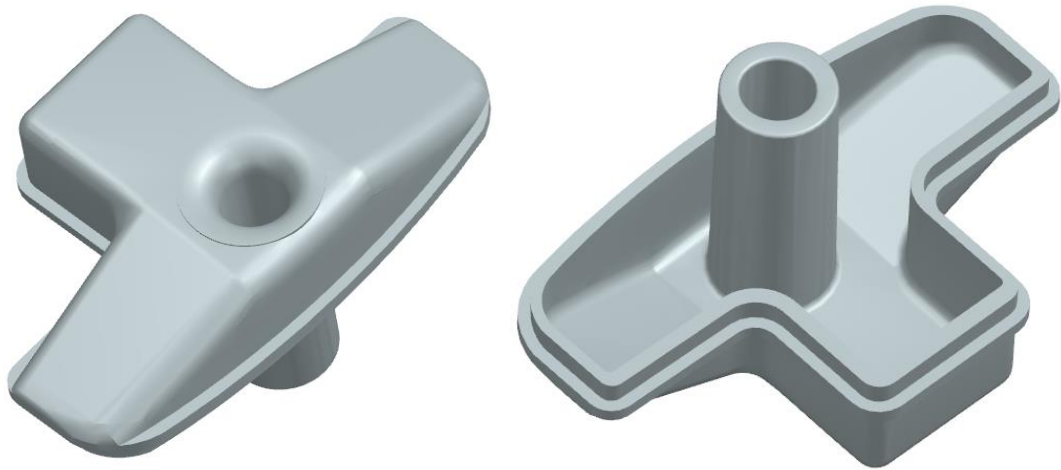
Obrázek 74: Vytvořené objemové těleso



Obrázek 75: Odebírání materiálu

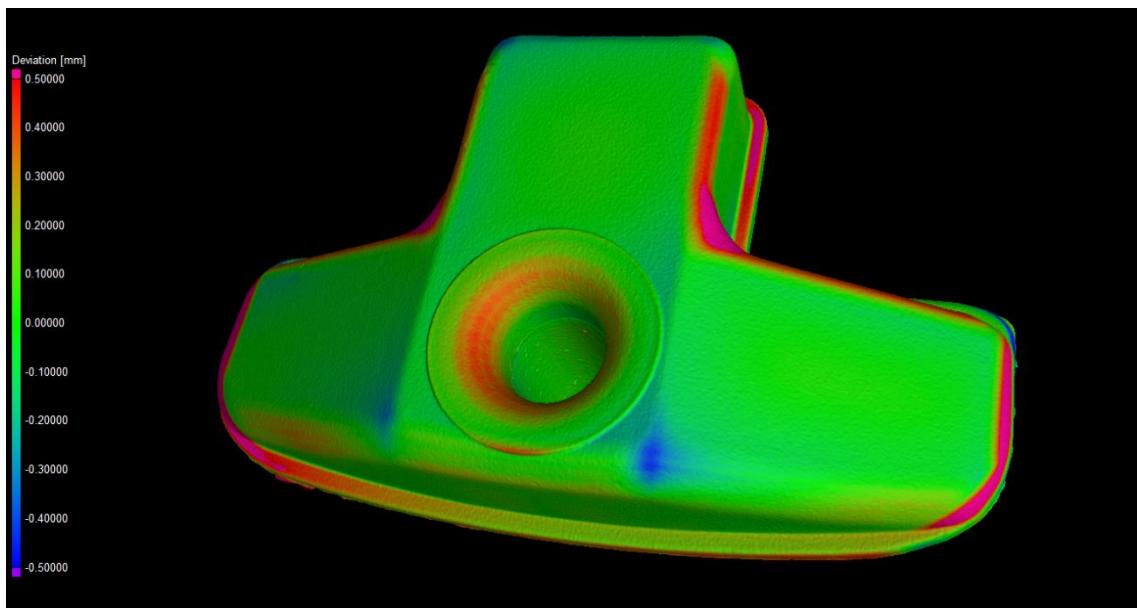
Kombinací těchto metod a také klasickými metodami, jako je například tvoření skic a za jejich pomoci následné vytahování objemu, nebo naopak ořezávání tvaru, je dosaženo optimálního tvaru, který se co nejvíc přibližuje původnímu vzoru.

Výsledný model je pak vidět na Obr. 76.

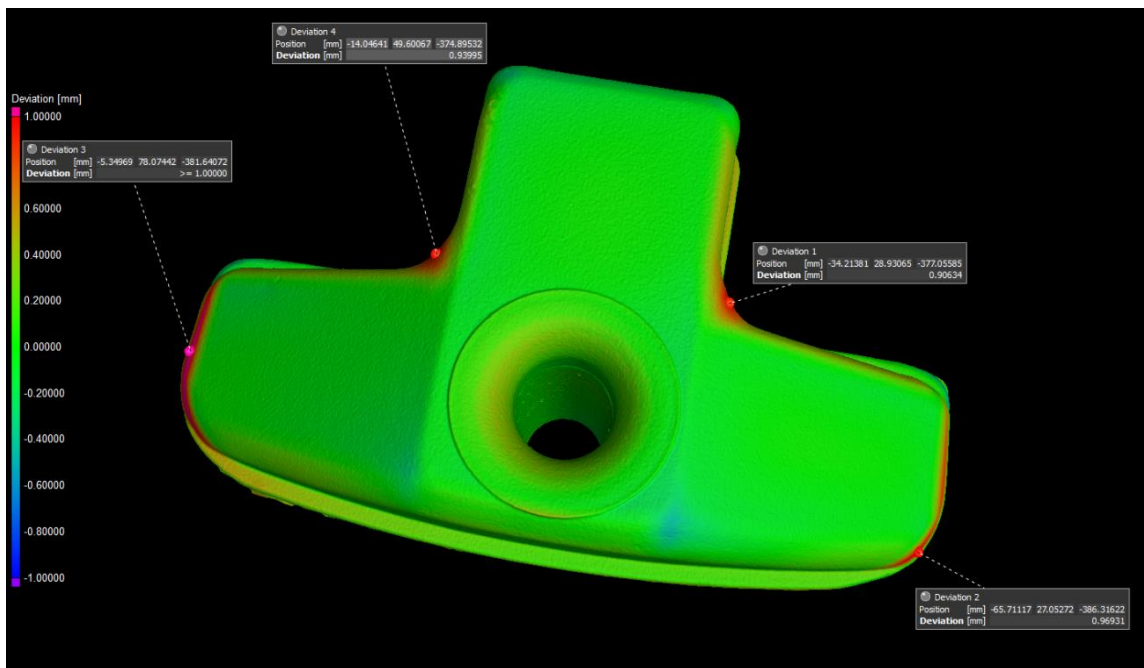


Obrázek 76: Výsledný model misky, pohled z více stran

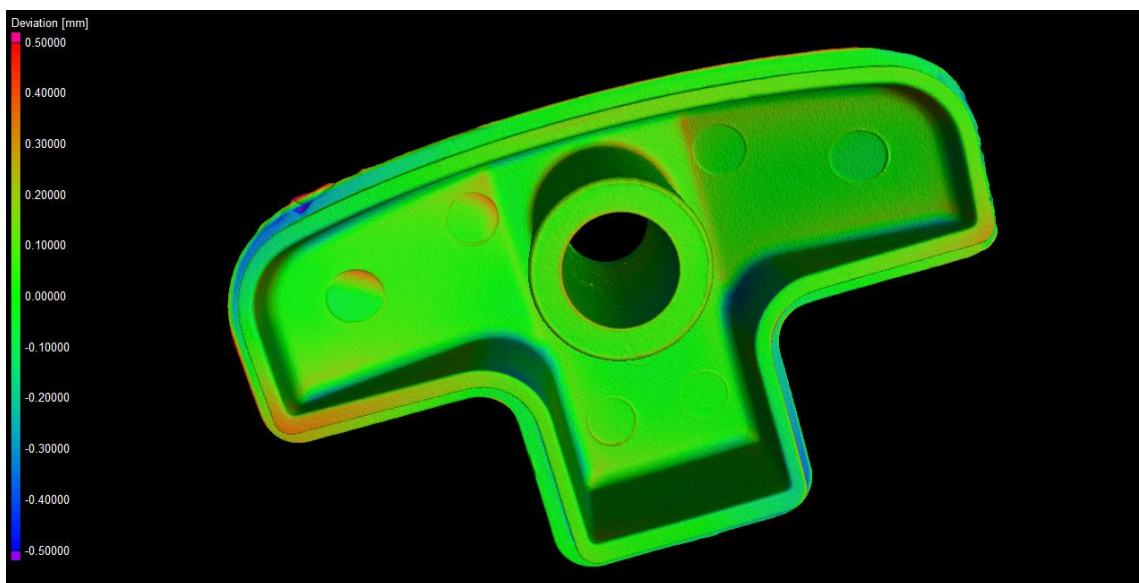
Bylo provedeno také porovnání vytvořeného modelu s naměřenými daty, které je vidět na Obr. 77. Jsou vidět určitá místa, na kterých byla odchylka přes 0,5 mm, proto proběhlo ještě jedno porovnání s větší maximální odchylkou, viz Obr. 78. Místa s velkou odchylkou byla v rámci možností opravena.



Obrázek 77: Porovnání modelu a naměřených dat



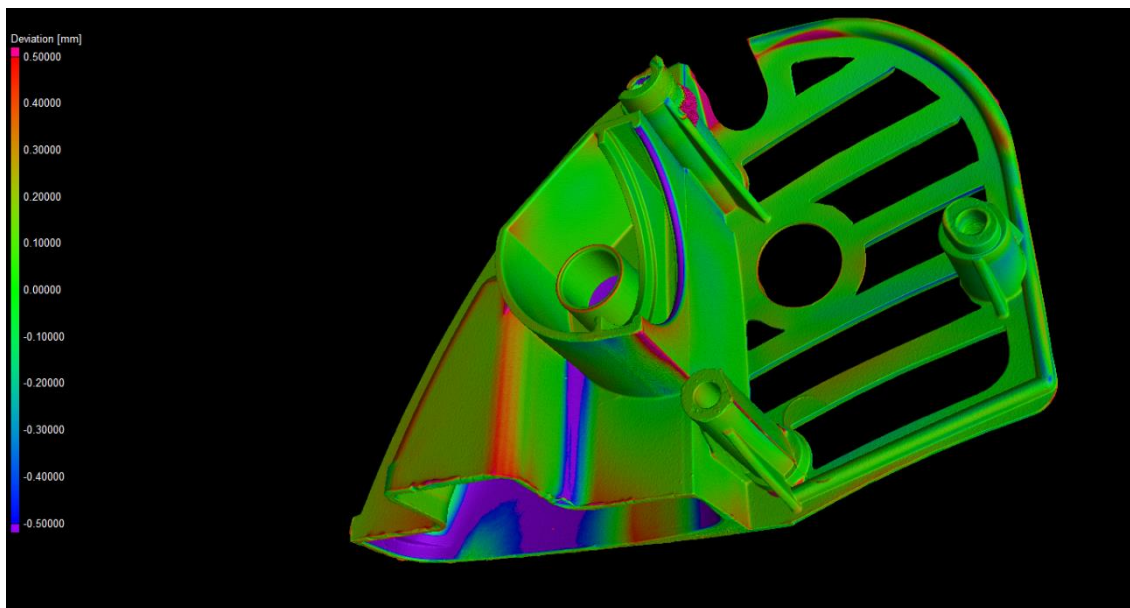
Obrázek 78: Porovnání vylepšeného modelu



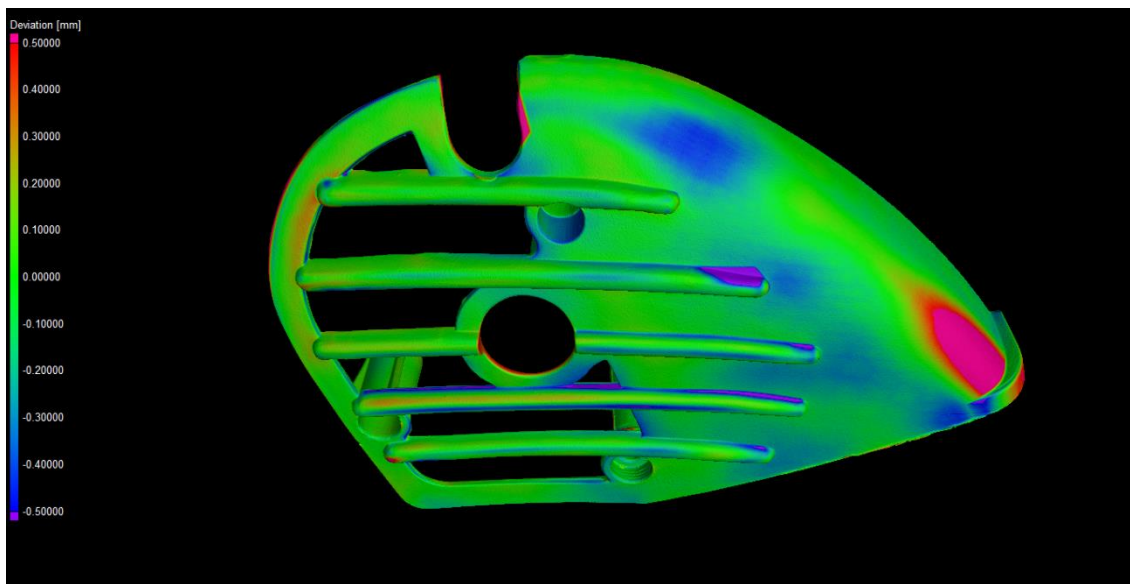
Obrázek 79: Pohled zespoda na porovnání

Je patrné, že spodní část neobsahuje téměř žádné větší chyby. Na rozdíl od ní v horním pohledu na součást se objevují 4 místa, kde se odchylka blíží k 1 mm. Vzhledem k tomu, že na daných místech nejsou žádná funkční části ani spojení, neměl by menší rozdíl v tvaru být velikou překážkou.

Stejný postup byl aplikován také na díl, který byl nazván jako kryt. V jeho případě byla tvorba modelu výrazně složitější a delší, nicméně postup a používané metody byly identické. Výsledky byly opět porovnány s naměřenými daty a jsou vidět na obrázcích 80 a 81.



Obrázek 80: Porovnání krytu s naměřenými daty



Obrázek 81: Porovnání krytu s naměřenými daty



Obrázek 82: Nejvýraznější chyba

Při porovnání dat vyšla najevo výrazná chyba v horní oblasti, jak je vidět na detailu na Obr. 82. Tato chyba bude ještě opravena a výsledný model ji nebude obsahovat.

Zbytek součásti vyšel poměrně dobře, vzhledem k naměřeným datům. Některé odchylky se zde sice objevují, ale nejsou nikterak velké a neměly by bránit ve funkci dílu.

Finální model krytu je vidět na Obr. 83.

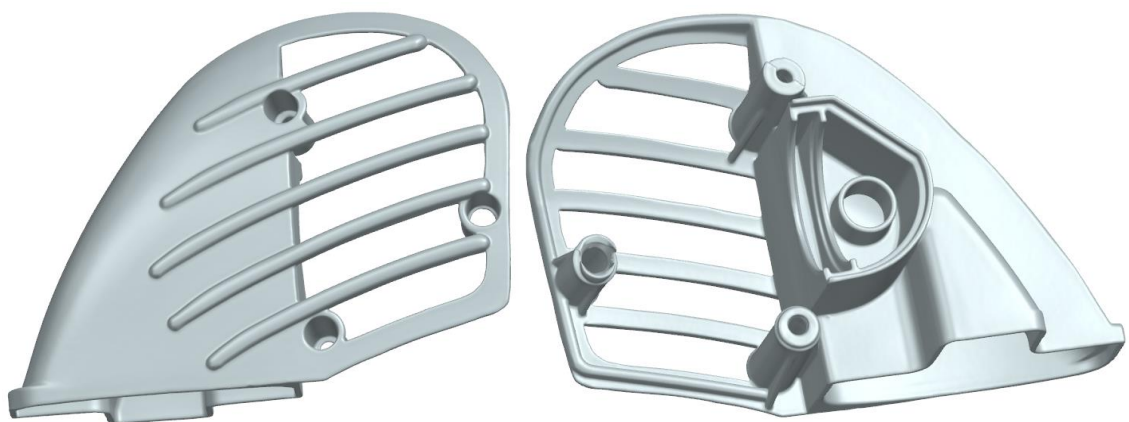


Obrázek 83: Finální model krytu

Práce na modelování byla výrazně delší než čas skenování dílů. Přestože byla přemodelována pouze jedna miska a jeden kryt, celková doba modelování byla přibližně 40 hodin. Velký vliv na čas měla samozřejmě nezkušenost s podobným úkolem, nicméně doba by i tak byla výrazně delší než doba měření součástí.

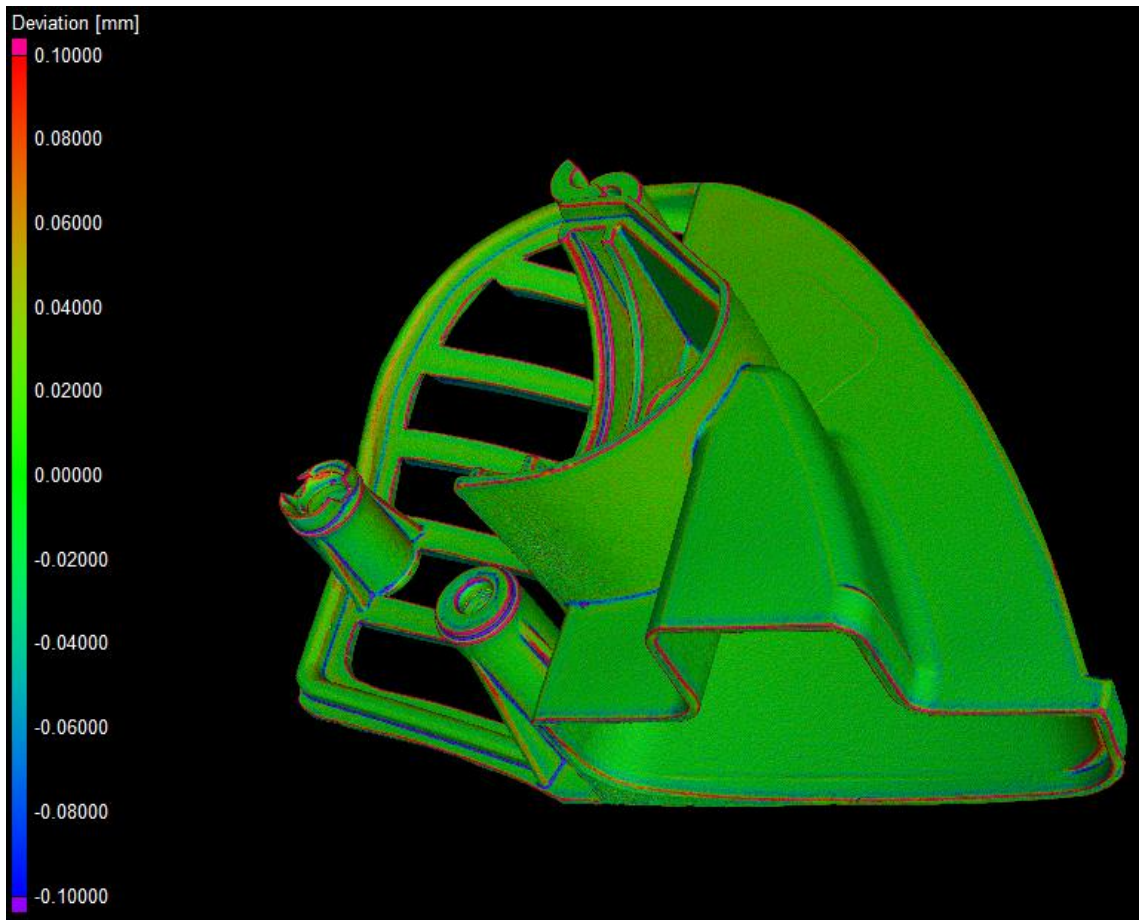
Pro tisk druhé části krytu karburátoru byla zvolena metoda tisku bez parametrizace modelu. STL model by tedy pouze lehce upraven, došlo k jeho vyhlazení a několika malým úpravám. Celá tato úprava trvala pouze půl hodiny, což je velká časová úspora. Byla místa, kde vyhlazení součástí trochu zbytečně zmírnilo některá osazení a hrany, nemělo by se však jednat o funkční místa a neměl by tak vznikat žádný problém.

Nevýhodou oproti parametrizovanému modelu bylo, že velikost souboru exportovaného do softwaru pro aditivní výrobu, byla mnohonásobně vyšší a panovaly tak obavy o schopnost jeho zpracování. Výsledný model je vidět na Obr. 84.



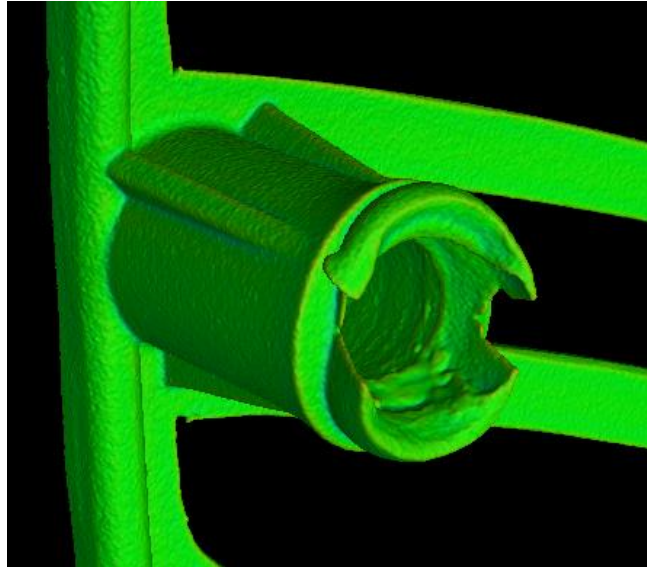
Obrázek 84: Výsledek pouhých úprav STL souboru z výpočetní tomografie

Proběhlo také porovnání upraveného STL modelu s naměřenými daty. Výsledky jsou vidět na Obr. 85. Je vidět, že přesně podle předpokladů je součást celkově přesnější, pouze ostré hrany jsou zaoblené. Rozdíly oproti měření nejsou veliké, vejdou se do 0,1 mm.



Obrázek 85: Porovnání upraveného STL souboru s měřením z výpočetní tomografie

Druhým problémem je, že součást při takovéto úpravě obsahuje i chyby a poškození, které jsou na reálném dílu, a které vznikly při provozu, viz Obr. 86. Ideální by tak bylo zvolit kompromisní metodu, kde by byla většina dílu pouze vyhlazena a některé detaily byly přemodelovány a upraveny tak, aby součást vypadala jako originál.



Obrázek 86: Přenesené poškození z reálného dílu

6.3. Aditivní výroba součástí

Posledním krokem reverzního inženýrství a také této práce, bude výroba všech dílů na 3D tiskárně od firmy Průša3D. Konkrétně se jedná o model Prusa i3 MK3S, viz Obr. 87. Jedná se o nejnovější model tiskárny dané firmy a pracuje na principu FDM. Součástí tiskárny je vyhřívaná podložka.



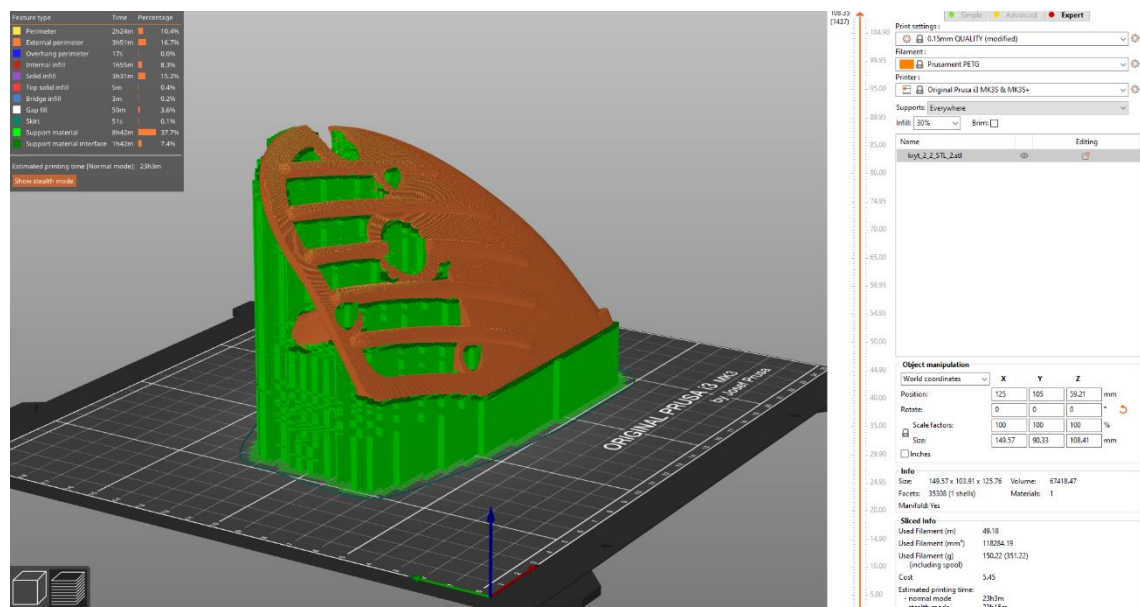
Obrázek 87: 3D tiskárna Prusa i3 MK3S [44]

Materiálem použitým na výrobu modelu je originál od firmy Průša3D – Prusament PETG. Jedná se o klasický PET-G materiál, který je velmi odolný s dobrou teplotní odolností. Díky použitelnosti

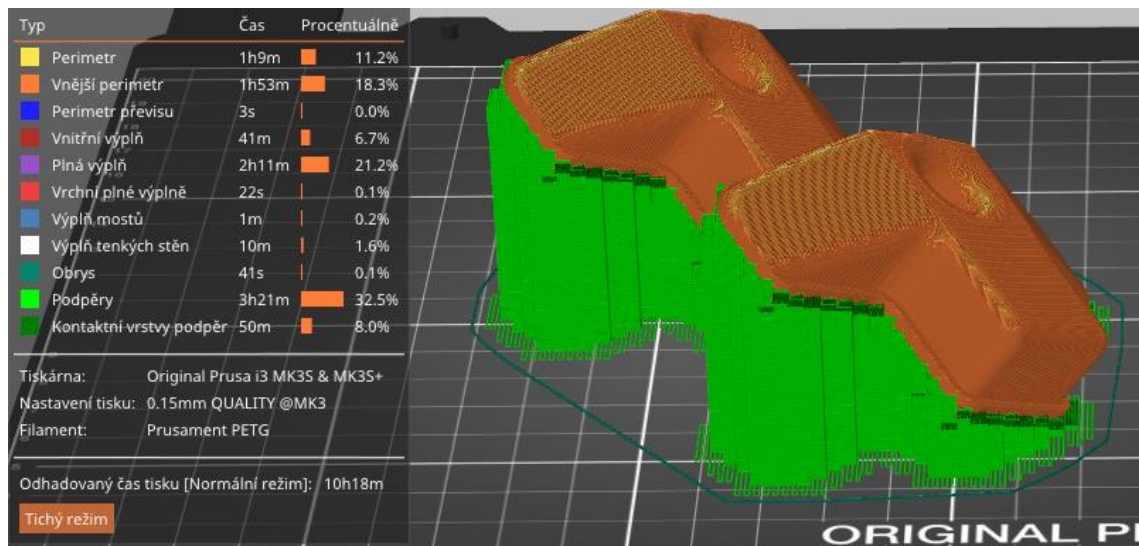
ve venkovním prostředí, dobré odolnosti vůči vodě a chemikáliím je vhodným materiálem pro využití na kryt karburátoru. Materiál je dobře tisknutelný, pouze následné odstraňování podpor je trochu složitější.

Všechny přípravy pro tisk probíhají v programu PrusaSlicer, který po importu STL souboru rozdělí model do jednotlivých vrstev a také v něm probíhají všechna nastavení.

Nastavení tisku je díky volbě originálního materiálu přednastavený v tiskárně. Teplota extrudéru by se měla pohybovat kolem 250 °C. Doporučení na vyhřívání podložky je na 80 °C. Nastavení kvality tisku je na úrovni „Quality“ a výška vrstvy je 0,15 mm. Umístění dílů a nastavení je vidět na Obr. 88 a 89. Slicer také ukáže odhadovanou dobu tisku. Pro jeden kryt to bylo 23 hodin a 3 minuty, pro druhý necelých 22 hodin. Obě misky najednou se tisknuly 10 hodin a 18 minut.



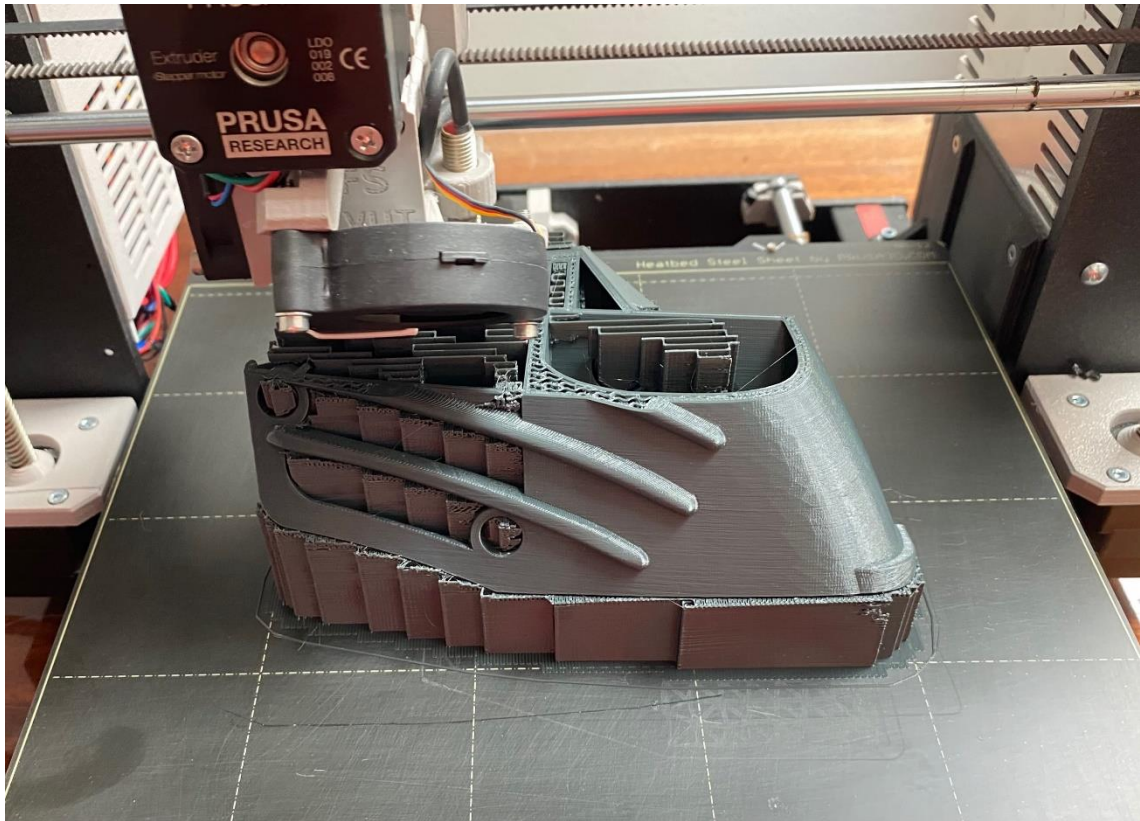
Obrázek 88: Pozice tisku krytu a pohled do nastavení Sliceru



Obrázek 89: Pozice tisku misek a pohled na složení tisknutých částí

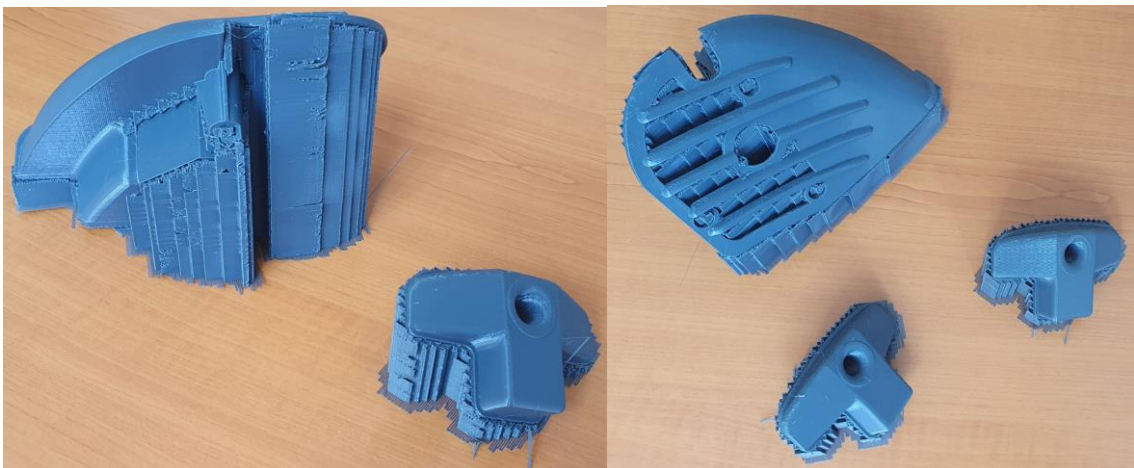
Slicer také přidá podpěry nutné pro tisk. Zde je patrné, že součást nebyla konstruována pro aditivní výrobu, jelikož výsledné množství podpor je velmi vysoké, v případech obou krytů se hodnota blíží 50 % z celého objemu tisknutého materiálu. V případě misek bylo z celkově použitého materiálu využito na podpory 40,5 %. Na Obr. 89 můžeme také vidět procentuální rozdělení částí jako perimetr, vnitřní výplň, nebo podpěry, které budou tisknuty v průběhu výroby.

Na Obr. 90 je vidět průběh výroby. Jsou dobře patrné jednotlivé vrstvy tisku, podpěry pro udržení nedostatečně skloněných částí a také výplň vnitřních oblastí dílů, které nejsou kompletně vyplněny, ale je zde patrný vzor. Toto je běžné nastavení kvůli úspoře materiálu a především doby tisku.



Obrázek 90: Průběh tisku krytu

Finální výrobky jsou vidět na Obr. 91, zde ještě před odstraněním tiskových podpor.



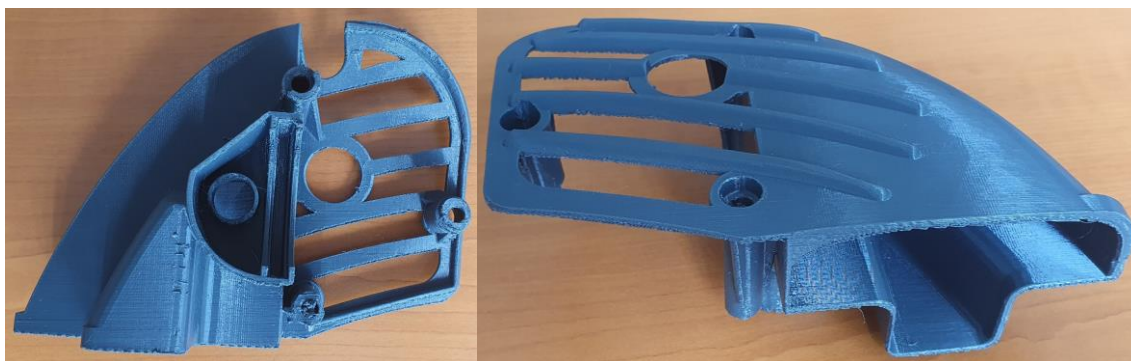
Obrázek 91: Díly i s podpěrami z různých stran

Na obrázku 92 jsou vidět hotové misky po odstranění podpěr. Jejich tisk proběhl v pořádku a výsledné díly jsou bez vad.



Obrázek 92: Misky vytvořené metodou reverzního inženýrství

Na Obr. 93 je levý kryt karburátoru, který byl tisknut z parametrizovaného modelu. Tisk je zdařilý, bez vad či jiných nedostatků. Jediným problémem je nedostatečná vůle pro vložení misky do spodní části krytu, což je pravděpodobně způsobeno chybou při tvorbě parametrického modelu. Bylo by zapotřebí ještě drobného zbrúšení tak, aby díly zapadaly.



Obrázek 93: Levý kryt karburátoru vytvořený metodou reverzního inženýrství

Tisk pravého krytu, jehož model byl zhotoven jinou metodou, tedy pouhou úpravou STL souboru z měření, byl také zdařilý. Výsledek je vidět na Obr. 94, tisk nevnesl žádné další chyby, pouze převzal ty, které zůstaly v modelu.



Obrázek 94: Pravý kryt karburátoru vytvořený tiskem upraveného STL

Miska, která byla tisknuta z parametrizovaného modelu, by do tohoto modelu nezapadala přesně. Ideální by bylo použít stejnou metodu úpravy STL souboru i na díl misky, a pak by bylo velice pravděpodobné, že by díly seděly velice přesně.

7. Závěr

Cílem této práce bylo prozkoumat a zhodnotit možnosti využití reverzního inženýrství, jako zdroje dat pro aditivní technologie výroby.

Pro získání přehledu o problematice reverzního inženýrství práce začíná teoretickou částí. Nejdříve je představen tento přístup jako takový, je popsána jeho historie a jsou diskutovány jeho aplikační možnosti v různých oborech, nejenom v průmyslových odvětvích, ale například také v medicíně.

Pokračuje se detailním popisem postupu reverzního inženýrství, které se skládá ze snímání bodů, zpracování naměřených bodů a vzniku 3D modelu. V kapitole jsou uvedeny také programy, které se používají při reverzním inženýrství.

Základní část reverzního inženýrství je měření součástí. Metody měření jsou tedy další kapitolou. Je zpracován přehled systémů pro akvizici dat a jejich rozdělení. Dále jsou jednotlivé metody detailně popsány a jsou uvedeny jejich výhody a nevýhody. Dostalo se i na přehled vybraných snímacích systémů, které jsou dostupné na trhu. V přehledu se nachází také systémy, které jsou použity pro měření v praktické části diplomové práce. Jedná se o triangulační metodu proužkovou projekci a výpočetní tomografii.

Poslední teoretická kapitola se věnuje problematice aditivních technologií pro zpracování polymerů. Je vysvětlen princip aditivní výroby jako takový, popsán její postup a rozdíly oproti klasickým technologiím výroby. Jsou také diskutovány výhody a nevýhody aditivní výroby především v porovnání s obvyklými technologiemi a také je zmíněn aplikační potenciál a možnosti využití této technologie.

Dále je v kapitole popsáno dělení technologií 3D tisku pro výrobu z polymerů. Některé konkrétní technologie jsou detailně popsány a jsou vysvětleny jejich principy. Jsou také zmíněné materiály, které se pro tisk polymerů používají, včetně výčtu jejich vlastností, tiskových parametrů a ceny jednotlivých materiálů.

Posledním krokem je aplikovat získané poznatky o reverzním inženýrství a aditivní výrobě v praxi. Jako objekt zájmu byl zvolen plastový kryt karburátoru z veteránského mopedu Stadion S22. Díl byl zvolen s ohledem špatnou dostupnost náhradních dílů.

Dle postupu reverzního inženýrství práce začala měřením součástí. Měření probíhalo na výpočetní tomografii a triangulačním skeneru s proužkovou projekcí, obě zařízení byla

v laboratořích fakulty. Časové porovnání vyšlo ve prospěch proužkové projekce, kde měření až po export dat trvalo 4 hodiny, oproti 6 hodinám na tomografu.

Při skenování na tomografu došlo ke zjištění, že byla zvolena nevhodná pozice umístění součásti v pracovním prostoru a pro další měření byla poloha upravena tak, aby výsledky měření neobsahovali vnesené chyby. Také byla diskutována kvalita exportu dat tak, aby nedošlo ke ztrátě informací a zároveň byl soubor co možná nejúspornější. Celkově se podařilo získat velmi kvalitní data vhodná k dalšímu zpracování.

Měření proužkovou projekcí bylo sice rychlejší, ale výsledky nebyly tak dobré v porovnání s tomografií. Problémem byl samotný triangulační systém, který neumožňuje změřit některé složité oblasti dílu. Dále pak docházelo k odleskům na součásti a data tak nebyla kompletní. Ve výsledném exportovaném souboru se tak nacházelo hodně děr a nedostatků. Tento systém byl z obou dvou vyhodnocen jako méně vhodný pro měření dané součásti a dále byly používány soubory z tomografu.

Následovala část, kde je provedena parametrizace modelu v programu Siemens NX. Ta byla prováděna především pro vylepšení povrchu součásti a odstranění chyb, které byly vneseny měřením na CT a také chyb, které obsahoval reálný díl díky opotřebení. Zde byl postup rozdělen pro dvě poloviny sestavy dílů. Jedna byla parametrizována, druhá byla pouze lehce vyhlazena z původního STL souboru. Rozdíl v době zpracování byl velký, parametrizace krytu a misky trvala dohromady 40 hodin, práce na vyhlazení obou dílů zabrala přibližně hodinu. Celková přesnost vyhlazených dílů je větší, ale došlo k zaoblení ostrých hran a vnesení reálných vad dílu.

Posledním krokem byla výroba dílů. Byl vytisknut jeden kryt jako parametrizovaný a jeden jako pouze upravené STL, misky byly obě vytisknuté z parametrizovaného modelu. Tisk krytů trval 22 a 23 hodin. Misky byly obě najednou hotové za 10 hodin a 18 minut. Výroba proběhla bez problémů. Pro dokonalé zapadnutí dílů by bylo zapotřebí ještě trochu zbrousit jednotlivé díly, které byly vytisknuty parametricky. Díly z upraveného STL by zapadly bez problémů.

Při uvážení času zpracování a výsledné kvality modelů pro aditivní výrobu, by bylo rozhodně lepší upravovat díly kombinací obou postupů tvorby modelu. Tedy díly vyhladit a parametricky upravit pouze místa, kde jsou chyby vzniklé buď měřením, nebo vneseny z reálného dílu. Výhodnější by to bylo jak z hlediska časového, tedy i z hlediska finančních nákladů, tak také z hlediska výsledné přesnosti modelu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] WANG, Wego. *Reverse engineering: technology of reinvention*. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 978-1-4398-0630-2.
- [2] RAJA, Vinesh. a Kiran J. FERNANDES. *Reverse engineering: an industrial perspective*. London: Springer, c2008. ISBN 978-1-84628-855-5.
- [3] MCDONALD, Julia A., Chris J. RYALL a David I. WIMPENNY. *Rapid Prototyping Casebook*. London: Professional Engineering Publishing, 2001. ISBN 1 86058 076 9.
- [4] *DAAAM International Vienna – Ex Libris. Ex. Scientia. Ex Intellectu. Ex Ingenio* [online]. [cit. 27.07.2021] Dostupné z: https://daaam.info/Downloads/Pdfs/science_books_pdfs/2013/Sc_Book_2013-039.pdf
- [5] Emirates to Unveil New Business Class Seat at ITB Berlin. [online]. Copyright © [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://www.emirates.com/media-centre/emirates-to-unveil-new-business-class-seat-at-itb-berlin>
- [6] Factsheets : Soviet Union Impounds and Copies B-29. *Wayback Machine* [online]. [cit. 27.07.2021] Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20140805153502/http://www.nationalmuseum.af.mil/factsheets/factsheet.asp?id=1852>
- [7] Tupolev TU-4 – Russia – Air Force. Aviation Photo #1297549 [online]. [cit. 27.07.2021] Dostupné z: <https://www.airliners.net/photo/Russia-Air-Force/Tupolev-Tu-4/1297549>
- [8] Boeing B-29 Superfortress > National Museum of the United States Air Force™ > Display [online]. [cit. 27.07.2021] Dostupné z: <https://www.nationalmuseum.af.mil/Visit/Museum-Exhibits/Factsheets/Display/Article/196252/boeing-b-29-superfortress/>
- [9] DÚBRAVČÍK Michal, KENDER Štefan. Application of Reverse Engineering Techniques in Mechanics System Services, *Procedia Engineering*, ISSN 1877-7058.
- [10] LINGLING Li, CONGBO Li, YING Tang, YANBIN Du. An integrated approach of reverse engineering aided remanufacturing process for worn components, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. ISSN 0736-5845.
- [11] SOKÓL Krzysztof, CEKUS Dawid. Reverse Engineering as a Solution in Parts Restoration Process, *Procedia Engineering*. ISSN 1877-7058.

- [12] GIBSON, Ian. *Advanced manufacturing technology for medical applications: reverse engineering, software conversion, and rapid prototyping*. Hoboken, NJ, USA: J. Wiley, c2005. ISBN 0-470-01688-4.
- [13] Align Technology [online]. [cit. 27.07.2021] Dostupné z: https://www.aligntech.com/solutions/invisalign_system
- [14] Le, Chi Hieu & Vander Sloten, Jos & T Hung, L & Khanh, L & Soe, Shwe & Zlatov, Nikolay & Phuoc, Le & D Trung, P. (2018). Medical Reverse Engineering Applications and Methods.
- [15] 3D Scanning and Reverse Engineering with Geomagic Design X Helps NASCAR Cars Race to Victory | 3D Systems. *3D Printers, Software, Manufacturing & Digital Healthcare | 3D Systems* [online]. Copyright © 2021 3D Systems, Inc. All rights reserved. [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/customer-stories/3d-scanning-and-reverse-engineering-geomagic-design-x-helps-nascar-cars-race>
- [16] Redesigning an exhaust system from an Artec Leo scan in under one | Artec 3D Scanners Applications. *Professional 3D Scanners | Artec 3D | Best 3D Scanning Solutions* [online]. Copyright © [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://www.artec3d.com/cases/cad-car-redesign>
- [17] WinWerth® FormCorrect – nový 3D proces korekce dílců | PRIMA BILAVČÍK. *Přístroje pro měření a metrologii | PRIMA BILAVČÍK* [online]. Copyright © Werth [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://www.merici-pristroje.cz/novinky/detail/winwerth-formcorrect-novy-3d-proces-korekce-dilcu.htm>
- [18] Tool correction with ZEISS REVERSE ENGINEERING. [online]. Dostupné z: https://www.zeiss.com/metrology/_successtories/tool-correction-using-zeiss-reverse-engineering.html
- [19] LI, Tianxing, Jubo LI, Xiaozhong DENG, Jianjun YANG, Genggeng LI a Wensuo MA, 2017. A new digitized reverse correction method for hypoid gears based on a one-dimensional probe. *Measurement Science and Technology* [online]. Dostupné z: [doi:10.1088/1361-6501/aa8dd7](https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa8dd7)
- [20] Example of the point cloud of the face. | Download Scientific Diagram. *ResearchGate | Find and share research* [online]. Copyright © 2008 [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Example-of-the-point-cloud-of-the-face_fig1_322498282

- [21] ZEISS Reverse Engineering – From a scan to a model. [online]. [cit. 27.07.2021] Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/software/reverse-engineering.html>
- [22] Focus Inspection, Point cloud software, Nikon Metrology [online]. [cit. 27.07.2021] Dostupné z: <https://www.nikonmetrology.com/en-us/software/point-cloud-software-focus-inspection>
- [23] GOM Inspect Suite: Making quality easily visible | Software for 3D inspection. *Precise Industrial 3D Metrology | GOM* [online]. [cit. 27.07.2021] Dostupné z: <https://www.gom.com/en/products/gom-inspect-suite>
- [24] Geomagic Design X | Scan to CAD Software for Reverse Engineering. *Professional 3D Scanners | Artec 3D | Best 3D Scanning Solutions* [online]. Copyright © [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: https://www.artec3d.com/3d-software/geomagic-design-x?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=12554714117&utm_term=geomagic||kwd-307581920581&utm_content=119631253379||&keyword=geomagic&gclid=CjwKCAjw7J6EBhBDEiwA5UUM2vWOGiDWvIhfgR4ThmtCnRJdzKobFA64DpYf8H7BSybKfBr0P9m0shoCk4kQAvD_BwE
- [25] ROBERT J. HOCKEN & PAULO H. PEREIRA. *Coordinate measuring machines and systems*. 2nd ed. Boca Raton, Fla: CRC Press, 2012. ISBN 9781420017533.
- [26] KÁKONA, Jakub. *Vysílač pro laserový dálkoměr*. Praha, 2012. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. Vedoucí práce prof. Ing. Ivan Procházka, DrSc.
- [27] NX | Siemens Digital Industries Software. [online]. Copyright © Siemens 2021 [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/cz/products/nx/>
- [28] McCann, Shawn. "3 D Reconstruction from Multiple Images." (2014). [online]. [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: https://cvgl.stanford.edu/teaching/cs231a_winter1415/prev/projects/CS231a-FinalReport-sgmccann.pdf
- [29] BIMfo – Fotogrammetrie. [online]. [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://www.bimfo.cz/Aktuality/Fotogrammetrie.aspx>
- [30] Structure from Motion (SfM) photogrammetric principle. | Download Scientific Diagram. *ResearchGate | Find and share research* [online]. Copyright © 2008 [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Structure-from-Motion-SfM-photogrammetric-principle-Source-Theia-sfmorg-2016_fig3_303824023

- [31] Best Photogrammetry Software in 2021 (Some are Free) [online]. [cit. 27.07.2021]
Dostupné z: <https://all3dp.com/1/best-photogrammetry-software/>
- [32] KREJZEK Ladislav, Využití počítačové tomografie v rámci kontroly kvality ve strojírenském průmyslu. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [33] CARMIGNATO, Simone, Wim DEWULF a Richard LEACH, ed., 2018. Industrial X-Ray Computed Tomography [online]. B.m.: Springer International Publishing. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-59573-3
- [34] HRBKOVÁ Eliška, Aplikace reverzního inženýrství v oblastech s vysokými požadavky na přesnost. Praha, 2018, Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [35] *About MSI Viking Total Metrology Solutions – MSI Viking* [online]. Copyright © [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: https://www.msiviking.com/documents/ZEISS/optical/Optotechnik_COMET-L3D.pdf
- [36] CMM Laser Scanners | High accuracy, Non-contact | Nikon Metrology | Nikon Metrology. [online]. Copyright © 2021 Nikon Metrology NV [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://www.nikonmetrology.com/en-gb/3d-metrology/automated-3d-scanning>
- [37] ModelMaker H120 | Manual 3D Scanning | Nikon Metrology. [online]. Copyright © 2021 Nikon Metrology NV [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://www.nikonmetrology.com/en-gb/3d-metrology/manual-3d-scanning-modelmaker-h120>
- [38] APDIS | Large Volume Metrology | Nikon Metrology. [online]. Copyright © 2021 Nikon Metrology NV [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://www.nikonmetrology.com/en-gb/3d-metrology/large-volume-metrology-apdis-mv4x0>
- [39] ZEISS, Brožura X-RaySeries. Verze 2021.
- [40] Additive Fabrication (Rapid prototyping, tooling). *Manufacturing Cost Estimation* [online]. Copyright © 2021 CustomPartNet. All Rights Reserved. [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>
- [41] Gebhardt, Andreas Hötter, Jan-Steffen. (2016). *Additive Manufacturing - 3D Printing for Prototyping and Manufacturing - 1.1 Systematics of Manufacturing Technologies*. Hanser Publishers. Dostupné z:

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt010ZI2D1/additive-manufacturing/systematics-manufacturing>

- [42] Seznam materiálů pro 3D tisk. *Materiály a doplňky pro 3D tisk - filamenty - Materialpro3d.cz* [online]. Copyright © Materialpro3d.cz, všechna práva vyhrazena [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
- [43] STADION MOPEDY (1957 – 1965). *Garáž.cz* [online]. Copyright © 1996 [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://www.garaz.cz/clanek/splasene-trubky-aneb-pribeh-rakovnickych-mopedu-stadion-21004997>
- [44] 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S. [online]. [cit. 27.07.2021] Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/181-3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s.html#>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Porovnání klasického a reverzního inženýrství.....	9
Obrázek 2: Úrovně vývoje softwaru [1]	10
Obrázek 3: Boeing 777 -300ER společnosti Emirates [5]	12
Obrázek 4: Tupolev Tu-4 [7].....	13
Obrázek 5: Boeing B-29 [8]	13
Obrázek 6: Vlevo neviditelná rovnátka a vpravo skenovací systém od Align Technology, Inc. [13]	15
Obrázek 7: Příklady využití RE v medicíně [14]	15
Obrázek 8: Poškozené ozubené kolo [9]	16
Obrázek 9: Vlevo body získané skenováním, vpravo výsledné ozubené kolo [9].....	16
Obrázek 10: Model Ducati Panigale s novým blatníkem [11]	17
Obrázek 11: Naskenované mraky bodů [11].....	17
Obrázek 12: Využití reverzního inženýrství při návrhu designu automobilu [2].....	18
Obrázek 13: Naskenovaný závodní automobil NASCAR pro počítačovou simulaci aerodynamiky [15]	19
Obrázek 14: Původní systém výfukového potrubí [16].....	19
Obrázek 15: Nový systém výfukového potrubí [16].....	20
Obrázek 16: Postup úpravy CAD modelu [17].....	21
Obrázek 17: Proces reverzního inženýrství [2].....	22
Obrázek 18: Obličej jako mrak bodů [20].....	23
Obrázek 19: Ukázka z programu Siemens NX	25
Obrázek 20: Postup při kontrole v programu Focus Inspection [22]	25
Obrázek 21: Přehled CMM senzorů	27
Obrázek 22: Základní dotykový snímací systém [25]	29
Obrázek 23: Triangulační metody a) jednokamerový b) dvoukamerový systém	31
Obrázek 24: Různé vzory světla pro použití při proužkové projekci	32
Obrázek 25: Princip měření doby letu [2]	33
Obrázek 26: Schéma postupu snímání objektu při fotogrammetrii [30]	34
Obrázek 27: Vliv ohniska na výsledný obraz [33].....	36
Obrázek 28: Princip výpočetní tomografie [2]	37
Obrázek 29: ZEISS COMET L3D 2	38
Obrázek 30: L100 vlevo a LC15Dx vpravo [36].....	40
Obrázek 31: ModelMaker H120 [37]	41
Obrázek 32: Ukázka celého měřicího systému Nikon MCAx S + ModelMaker H120 [37]	41
Obrázek 33: APDIS MV4x0 Laser Radar [38]	42

Obrázek 34: Vlevo tomograf řady Xradia, vpravo řada METRONOM [39].....	43
Obrázek 35: Vlevo tomograf řady BOSELLO, vpravo řada VoluMax [39].....	44
Obrázek 36: Podstata skládání vrstev při aditivní výrobě [41]	45
Obrázek 37: Technologie aditivní výroby pro polymery	47
Obrázek 38: Technologie FDM [40].....	48
Obrázek 39: Technologie SLS [40]	49
Obrázek 40: Technologie SLA [40]	50
Obrázek 41: Technologie LOM [40].....	50
Obrázek 42: Kryt karburátoru mopedu Stadion S22	53
Obrázek 43: Stadion S22 na oficiální dobovém snímku [43].....	54
Obrázek 44: Rozložený kryt karburátoru	55
Obrázek 45: Rozdílná uložení v tomografu	56
Obrázek 46: Vlevo miska, která byla zapíchnuta v polystyrenu, vpravo miska, která při skenu ležela na horní ploše	56
Obrázek 47: Parametry skenování tomografem	57
Obrázek 48: Náhled do programu VGSTUDIO.....	58
Obrázek 49: Vlevo zjednodušená verze, vpravo plná verze STL souboru	58
Obrázek 50: Závitová vložka.....	59
Obrázek 51: Dva pohledy na chybu způsobenou kovovou vložkou	60
Obrázek 52: Exportovaný model krytu z VGSTUDIO 2 pohledy z různých stran.....	60
Obrázek 53: ZEISS COMET L3D 2	61
Obrázek 54: Kryt na pracovní ploše skeneru	61
Obrázek 55: Nastavení expozice měření.....	62
Obrázek 56: Pasování jednotlivých měření.....	63
Obrázek 57: Výsledný obraz po 4 sekvencích měření.....	64
Obrázek 58: Exportovaný STL soubor misky, pohled z různých stran.....	64
Obrázek 59: Exportovaný STL soubor krytu, pohled z různých stran.....	64
Obrázek 60: Chybějící povrchy modelu.....	65
Obrázek 61: Porovnání kritické části krytu. Vlevo model na základě měření COMET, vpravo na základě měření CT	66
Obrázek 62: Prostředí programu Siemens NX s importovaným modelem	67
Obrázek 63: Barevné rozdělení ploch dle tvaru	67
Obrázek 64: Vytvoření roviny v programu Siemens NX.....	68
Obrázek 65: Nově vytvořená rovina.....	68
Obrázek 66: Vlevo region pro tvorbu povrchu, uprostřed povrch se vstupním modelem, vpravo samotný kužel	69
Obrázek 67: Tvorba "Freeform" plochy	69

Obrázek 68: Výsledná plocha v porovnání s předlohou a samotná	70
Obrázek 69: Prodloužení rovin.....	70
Obrázek 70: Spojení ploch	71
Obrázek 71: Přidání dalších ploch	71
Obrázek 72: Zaoblení přechodů ploch	72
Obrázek 73: Průběžný výsledek po zaoblení hran	72
Obrázek 74: Vytvořené objemové těleso.....	73
Obrázek 75: Odebírání materiálu.....	73
Obrázek 76: Výsledný model misky, pohled z více stran	74
Obrázek 77: Porovnání modelu a naměřených dat	74
Obrázek 78: Porovnání vylepšeného modelu	75
Obrázek 79: Pohled zespoda na porovnání	75
Obrázek 80: Porovnání krytu s naměřenými daty.....	76
Obrázek 81: Porovnání krytu s naměřenými daty.....	76
Obrázek 82: Nejviditelnější chyba.....	76
Obrázek 83: Finální model krytu	77
Obrázek 84: Výsledek pouhých úprav STL souboru z výpočetní tomografie	77
Obrázek 85: Porovnání upraveného STL souboru s měřením z výpočetní tomografie	78
Obrázek 86: Přenesené poškození z reálného dílu	79
Obrázek 87: 3D tiskárna Prusa i3 MK3S [44].....	79
Obrázek 88: Pozice tisku krytu a pohled do nastavení Sliceru.....	80
Obrázek 89: Pozice tisku misek a pohled na složení tisknutých částí	81
Obrázek 90: Průběh tisku krytu.....	82
Obrázek 91: Díly i s podpěrami z různých stran	82
Obrázek 92: Misky vytvořené metodou reverzního inženýrství	83
Obrázek 93: Levý kryt karburátoru vytvořený metodou reverzního inženýrství.....	83
Obrázek 94: Pravý kryt karburátoru vytvořený tiskem upraveného STL	83

Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry ZEISS COMET dle výrobce pro objektivy s nejmenším a největším zvětšením [35].....	38
Tabulka 2: Parametry L100 dle výrobce [36]	39
Tabulka 3: Parametry LC15Dx dle výrobce [36]	39
Tabulka 4: Parametry LC15Dx dle výrobce [37]	40
Tabulka 5: Ceny výše uvedených materiálů [42]	52