



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



**Bakalářská práce**

Reverse engineering – rekonstrukce  
modelu olejového čerpadla





## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 26. 3. 2019

.....

podpis



## Poděkování

Rád bych poděkoval všem blízkým přátelům, rodině, přítelkyni a všem dalším, kteří respektovali čas, který jsem musel vynaložit pro tvorbu své bakalářské práce. Rád bych také všem těmto poděkoval za podporu, kterou mi poskytovali po celou dobu studia, ať už podporu finanční, tak i psychickou. Velice si toho vážím.

Hlavní poděkování patří panu Ing. Janu Tomíčkoví, Ph.D. za jeho trpělivost, rady, informace a další cenné věci, které mi poskytl a kterých si nesmírně vážím, protože toto vše dělal navzdory svému pracovnímu vytížení. Další velké poděkování patří také společnosti Topmes, která mi velice pomohla při získání dat a také poskytla laser scanner.



## Anotace

<b>Autor:</b>	Soldát Filip
<b>Název BP:</b>	Reverse engineering – rekonstrukce modelu olejového čerpadla
<b>Rozsah práce:</b>	počet str., počet obr., počet tab.
<b>Školní rok:</b>	2018/2019
<b>Škola:</b>	ČVUT v Praze – Fakulta strojní
<b>Ústav:</b>	Ú 12134 – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
<b>Vedoucí bakalářské práce:</b>	Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
<b>Zadavatel:</b>	ČVUT v Praze – Fakulta strojní
<b>Projekt:</b>	
<b>Využití:</b>	Tvorba 3D CAD modelu, který lze následně použít pro tvorbu výkresové dokumentace a technologického postupu pro výrobu olejového čerpadla.
<b>Klíčová slova:</b>	reverse engineering, laserscanning, přesnost, extrakce bodů, prostorové měření
<b>Anotace:</b>	Tato bakalářská práce se zabývá aplikovaným reverzním inženýrstvím na starém olejovém čerpadle z motocyklu Standard Kurier 500. Bylo provedeno měření čerpadla za pomoci laserscanneru. Následně bylo provedeno zpracování stl souboru a byl vytvořen CAD model součástí.



## Annotation

<b>Author:</b>	Filip Soldát
<b>Title of Bachelor's dissertation:</b>	Reverse engineering – reconstruction of the oil pump model
<b>Extent:</b>	number p., number fig., number tab.
<b>Academic Year:</b>	2018/2019
<b>University:</b>	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
<b>Department:</b>	Ú 12135 – Department of machining technology, planning and metrology
<b>Supervisor:</b>	Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
<b>Submitter of the Theme:</b>	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
<b>Project:</b>	
<b>Application:</b>	Creating of the 3D CAD model, which can be further used for creating the desing documentation and technological process for further manufacturing of the oil pump.
<b>Key words:</b>	reverse engineering, laserscanning, precision, extraction of the points, spatial measurement
<b>Annotation:</b>	This bachelor dissertation deals with aplicated reverse engineering on the old oil pump which is the part of motorcycle Standard Kurier 500. Measurement of the oil pump were realised by laserscanner, further the treatment of the stl file was done and the CAD model of the part were created.



# Obsah

Úvod .....	10
1. Cíl a postup práce .....	11
2. Motivace .....	11
3. Získané informace o výrobku .....	12
4. Přehled metod reverzního inženýrství .....	13
4.1. Měření na CMM .....	14
4.2. Počítačová tomografie .....	16
4.3. Pruhová projekce .....	20
4.4. Fotogrammetrie .....	21
4.5. White Light Scanning .....	22
4.6. Laserscanning .....	24
4.7. Posouzení vhodnosti metod .....	26
5. Postup měření .....	27
5.1. Rozložení pracovního místa .....	27
5.2. Upnutí výrobku do upínky .....	28
5.3. Skenování .....	29
6. Zpracování dat .....	30
6.1. Filtrace dat .....	30
6.2. Spojení mraků .....	31
6.3. Tvorba parametrického modelu .....	32
6.3.1. Funkce drapérie sw Rhinoceros .....	33
6.3.2. Metoda NURBS ploch v softwaru Polyworks .....	33
6.4. Vytvoření CAD modelu .....	34
7. Zhodnocení vytvořeného modelu .....	37
Závěr .....	38
LITERATURA .....	39
Seznam zkratk .....	41
Přílohy .....	42





Obr. 1 - Motocykl Standard Kurier 500 .....	11
Obr. 2 - olejové čerpadlo motocyklu Standard Kurier 500.....	11
Obr. 3 - olejové čerpadlo motocyklu Standard Kurier 500.....	11
Obr. 4 - HAJOT - Duplexní čerpadlo (převzato z [2]) .....	12
Obr. 5 - Průřez olejovým čerpadlem HAJOT Duplex II (převzato z [1]) .....	13
Obr. 6 - Postup reverzního inženýrství (převzato z [3]) .....	13
Obr. 7 - ZEISS LineScan (převzato a upraveno z [8]).....	15
Obr. 8 - dotykový snímač SMAT pro snímací systém VEST (převzato z [7]).....	15
Obr. 9 - Sketch of a Typical CMM (Singhose and Seering 1995) (převzato a upraveno z [11])..	16
Obr. 10 - Měření dílce s použitím doplňkového dotykového senzoru (převzato z [9]) .....	17
Obr. 11 - Vizualní model prozařování měřeného dílce (převzato z [9]) .....	18
Obr. 12 - Souvislost mezi napětím, velikostí dílce a materiálem dílce (převzato z [9]) .....	18
Obr. 13 - Vizualní návrh konstrukce počítačového tomografu (převzato a upraveno z [9]).....	19
Obr. 14 - Zachycení měřeného dílce ve 360° (převzato z [9]) .....	19
Obr. 15 - Princip promítání pruhů (převzato z [12]).....	20
Obr. 16 - ZEISS COMET 6 (převzato z [14]).....	21
Obr. 17 - Zařízení TripTop (převzato z [12]) .....	22
Obr. 18 - 3D White Light Scanner (převzato a upraveno z [17]) .....	23
Obr. 19 - Příklady laserového skenování (převzato a upraveno z [13]) .....	24
Obr. 20 - Triangulační trojúhelník pro 1D aktivní triangulaci (převzato z [19]) .....	25
Obr. 21 - bras de mesure 3D articulé - MCAx series (převzato a upraveno z [20]).....	26
Obr. 22 - Skener Nikon Modelmaker H120 .....	27
Obr. 23 - Pozice ramene vůči stolu 2.....	28
Obr. 24 - Pozice ramene vůči stolu 1.....	28
Obr. 25 - Upnutí 1 – pohled 2.....	28
Obr. 26 - Upnutí 1 – pohled 1.....	28
Obr. 27 - Upnutí 2 – pohled 2.....	29
Obr. 28 - Upnutí 2 – pohled 1.....	29
Obr. 29 - Komora na spodní části čerpadla .....	29
Obr. 30 - Neúspěšný pokus měření - nedokonalosti.....	30
Obr. 31 - Vyfiltrované body upínacího zařízení.....	30
Obr. 32 - Mrak bodů prvního upnutí bez bodů upínacího zařízení .....	31
Obr. 33 - Mraky bodů obou upnutí v jednom souboru .....	31
Obr. 34 - Renderovaný mrak bodů v softwaru Rhinoceros.....	32
Obr. 35 - Povrch renderovaného mraku bodů .....	32
Obr. 36 - Vzniklé parametrické plochy pomocí drapérie .....	33
Obr. 37 - Spuštěná drapérie na renderovaný mrak bodů .....	33
Obr. 38 - Záplaty již po odstranění mraku bodů .....	34
Obr. 39 - Záplaty na renderovaném mraku bodů .....	34
Obr. 40 - NURBS záplaty v pracovním prostředí Inventoru.....	35
Obr. 41 - Zahájení náčrtu a promítnutí geometrie válce .....	35
Obr. 42 - Vytažení rotační plochy do prostoru.....	36
Obr. 43 - vytvořený model pomocí NURBS rovin 1 .....	36
Obr. 44 - Vytvořený model pomocí NURBS rovin 2.....	36
Obr. 45 - Porovnání NURBS záplat a CAD modelu .....	37

# Úvod

V průběhu posledních let, kdy vzrostl zájem o veterány a obecně o starší technologie, vzrostl také zájem o reverzní inženýrství, které může velice pomoci jak v oblasti výroby, tak v oblasti zachování kultury. Často se o tento trend zajímají společnosti, které tímto způsobem dokáží znovu oživit již zašlé mechanismy, kompletně znovu navrhnout výrobní dokumentaci pro různé díly a na základě této dokumentace třeba i znovu obnovit kompletní výrobu, například strojů jako jsou automobily, motocykly a podobně. Tento trend samozřejmě využívají i muzea a jiné organizace, které reverzním inženýrstvím dokáží rekonstruovat například podobu historických děl, výrobků, ale i jiných zajímavých kulturních pozůstatků, tak aby si dnešní civilizace mohla zpětně představit technické možnosti dávných civilizací.

V současné době je tento trend stále ve fázi vývoje, vznikají stále nové a nové metody, kterými jsme schopni realizovat reverse engineering na stále sofistikovanějších dílech. Jako příklady těchto technologií lze jmenovat právě laserscanning, pruhovou projekci, počítačovou tomografii, CMM stroje s kontaktní sensorikou a další sofistikovaná zařízení, která dále zmiňuje i tato práce. K těmto zařízením také vznikají i nové softwary, které jsou schopny zpracovávat výstupní data těchto zařízení a na základě těchto dat vytvářet například modely ve formátu stl., ze kterých lze následně vytvářet parametrické modely.

Olejové čerpadlo, kterým se práce zabývá, je součástí motocyklu Standard model Kurier 500, který se vyráběl ve společnosti Gutbrod v Německu v letech 1937 až 1940. Tento motocykl byl primárně určen pro využití policie. Disponoval 12 koňskými silami a čtyřdobým motorem o objemu 496 cm<sup>3</sup>. Jelikož se motocykl vyráběl pouze tři roky, nebylo jich vyrobeno moc a výrobní dokumentace dnes již bohužel neexistuje. Výsledkem této práce bude tedy parametrický model čerpadla, na jehož základě mohou vzniknout nové výrobní podklady. [4]



## 1. Cíl a postup práce

Jak již bylo zmíněno v úvodu, cílem této práce je seznámit s metodami reverse engineeringu a poté vybrat nejvhodnější metodu pro vytvoření kompletního parametrického modelu z původního olejového čerpadla motocyklu Standard Kurier 500 a následně tuto metodu použít. Nejprve bude třeba získat přehled standardních metod, které lze použít pro reverzní inženýrství, následně vybrat jednu z těchto metod, která je nejvhodnější. Pomocí softwaru, například pomocí Rhinocera, poté zpracovat získaná data a vyhotovit parametrický model.

## 2. Motivace

Hlavní motivací práce je realizace podkladu pro budoucí vytvoření výkresové dokumentace olejového čerpadla, kterou lze použít pro stanovení výrobního postupu. Tvorba této dokumentace pomůže v budoucnu s renovací těchto motocyklů.



Obr. 1 - Motocykl Standard Kurier 500



Obr. 2 - olejové čerpadlo motocyklu Standard Kurier 500



Obr. 3 - olejové čerpadlo motocyklu Standard Kurier 500



### 3. Získané informace o výrobku

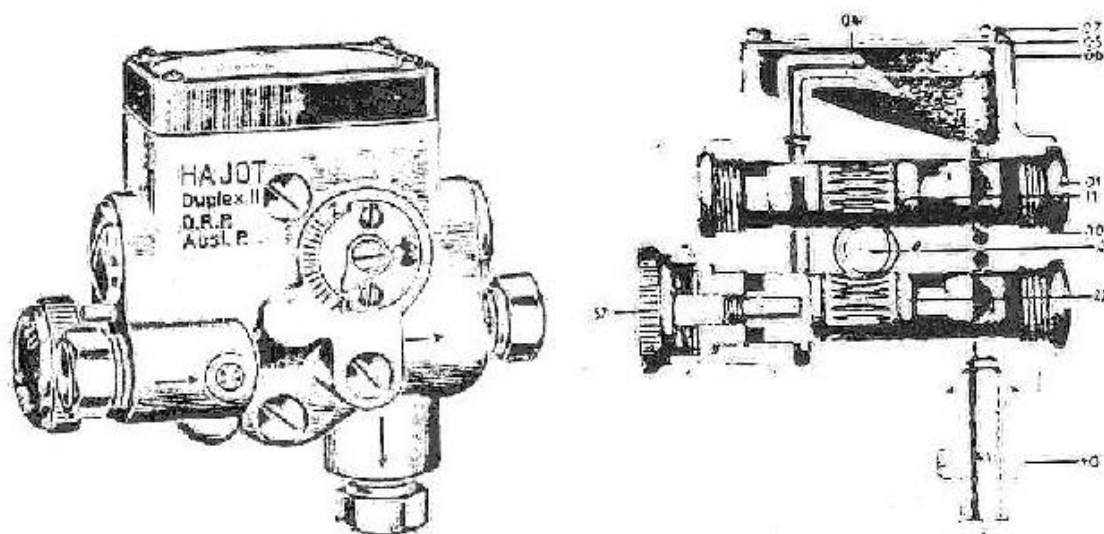
Jelikož se výrobek již více než půl století nikde nevyrábí a za celou dobu se nikdo ani nepokusil výrobu znovu realizovat, není k dispozici žádná dokumentace, která by jakkoliv popisovala ať už materiál, ze kterého je čerpadlo vyrobeno, nebo důležité geometrické vlastnosti tvaru. V rámci měření bude tedy nutné určit i veškeré průměry, rozteče, tolerance a například i průměry a délky závitů v otvorech.

Dle vizuální kontroly dvou výrobků, které jsou k dispozici, lze určit, že materiál prvního dílu je nejspíš hliník a materiál druhého je ocel. Toto lze určit dle váhy výrobku a viditelné struktury materiálu.

Výrobce tohoto čerpadla byla francouzská společnost HAJOT, která čerpadlo vyráběla až do 60. let minulého století, kdy se změnila konstrukce. Jedná se o čerpadlo HAJOT DUPLEX II. Čerpadlo je standardní model, který má dvě mazací místa a mohlo být instalováno do více typů motocyklů, nebo jiných strojů, které potřebovaly intenzivní mazání. Konstrukce od společnosti HAJOT byla oproti konkurenční společnosti Pilgrim velice spolehlivá, elegantní a měla konzistentní produkci oleje. Vývoj těchto čerpadel zahrnoval roky pokusů a odstraňování nedostatků. Úlohou tohoto čerpadla bylo zásobování mazaných míst v motoru olejem a tím i zajištění dostatečného tlaku. Oproti původním modelům Simplex II, II B a IV, které měly plný výkon mazání 1,2 litru za hodinu, modely Duplex II a II B byly schopny až 2,4 litru za hodinu. Pohánění čerpadla zajišťuje kliková hřídel, olej je nasáván z olejové nádrže na sací straně, na straně tlakové je čerpán do olejového okruhu motoru. HAJOT Duplex II se používal zejména pro těžké motory, kde jsou zapotřebí dvě mazací místa. Upevňovací oko má průměr 28,5 mm a upevňuje se přes šrouby se závitem 3/16 Whitworth. [1], [2]



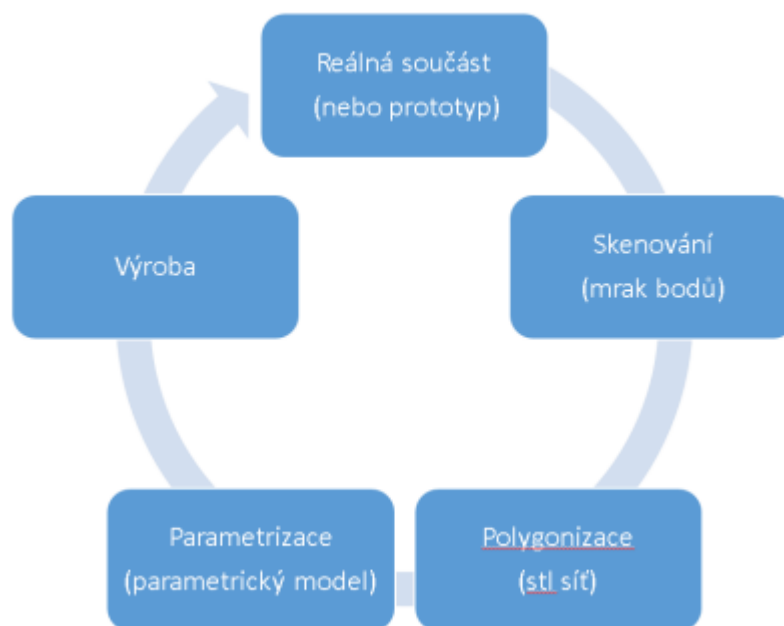
Obr. 4 - HAJOT - Duplexní čerpadlo (převzato z [2])



Obr. 5 - Průřez olejovým čerpadlem HAJOT Duplex II (převzato z [1])

## 4. Přehled metod reverzního inženýrství

Reverzní inženýrství dnes rozlišuje několik metod, které lze použít. Důležité však je zvážit všechny charakteristiky těchto metod a vyhodnotit, která z nich bude nejen nejpřesnější na provedení, ale zároveň také nejekonomičtější z pohledu potřebného času na provedení a také nutné energie pro realizaci měření a vytvoření CAD modelu.



Obr. 6 - Postup reverzního inženýrství (převzato z [3])



## 4.1. Měření na CMM

CMM (coordinate measuring machine) neboli souřadnicové stroje jsou v oblasti metrologie jednou z nejdůležitějších technologií, kterou dnes používá značná část velkých výrobců ve strojním průmyslu. Konstrukce těchto strojů vznikla kvůli potřebě přesného měření velmi složitých součástí v letectví a automobilismu, dají se jimi velmi přesně měřit například celé bloky motorů, zahnuté plechy či jiné díly, které byly vyrobeny na NC strojích a geometricky jsou složité pro běžné měřicí prostředky. Výhodou těchto strojů je plná automatizace a také schopnost vyhodnocení výsledků měření, dokáží tedy kontrolovat požadované tolerance dílů. [4]

Měření na těchto strojích probíhá následujícím způsobem. Nejdříve si obsluha vhodně určí základní, respektive nulový bod v prostoru měřicího rozsahu stroje a tím si určí i souřadnicový systém os X, Y, Z. Body součásti, která se též nachází na měřicím stole v pracovním rozsahu stroje, extrahuje stroj poté právě ve zmíněných osách. Oproti konvenčním metodám je tato možnost velkou výhodou. [4]

Dojde k takzvané transformaci souřadnic, kdy souřadnice geometrických prvků součásti jsou transformovány do souřadnicového systému CMM stroje. Body těchto geometrických prvků jsou extrahovány pomocí dotykové sensoriky či optické nedotykové sensoriky. Hlavní měření provádí měřicí hlava, která vysílá elektrický signál právě v okamžiku, kdy dojde k vychýlení klidové polohy měřicího doteku, či extrahuje body bezdotykově, tedy opticky přímo ze součásti. [4]

**BEZDOTYKOVÉ SYSTÉMY** – Tyto systémy se spíše používají pro měřicí mikroskopy, které pracují v dané rovině. Pro CMM se využívají laserové měřicí hlavy, pneumatické snímače či řádkové kamery. Dají se dobře využít pro složité tvary, ke kterým by dotykovou sensorikou byl velmi nesnadný přístup. [4]

**DOTYKOVÉ (KONTAKTNÍ) SYSTÉMY** – Při tomto měření dochází k velkým chybám měření. Obsluha má k dispozici počítač, který na její povel zaznamená souřadnice ve chvíli doteku. Není zajištěná konstantní síla měření. Tvary sensoriky jsou buďto kužel, nebo koule. Dotykové systémy se dále dělí na systémy „spínacího typu“ a „měřicího typu“. [4]



Obr. 8 - dotykový snímač SMAT pro snímací systém VES.  
(převzato z [7])



Obr. 7 - ZEISS LineScan (převzato a upraveno z [8])

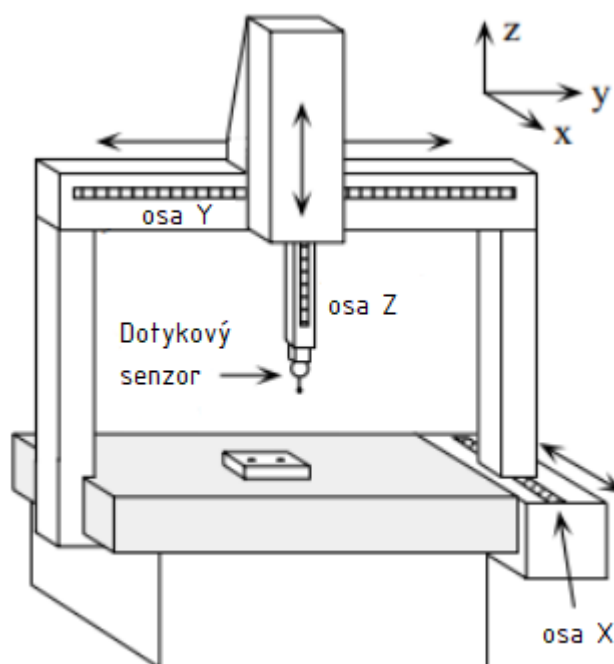
## Měření na CMM strojích

Při použití CMM k měření dochází k získávání potřebných parametrů nepřímo z naměřených pravouhlých (polárních či válcových) souřadnic v dané rovině či prostoru, to vše za využití analytické geometrie. [4]

Začíná se vždy přípravou plánu průběhu měření, tento plán musí samozřejmě obsahovat také patřičnou dokumentaci, veškeré přípravy pro upínání na měřicím stole a další. Je tedy třeba nejdříve vyhradit si velké množství času pro analýzu dílu a celkovou přípravu před měřením. Tento plán musí celkově obsahovat strategii měření, ze které musí být naprosto jasné požadavky na přesnost, a dále se hledá nejlepší řešení k dosažení těchto přesností. [4]

CMM jsou v oblasti měření ve velké míře flexibilní, dělají se různé typy konstrukce strojů, které jsou schopny měřit od velmi malých a krátkých dílů až po velké a dlouhé díly. Z těchto typů konstrukcí lze jmenovat například stojanový, mostový nebo portálový typ, kde mostový typ je využíván pro největší rozsahy (v ose X až 24 m). [4]





Obr. 9 - Sketch of a Typical CMM (Singhose and Seering 1995) (převzato a upraveno z [11])

## 4.2. Počítačová tomografie

Počítačová tomografie se v posledních letech začala používat jako alternativa souřadnicových optických 3D měřicích přístrojů v oblasti průmyslové metrologie. Tato metoda, respektive CT metoda (computer tomograph method), je průmyslově použitelná od roku 2005, kdy byl na veletrhu Control Fair v Německu představen první jednoúčelový dimenzovací CT skener. [9]

Výhodou této technologie v oblasti metrologie a hlavně v oblasti reverzního inženýrství je fakt, že tato technologie je jediná na světě, která dnes na zkoumané součásti dokáže měřit geometrii jak vnější, tak vnitřní. Stává se ideálním řešením pro uživatele, kteří chtějí zkoumat nejen povrchové či vnější vady, ale také vnitřní nedostatky měřených dílů. Velmi se hodí pro měření součástí, které se skládají z více materiálů, protože tyto součásti dokáže analyzovat bez jakéhokoliv poškození či porušení součásti. [9]

Jak již bylo řečeno, CT skenování patří mezi moderní nedestruktivní metody průmyslového měření. Nejvíce se tato metoda používá pro měření rozměrů geometrických prvků součástí, ale také k průmyslové inspekci, resp. celkové jakosti nejen rozměrů, ale také povrchu součásti a struktury materiálu. Velice efektivní je také v konkurenčních bojích, kdy je třeba zkoumat kvalitu a strukturu výrobků konkurenčních společností. Rentgenka, která vytváří zdroj rentgenového záření, dokáže tento zdroj vytvořit téměř bodový a toto záření poté nechává procházet měřenou součástí. Na rentgenový detektor se poté dostane část záření. Velikost tohoto záření je





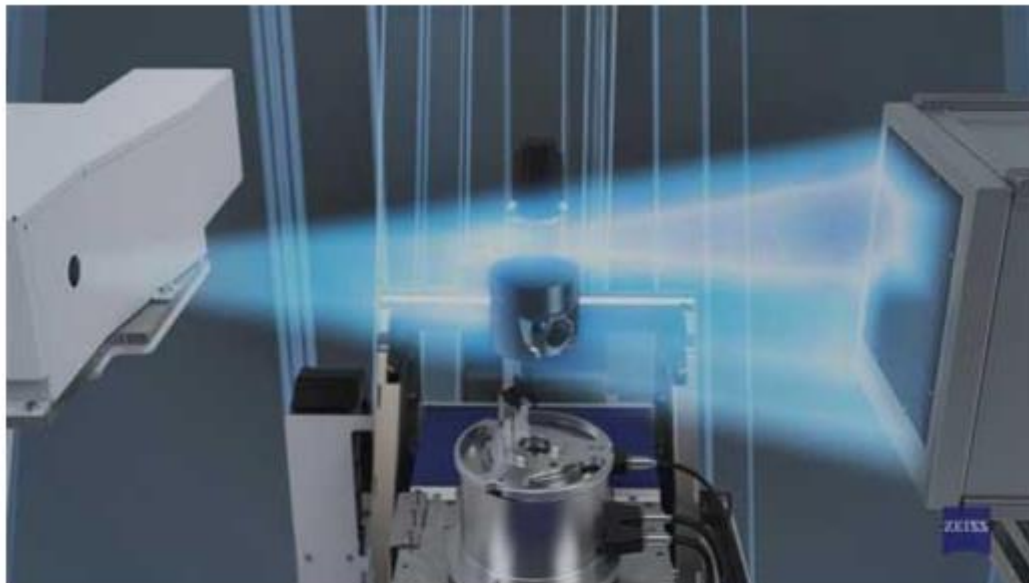
závislá na absorpci materiálu a složitosti součásti. Ze záření, které se na detektor dostalo, se poté pomocí výpočetní techniky zpracovává obraz. Velmi důležité je sledovat, jakou dráhu musí urazit paprsek, který dílem prochází: čím delší totiž tato dráha je, tím méně záření poté dopadá na detektor, tento fakt tedy velice ovlivňuje i výsledný obraz. Kolik záření materiál absorbuje, je přímo úměrné zvyšování atomového čísla daného prvku, ze kterého je součást vyrobená, tedy je ovlivněna i potřeba výkonu rentgenky (například pro měření plastu je zapotřebí méně výkonu rentgenky než pro železo). [9]

## Využití CT scanneru

Maximální velikost měřeného dílce je limitována velikostí a možnostmi tomografu. CT metodu je velice vhodné využít pro měření materiálů jako je plast, hliník a jiné lehké slitiny. Velice důležitým limitním faktorem této metody je její nepřesnost, i když totiž zvětšujeme výkon rentgenky, stále se přesnost měření nedá srovnávat s měřením dotykovou sensorikou na CMM zařízeních. [9]



Obr. 10 - Měření dílce s použitím doplňkového dotykového senzoru (převzato z [9])



Obr. 11 - Vizuální model prozařování měřeného dílce (převzato z [9])

## Tvorba třetího rozměru a rekonstrukce snímku

Okamžitě poté, co dopadne záření na detektor, se vytvoří 2D snímek za pomoci výpočetní techniky. Tento snímek má digitální podobu, tedy je možné jeho kvalitu i dále vyhodnocovat. Princip vytvoření třetího rozměru je postaven na postupném otáčení měřeného dílu. Po upevnění dílu na rotační stůl do pozice mezi detektor a zdroj záření začnou, tedy zdroj a detektor, vytvářet od několika set až po tisíce 2D snímků součásti. Tyto snímky díky rotaci stolu zachycují pohled na součást v 360 stupních. Poté se zvolí vhodná matematická metoda, kterou použije software, aby z těchto informací (2D snímků) vytvořil objemový model. [9]

	130 kV	150 kV	190 kV	225 kV	450 kV
Ocel / keramika	až do 5 mm	až do 8 mm	až do 25 mm	až do 40 mm	až do 70 mm
Hliník	až do 30 mm	až do 50 mm	až do 90 mm	až do 150 mm	až do 250 mm
Plast	až do 90 mm	až do 130 mm	až do 200 mm	až do 250 mm	až do 450 mm

Plastové konektory  
 Kryty mobilních telefonů  
 Zubní implantáty

Vsazené konektory  
 Kryty čerpadel  
 Titanové implantáty

Písty motorů  
 Elektro motory  
 Vstříkovací trysky

Brusné kotouče  
 Vrtáky  
 Zirkonové implantáty

Bloky motorů  
 Přístrojové desky  
 Lopatky turbín

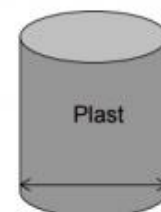
Ocel a  
 keramika



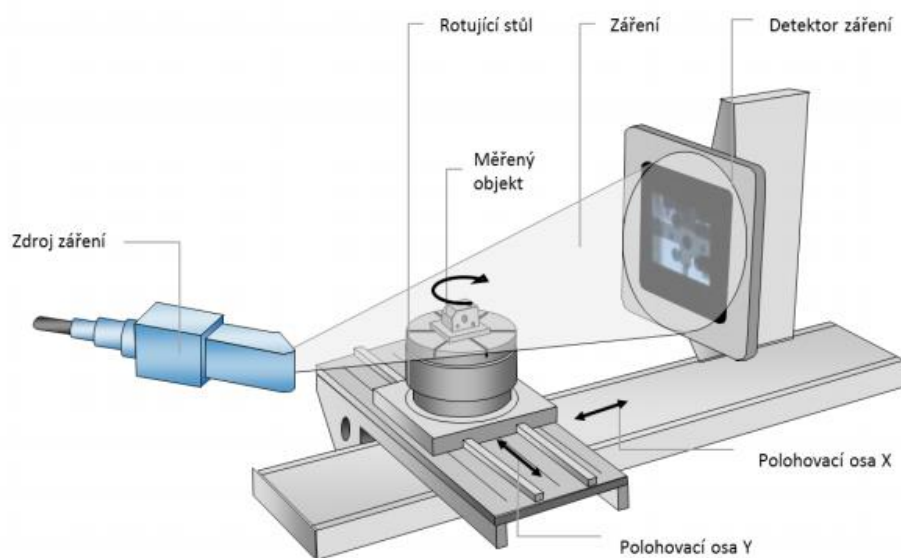
Hliník



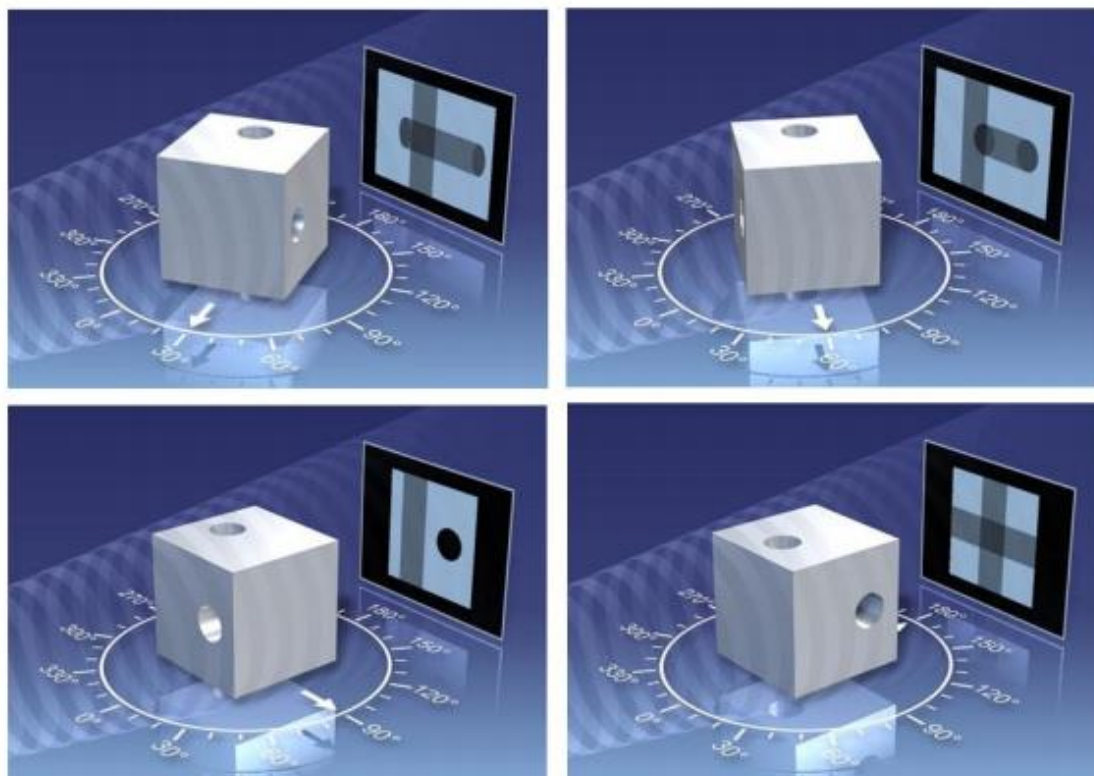
Plast



Obr. 12 - Souvislost mezi napětím, velikostí dílce a materiálem dílce (převzato z [9])



Obr. 13 - Vizuální návrh konstrukce počítačového tomografu (převzato a upraveno z [9])



Obr. 14 - Zachycení měřeného dílce ve 360° (převzato z [9])

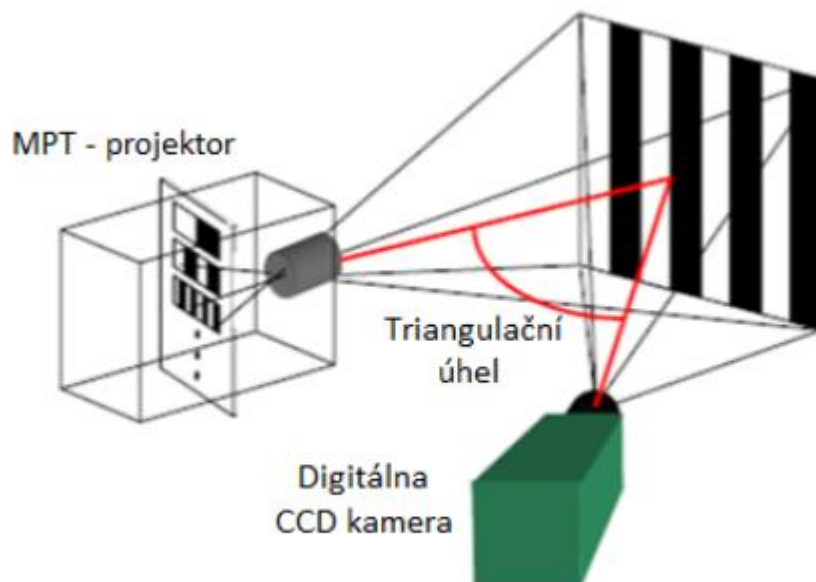


### 4.3. Pruhová projekce

Měření pomocí pruhové projekce pracuje na principu 3D aktivní triangulační metody. Používané měřicí zařízení se nazývá pruhový projektor. Toto zařízení promítá proužky světla na snímáný objekt a poté tyto proužky zaznamenává pomocí digitálních kamer. Lze použít také digitální fotoaparát, který zaznamená díl ve 2D obraze, ten je následně převeden na 3D podobu. [13]

Objekt je postupně snímán z několika různých úhlů. Pro ulehčení a urychlení sestavení 3D modelu se na objekt nalepí pomocné značky. Jedná se hlavně o přesnost, pomocí těchto značek totiž systém vyhodnotí pozici kamer a následně je schopen velice přesně sestavit 3D model. Důležitý úkol, který je třeba zajistit, je kontrastní pozadí se snímaným objektem. Pokud se tento úkon nezajistí, může dojít ke špatnému odlišení objektu od prostředí a následnému zkreslení modelu. [13], [11]

Dalším důležitým faktorem je lesklost povrchu snímaného dílce, či jeho průsvitnost. Pokud je povrch moc lesklý nebo naopak moc tmavý, je důležité ho správným způsobem nasvítit. Při přílišné průsvitnosti dílu se používá křídový sprej, který tento faktor eliminuje. [13], [11]



Obr. 15 - Princip promítání pruhů (převzato z [12])



Metoda, dle které jsou promítány světelné proužky na skenovaný objekt, se jinak nazývá také „Fringe Light Protection“. Objekt je snímán jednou či dvěma kamerami, které jsou od sebe vzájemně posunuty o definovanou vzdálenost a svírají spolu úhel definovaný konstrukcí zařízení. Tato konstrukce umožňuje získat několik obrazů z různých úhlů. Poté se díky digitálnímu zpracování s určenou přesností vypočítá poloha každého obrazového bodu. Následně podle úhlů, které mezi sebou svírají paprsky, jsou dopočítány i třetí souřadnice těchto bodů. Tím vzniká model ve 3D prostoru. Co největší rozlišení se zajišťuje postupným promítáním různých vzorů na povrch. [13], [11]

## 4.4. Fotogrammetrie

Jedná se o bezkontaktní metodu, která se zařazuje mezi 3D pasivní měřicí metody. Tato metoda pracuje na principu „lidských očí“. Fotogrammetrie zajišťuje rekonstrukci tvarů, měření různých rozměrů (které by běžnými způsoby bylo jen velmi obtížné změřit) a v neposlední řadě slouží také k určení polohy zkoumaného objektu, to vše zobrazené na fotografických snímcích. [13]

Praktická fotogrammetrie rozděluje tři různé metody následujícím způsobem:

- univerzální
- kombinované
- integrované

Hlavním principem fotogrammetrie je snímání objektů, pořídí se dva nebo více snímků zkoumané součásti, tyto snímky musí být pořízeny z různých směrů, na jejich základě se poté určují prostorové souřadnice bodů, které se na těchto fotografiích vyskytují. [13]



Obr. 16 - ZEISS COMET 6 (převzato z [14])





Obrovskou výhodou této metody je fakt, že je rychlá, levná a zároveň přesná jako mechanická měřicí zařízení. [13]

Měřicí sestava, která se používá pro metodu fotogrammetrie, je následující:

- notebook
- digitální kamery
- nalepovací značky
- kalibrační tyč



Obr. 17 - Zařízení TripTop (převzato z [12])



Postup měření touto metodou je následující: Obsluha aparátu se pohybuje v kruzích kolem zkoumaného objektu a pořizuje snímky fotoaparátem. Tyto fotografie se následně nahrají do počítače, který za pomoci softwaru začne vyhledávat společné prvky na různých fotografiích, poté pomocí vyhodnocených úhlů dopočítává konkrétní body v prostoru, spojením těchto bodů pomocí softwaru poté dostáváme 3D model. Během měření je nutné nepohybovat s měřenou součástí, ale zároveň ani s pozadím, pokud by došlo k jejich přemístění, mohlo by to zásadně ovlivnit výsledky měření. Přesnost měření také velice závisí na rozlišení fotoaparátu, teoreticky by stačil i fotoaparát mobilního telefonu, rozhodně přesnější měření však vznikne při použití zrcadlového fotoaparátu či podobného optického zařízení s vysokým rozlišením. [15]

## 4.5. White Light Scanning

Jedná se o další bezkontaktní měřicí metodu, respektive 3D digitalizační technologii, která pomocí optického systému dokáže měřit různé fyzikální prvky zkoumaného objektu. Jde o jednu z nejpřesnějších metod měření rozměrů objektu a následné vykreslení jeho 3D modelu. White Light Scannery používají více metod měření, jako jsou například analýza frekvenční oblasti, okrajový kontrast či Fourierova analýza. Tato metoda využívá zobrazovací interferometry pro měření rozdílu optické dráhy. [17]



Proces měření spočívá v posílání vícero světelných paprsků na povrch objektu, jakmile světla dopadnou na povrch součásti, vzájemně se vyruší. Skener pomocí kamer, které spolu vzájemně svírají daný úhel, zkoumá rozdíl, který mezi světly vzniká, na základě tohoto rozdílu poté dopočítává digitální souřadnice modelu. [16]

Během měření se porovnávají miliony bodů, díky tomu je metoda jedna z nejpřesnějších v současném průmyslu. Výstupem měření je 3D model, který se následně upraví a může být použitý v CAD systému. [16]

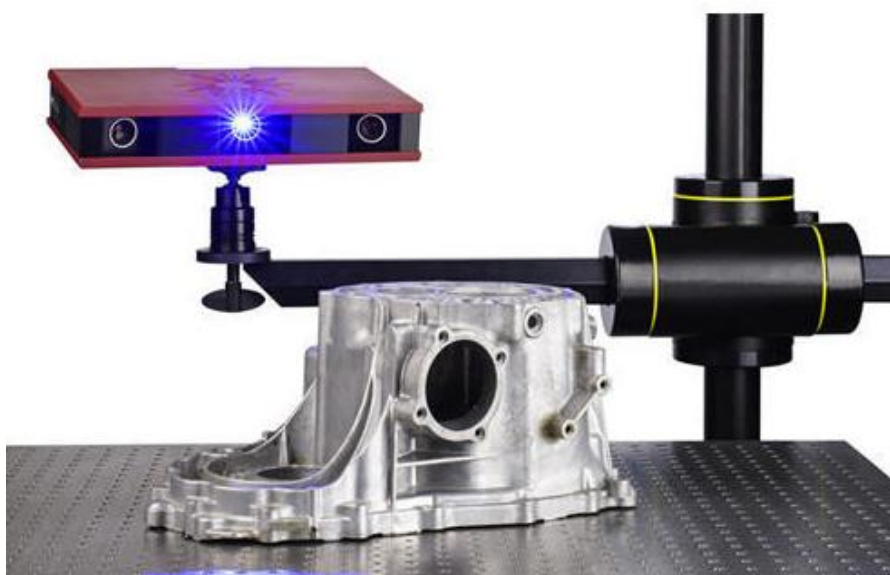
Optimální velikost měřených dílů je v rozmezí desítek až stovek milimetrů, metodu však lze použít i na menší či větší díly. Během měření však může dojít k potížím, například v zajištění tuhosti upnutí dílu či zajištění dostatečného manipulačního prostoru kolem zkoumaného dílu, pokud se jedná o rozměrnou součást. [17]

### VÝHODY MĚŘENÍ:

- minimální doba seřízení přístroje oproti ostatním metodám
- bezkontaktní měření (součást nemůže být nijak porušena měřením)
- velmi rychlé měření
- velmi malé vzdálenosti mezi extrahovanými body (vysoká přesnost)

[18]

Při využití Fourierovy analýzy dochází k vytváření velmi přesné topografické a povrchové mapy. [17]



Obr. 18 - 3D White Light Scanner (převzato a upraveno z [17])



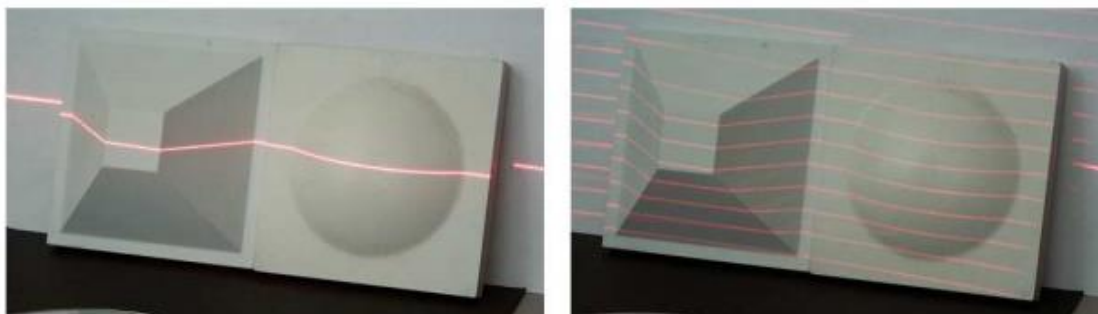
## 4.6. Laserscanning

Laserscanning je další ze způsobů měření, který využívá princip triangulace. Tuto metodu řadíme mezi aktivní metody digitalizace. Laserscannery pracují na podobném principu jako sonar, který také využívá principu laserového paprsku. Měřicí sestava obsahuje dvě hlavní části, zdroj laserového paprsku a optický detektor, tím je digitální kamera, která snímá deformované vzory na naskenované součástce. [13]

Laserscanner vysílá světlo, které je v podobě čáry, výjimkou však nejsou ani jiné složitější vzory, záleží na potřebě měření a konstrukci laserscanneru. [13]

Rozlišujeme dvě možnosti usměrnění paprsku laseru:

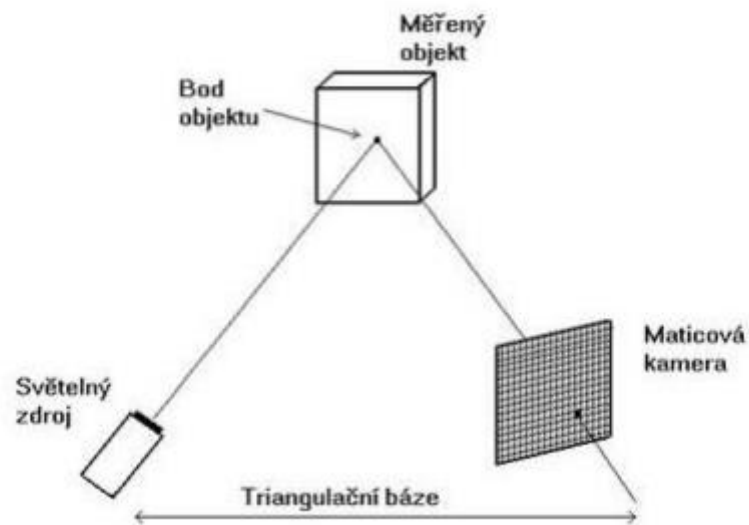
- jednou z možností je usměrnění paprsku zrcadly, poté je přijímaný CCD senzorem, poloha tohoto senzoru je vždy stejná jako poloha vysílacího zařízení, tato možnost platí pro jednokamerové skenery [13]
- druhá varianta je se dvěma snímači, kdy je ve středu položen vysílač a přijímače jsou na dvou protilehlých stranách, podobně jako u konstrukce white light scanneru [13]



Obr. 19 - Příklady laserového skenování (převzato a upraveno z [13])

Princip aktivní triangulace je znázorněný na obrázku 18, lze vidět zdroj světla, měřený objekt a maticovou kameru, které mezi sebou vytváří triangulační trojúhelník. Vzdálenost mezi maticovou kamerou a zdrojem světla je vždy konstantní, je dána konstrukcí měřicího zařízení, protože tyto dva prvky jsou vždy v jednom celku. Úhel mezi základnou a zdrojem světla je neměnný, na straně maticové kamery se ovšem úhel mění v závislosti na vzdálenosti měřeného povrchu a snímacího senzoru. [19]





Obr. 20 - Triangulační trojúhelník pro 1D aktivní triangulaci (převzato z [19])

## VÝHODY MĚŘENÍ NA LASERSCANNERU

- nadprůměrná přesnost měřených prvků
- výborná obsluha sestavy, měření probíhá velmi rychle, pokud srovnáváme s optickými skenery
- schopnost nasnímat také neprůchozí otvory, prohlubiny či jiné složité měřitelné prvky
- není problém při skenování velkých těles, velmi dobrá manipulace se zařízením.

[13]

## NEVÝHODY MĚŘENÍ NA LASERSCANNERU

- v oblasti produktivity tato metoda zaostává za ostatními
- pořizovací cena skeneru je o dost vyšší ve srovnání s ostatními typy skenerů
- velmi obtížné skenování lesklých a průsvitných objektů

[13]

Příklad laserscanneru v podobě měřicího ramene je znázorněn na obrázku 20. Lze rozpoznat tři pohybové klouby, upínací část a na konci ramene měřicí část se snímací sensorikou. Pohyb ramene je ovládán obsluhou pouhým uchopením koncové části za příslušné madlo, rameno se přizpůsobuje pohybu obsluhy.



Obr. 21 - bras de mesure 3D articulé - MCAx series (převzato a upraveno z [20])

## 4.7. Posouzení vhodnosti metod

Po konzultaci s odborným dozorem na ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie vyšla jako nejlépe použitelná metoda laserscanning. Pokud metodu porovnáme s ostatními, je nejproduktivnější, extrahování dat zabere nejméně času. Například metoda CT by zabrala několik hodin, kdežto laserscanner cca 30 minut. Je také zapotřebí vzít v úvahu, že analýza povrchového scannu je jednodušší než analýza objemového. Jde hlavně o velikost dat, pokud bychom totiž chtěli analyzovat objemový scan a prováděli na něm výpočty na počítači, zabraly by hodně času, protože by počítač musel analyzovat mnohem více dat. Oproti pruhové projekci má navíc laserscanner přesnější data. Z pohledu dostupnosti byla tato metoda v době provádění měření nejpříjemnější, jelikož se v laboratořích nacházelo jedno skenovací rameno. Z pohledu přesnosti je tato metoda naprosto dostačující.

Metody CMM lze vyřadit, jelikož k nastavení a programování měření by bylo zapotřebí mnoho času. Ostatní metody bylo možné použít, avšak v dané době byly vytíženy pro jiná měření.



## 5. Postup měření

### 5.1. Rozložení pracovního místa

Pro měření bylo použito rameno MCAx30 a scanner LS H120 od společnosti Nikon Metrology, který při šířce paprsku 50 mm pracuje s přesností 10  $\mu\text{m}$ , při zapojení ramene však vlivem dynamických účinků soustavy stoupne nepřesnost. Pro uchycení dílu bylo použito speciální upínací zařízení, které zajišťovalo dostatečnou tuhost, měření tedy bylo přesné. Důležité bylo správné umístění ramene vůči stolu tak, aby se dále nemuselo hýbat s žádnou částí měřicí soustavy pro zajištění maximální přesnosti.



Obr. 22 - Skener Nikon Modelmaker H120



Obr. 24 - Pozice ramene vůči stolu 1



Obr. 23 - Pozice ramene vůči stolu 2

Výrobek byl upnutý v pracovním prostoru ramene a následně změřen. Podstava ramene byla dostatečně zpevněna pomocí vzpěr, aby nedocházelo k vibracím a dalším nežádoucím účinkům, které by mohly ovlivnit měření. Vzhledem k bezkontaktní metodě měření jsem si mohl dovolit součást měřit na „běžném stole“. Rameno bylo propojeno s počítačem, který pomocí softwaru Focus ver. 11 od společnosti Nikon. Sw skládal mraky bodů, které byly extrahovány ze součásti pomocí scanneru.

## 5.2. Upnutí výrobku do upínky

Upnutí bylo zvoleno s ohledem na fakt, že vždy jedna strana při jednom úkonu skenování nemůže být naskenována. Byly tedy zvoleny dvě strany výrobku, za které byl upnut do upínky, které leží proti sobě tak, aby se povedlo naskenovat všechny geometrické prvky povrchu.



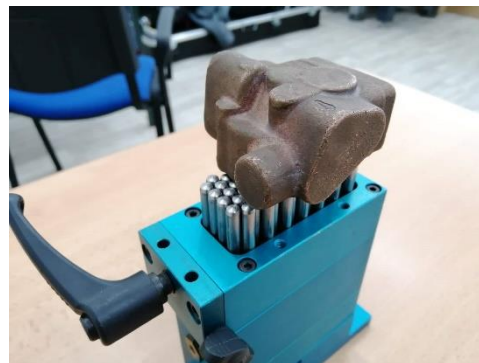
Obr. 26 - Upnutí 1 – pohled 1



Obr. 25 - Upnutí 1 – pohled 2



Obr. 28 - Upnutí 2 – pohled 1



Obr. 27 - Upnutí 2 – pohled 2

Nejdůležitější bylo zvolit upnutí tak, aby se podařilo dostatečně naskenovat dutiny, které na výrobku jsou, nejsložitější tedy byla komora na spodní části čerpadla.



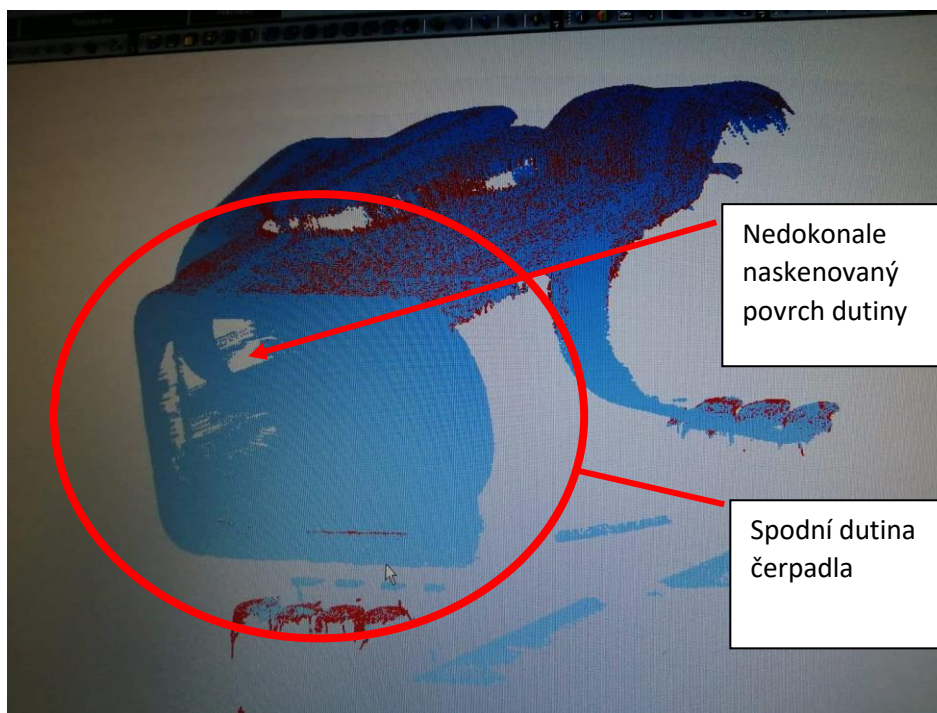
Obr. 29 - Komora na spodní části čerpadla

Upnutí bylo před měřením několikrát upraveno, dokud nebyla zajištěna dostatečná tuhost a viditelnost celé součásti ze dvou upnutí.

### 5.3. Skenování

Nejdříve bylo provedeno zkušební měření pro zaučení se v práci s ramenem, z tohoto měření nebyl vybrán žádný výstup. Následovalo měření, které se nezdařilo a bylo nutné jej opakovat: během procesu skenování totiž bylo hnuto s upínacím zařízením, a tím pro nás veškerá data, která byla extrahována do té doby, ztratila hodnotu, protože body, které bychom extrahovali dále, by měly jiný souřadný systém. Následující měření se již podařilo. Při měření vždy bylo potřeba skenovat jen po částech, aby bylo možné poznat, jaké části ještě chybí. Extrahované body se neprodleně po ukončení úkonu skenování objevovaly v softwaru na obrazovce počítače připojeného ke skeneru, tím tedy bylo možné průběžně kontrolovat, jaké části výrobku jsou již zaznamenány.





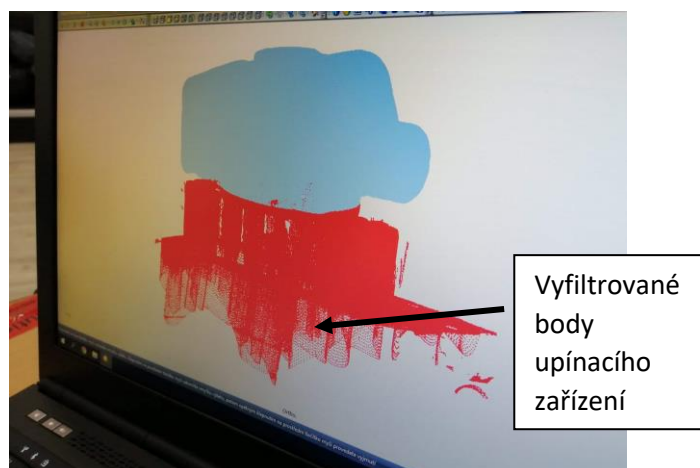
Obr. 30 - Neúspěšný pokus měření - nedokonalosti

Na obrázku 29 je zaznamenány průběh nepovedeného měření. Obrázek názorně demonstruje, jak je obtížné řádně naskenovat všechny plochy hlavně v dutinách výrobku. Lze rozpoznat, že zatímco z vnějších hran spodní dutiny čerpadla se povedlo extrahovat body bez problémů, z vnitřních ploch této dutiny byla extrakce o moc obtížnější.

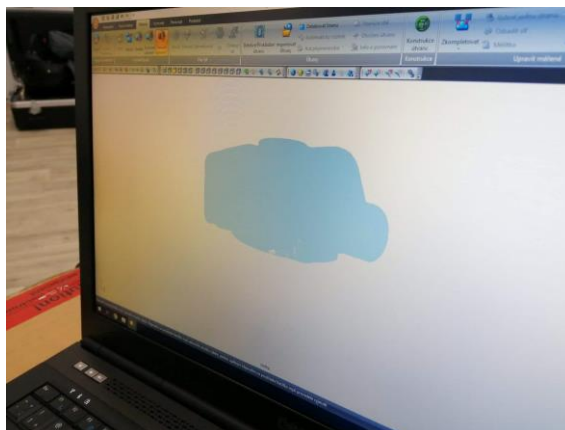
## 6. Zpracování dat

### 6.1. Filtrace dat

Během úspěšného měření byl zaznamenán celý objekt na dvě upnutí. V průběhu skenování došlo také k extrahování bodů z upínacího zařízení. Tyto body bylo nutné vyfiltrovat a odstranit.



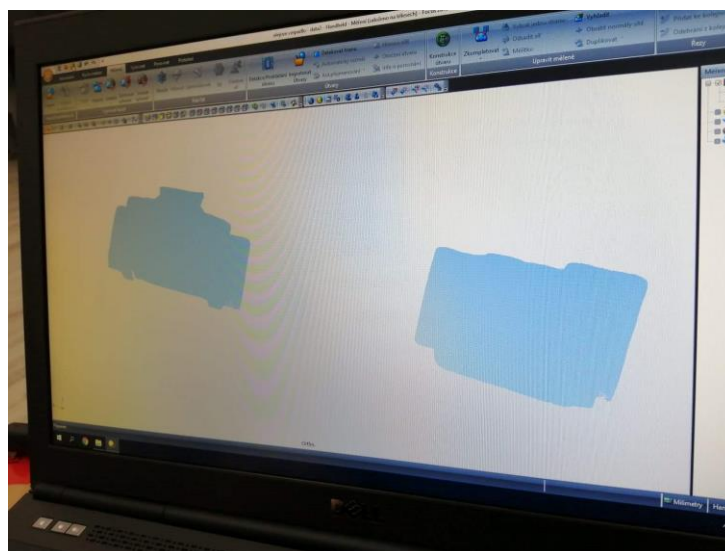
Obr. 31 - Vyfiltrované body upínacího zařízení



Obr. 32 - Mrak bodů prvního upnutí bez bodů upínacího zařízení

## 6.2. Spojení mraků

Výstupem měření tedy byly dva mraky bodů, od sebe vzdálené o dostatečnou délku, v jednom souboru stl., které vznikly právě kvůli dvěma upnutím výrobku. Při skenování druhého upnutí bylo zapotřebí umístit výrobek dostatečně daleko od původní pozice v rámci pracovního prostoru ramene. Pokud bychom toto neprovedli, došlo by k pomíchání bodů z prvního a druhého upnutí, výstup by tedy byl naprosto nepoužitelný a měření by se muselo opakovat.



Obr. 33 - Mraky bodů obou upnutí v jednom souboru

Tyto dva mraky bylo nutné spojit tak, aby data z obou upnutí měla stejný souřadný systém, a tím výsledná stereolitografická síť, která byla vytvořena metodou triangulace z mraku bodů, tvořila celistvý trojúhelníkový model. Toto bylo provedeno taktéž v softwaru Focus ver. 11 od společnosti Nikon. Následujícím krokem bude exportování STL sítě ze sw Focus a importování této sítě do sw Rhinoceros pro následné operace reverzního inženýrství.



## 6.3. Tvorba parametrického modelu

Na obrázku 34 je znázorněna stereolitografická síť importována do softwaru Rhinoceros. STL síť nebyla použitelná pro tvorbu výkresové dokumentace a nelze ji přímo použít pro generování CAD modelu. Bylo třeba nejdříve vytvořit NURBS reprezentaci povrchu, ze které je následně generován parametrický model. Pro tento účel jsme využili dvou počítačových sw, o kterých se konkrétněji zmiňuji v této kapitole.



Obr. 34 - Renderovaný mrak bodů v softwaru Rhinoceros



Obr. 35 - Povrch renderovaného mraku bodů

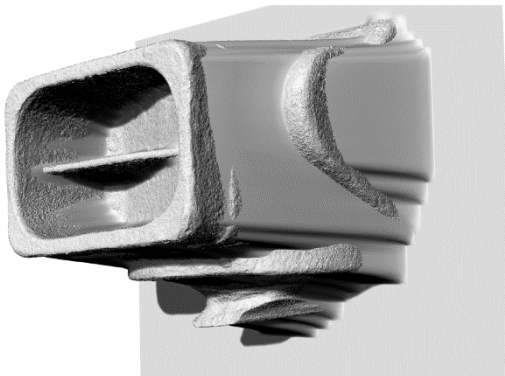
Renderováním mraku bodů (metoda triangulace z mraku bodů) vznikne model tvořený velkým množstvím trojúhelníkových ploch, které jsou mezi sebou propojené, ovšem tyto plochy jsou pro tvorbu CAD modelu nepoužitelné, jak zmiňuji v textu výše. Na obrázku 35 je znázorněný přibližný pohled na povrch renderovaného mraku bodů.





### 6.3.1. Funkce drapérie sw Rhinoceros

Parametrický model by bylo možné vytvořit v softwaru Rhinoceros pomocí funkce „drapérie“. V principu se jedná o funkci, která na model z jedné roviny spustí „pomyslné plátno“, které kompletně pokryje plochy renderovaného mraku bodů. Z velkého množství trojúhelníkových ploch tedy vytvoří celistvé parametrické plochy.



Obr. 37 - Spuštěná drapérie na renderovaný mrak bodů



Obr. 36 - Vzniklé parametrické plochy pomocí drapérie

Na obrázku 37 je znázorněna drapérie spuštěna na renderovaný mrak bodů, na obrázku 36 poté pouze drapérie po odstranění mraku bodů. Je viditelné, že po využití této funkce se vytvořily celistvé parametrické plochy, které nahradily původní trojúhelníkové. Pokud by se model měl zpracovat touto metodou, bylo by zapotřebí zdoluhavého procesu. Mrak bodů by se nejdříve musel zarovnat do určité roviny pro vyhlazení drapérie. Kvůli vysoké komplikovanosti geometrie součásti by bylo zapotřebí vytvořit více řezů z různých pohledů a na všechny spustit drapérii, poté tyto pohledy ořezat, následně spojit a tyto spojení vyhladit.

Po spojení všech těchto drapérií bychom dostali celkový model součásti. Následně by bylo zapotřebí tento model zpracovat v CAD softwaru, tzn. pomocí vzniklých parametrických rovin vytvořit objemový CAD model.

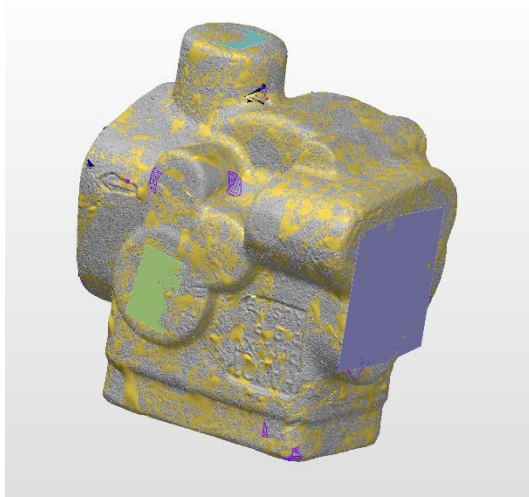
Od této metody bylo nakonec upuštěno vzhledem k velké kapacitě času, která by byla na tuto metodu nutná, a také k nedostatečným znalostem autora ohledně softwaru Rhinoceros.

### 6.3.2. Metoda NURBS ploch v softwaru Polyworks

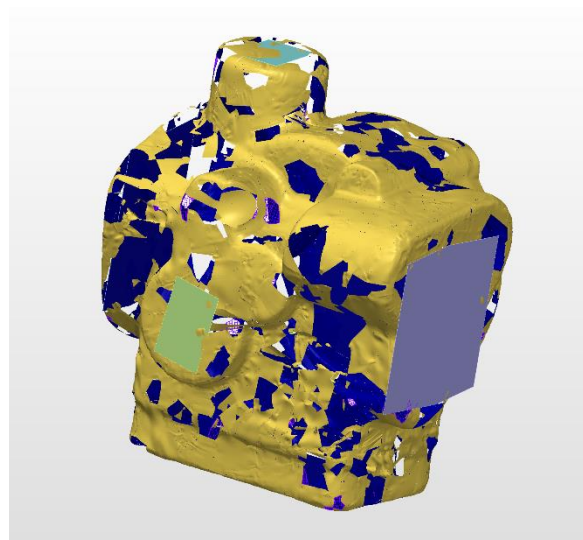
Jedná se o metodu, ve které využíváme funkci NURBS ploch v softwaru Polyworks. Jde o funkci, která proloží NURBS plochy mezi jednotlivými body povrchu renderovaného mraku bodů a vytvoří pomocí těchto ploch záplaty v místech, kde chybí materiál. Tím dojde také k vyhlazení povrchu součásti. Tyto záplaty následně lze uložit již jako soubor ve formátu „step“, tedy jej lze poté otevřít v CAD softwaru a záplaty použít pro tvorbu výsledného CAD modelu.



Výhodou této metody je fakt, že není zapotřebí tvořit řezy součásti či jiné úkony, které by proces prodlužovaly. NURBS plochy (záplaty) software vytvoří sám, stačí pouze označit renderovaný mrak bodů a zadat tuto funkci počítači pro výpočet.



Obr. 39 - Záplaty na renderovaném mraku bodů



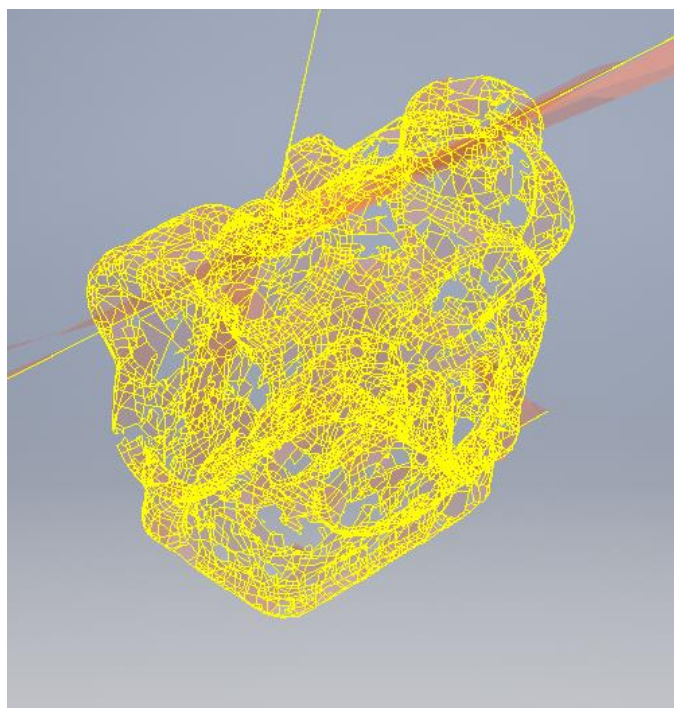
Obr. 38 - Záplaty již po odstranění mraku bodů

Nevýhodou této metody je její nepřesnost (vůči metodě s tvorbou pomocných řezů), bylo by zapotřebí o mnoho víc času a získat větší přehled o funkcích softwaru Polyworks pro maximální snížení nepřesností. Proto následující popis je pouze názorná ukázka celkového postupu vyhodnocení dat z tohoto softwaru. Výstupní model však není dostatečně přesný pro tvorbu výkresové dokumentace či plánování výroby.

Na obrázku 38 jsou vidět již jen záplaty po odstranění mraku bodů. Také byly vytvořeny pomocné plochy detekováním a proložením geometrického elementu rovina z mraku bodů. Tyto roviny mají během exportu stejný souřadný systém jako STL síť i jako vygenerované NURBS záplaty, tudíž se v konstrukčním sw zobrazí na stejném místě. Roviny poslouží pro lepší možnost modelování v CAD softwaru, tyto roviny jsou též viditelné na obrázku 38.

## 6.4. Vytvoření CAD modelu

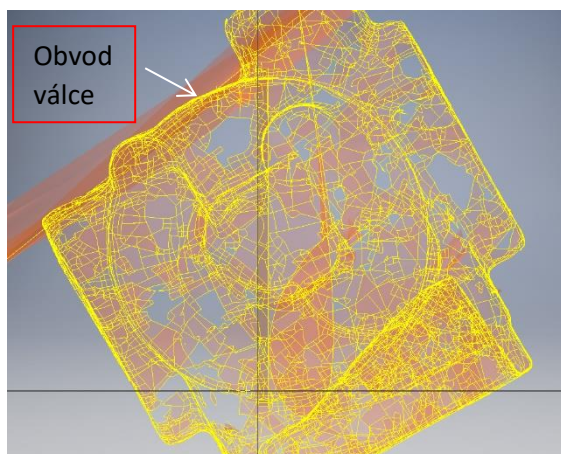
Pro vytvoření CAD modelu byl použit software Inventor Professional 2018 od společnosti Autodesk. Soubor step formátu se záplatami byl importován do pracovního prostředí tohoto softwaru. Pomocí vytvořených ploch již z předchozího bodu bylo možné vytvářet náčrty a z nich poté pomocí 3D modelovacích funkcí vytvářet různé geometrické prvky.



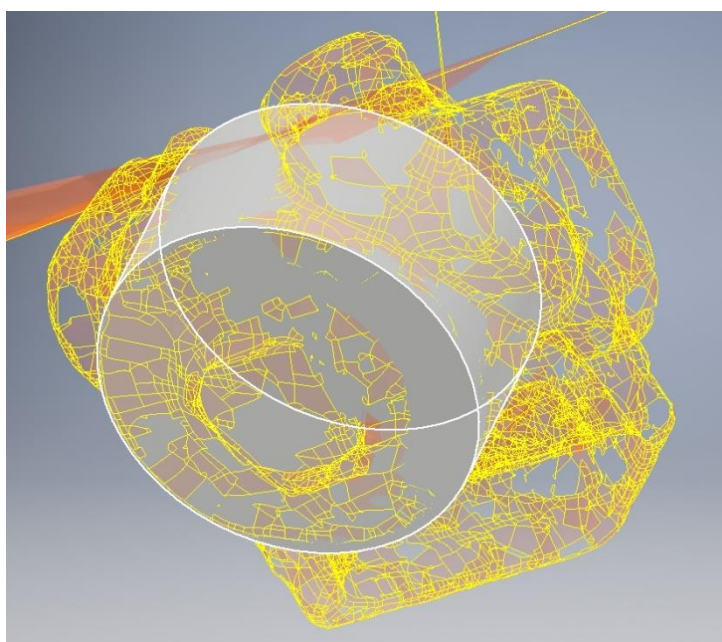
Obr. 40 - NURBS záplaty v pracovním prostředí Inventoru

Pomocí funkce promítnutí geometrie bylo možné si promítnout hrany či body, charakterizující jednotlivé geometrické prvky, do náčrtů. Tím tedy bylo možné stanovit i křivky, ze kterých poté vycházely 3D plochy. Toto je velice dobře znázorněno na obrázku 41 a 42. Na obrázku 41 vidíme promítnutí bodů do náčrtu, na obrázku 42 poté vytažení rotační plochy do prostoru. Tímto způsobem byl následně vytvořen celý model.

Nevýhodou modelování u těchto křivek je fakt, že neznáme normálový vektor, který určuje směr vytažení. Bylo tedy nutné si jej zvolit, tím samozřejmě značně klesla přesnost celého modelu.

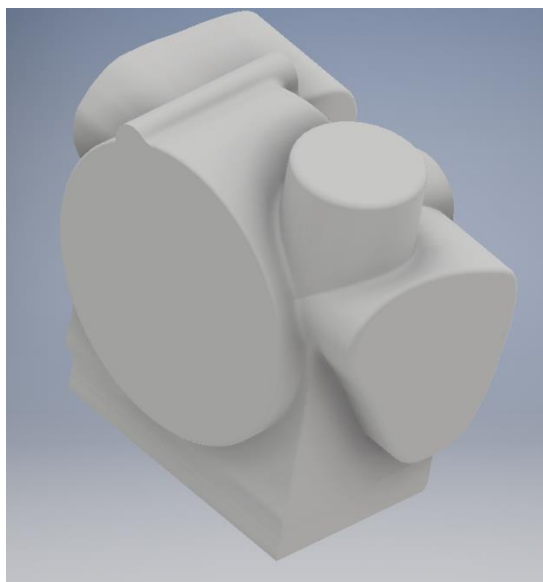


Obr. 41 - Zahájení náčrtu a promítnutí geometrie válce

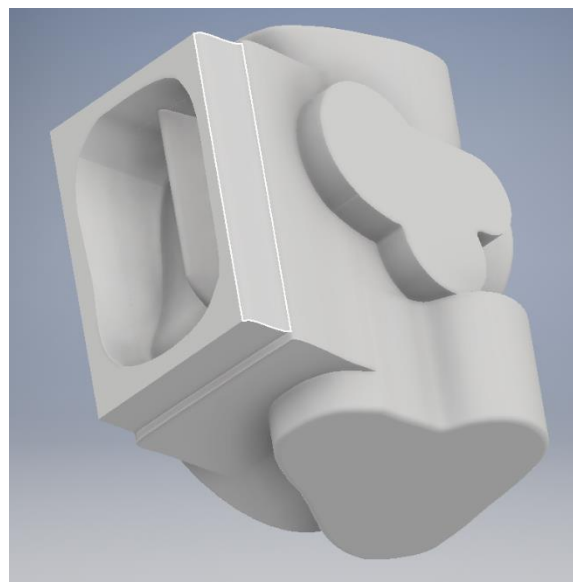


Obr. 42 - Vytažení rotační plochy do prostoru

Tímto způsobem bylo dále pokračováno pro zbytek geometrických prvků, dokud nebyl hotový celý model. Na obrázku 43 a 44 je znázorněna finální verze vytvořeného modelu



Obr. 43 - vytvořený model pomocí NURBS rovin 1



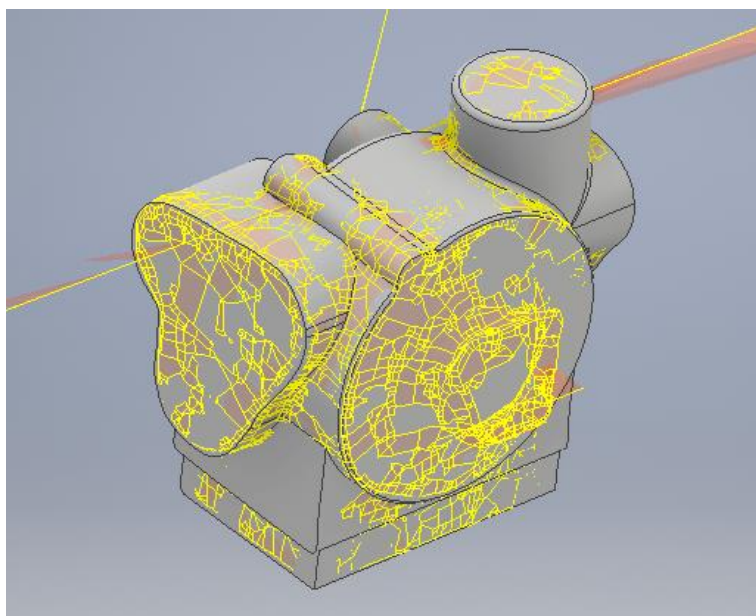
Obr. 44 - Vytvořený model pomocí NURBS rovin 2





## 7. Zhodnocení vytvořeného modelu

Vytvořený CAD model je naprosto dostačující, co se týká geometrie tvaru, avšak co se přesnosti týká, je tento model nedokonalý a nepoužitelný pro plánování výroby. Pro eliminaci nepřesností by bylo zapotřebí znát normálové vektory, tedy vektory, které určují směry. Po zobrazení NURBS záplat k modelu v Inventoru je viditelné, že model není přesný, v některých částech chybí materiál, to můžeme zjistit, pokud porovnáme zobrazení NURBS plošného modelu.



Obr. 45 - Porovnání NURBS záplat a CAD modelu



## Závěr

Náplní bakalářské práce bylo aplikovat metody reverzního inženýrství na součásti olejového čerpadla veteránu a pomocí těchto metod vytvořit parametrický model.

Výsledkem práce je CAD model vytvořený v softwaru Inventor pomocí dat, které byly extrahovány. Na základě zadání byly nejdříve popsány metody, které je možné pro danou součást v rámci reverzního inženýrství použít, následně tyto metody byly vyhodnoceny a byla vybrána ta nejpříjemnější pro daný problém, tedy metoda laserscanningu. Pomocí této metody byla extrahována data. Data byla v podobě dvou mraků bodů, jelikož se součást skenovala na dvě upnutí. Tyto dva mraky bodů byly vyfiltrovány a byla z nich smazána všechna nepotřebná data, např. body upínacího zařízení. Poté byly tyto dva mraky bodů spojeny a vytvořily tak celistvou reprezentaci součásti v prostoru. Zpracování této reprezentace bylo nejdříve prováděno pomocí softwaru Rhinoceros, následně však bylo zjištěno, že proces by byl příliš zdlouhavý, navíc autor práce nemá se softwarem dostatečné zkušenosti, proto bylo od metody upuštěno a zvolila se metoda automatického generování NURBS ploch pomocí softwaru Polyworks. Pomocí tohoto softwaru byly vytvořeny NURBS záplaty, které reprezentovaly celý renderovaný mrak bodů. Tyto záplaty jsme převedli na formát „step“ a následně importovali do CAD softwaru Inventor. V tomto systému byl ze záplat vytvořený CAD model čerpadla. Nakonec při zhodnocení kvality modelu bylo zjištěno, že jeho přesnost je neuspokojivá, ale metoda, která byla použita, je pro vypracování tohoto úkolu naprosto dostačující, proto při větší kapacitě času či více znalostí s výpočetními sw by výsledný model byl použitelný pro výrobní dokumentaci.



## LITERATURA

- [1] HAJOT- Ölpumpen [online]. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <http://oldtimerdaten.homepage.t-online.de/oldtimerdaten/Veteran/Oel/hajot1.html>
- [2] Lexikon III [online]. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: [http://www.bahnsporttechnik.de/body\\_lexikoniii.html](http://www.bahnsporttechnik.de/body_lexikoniii.html)
- [3] VYUŽITÍ SNÍMACÍHO SYSTÉMU LASERSCANNERU PRO APLIKACE REVERZNÍHO INŽENÝRSTVÍ. Praha, 2016. Magisterská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Beránek Libor.
- [4] TICHÁ, Šárka. STROJÍRENSKÁ METROLOGIE část 1 [online]. Ostrava, 2004 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>
- [5] Reisebericht Dolomiten 2009!: Der Gründer [online]. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: [http://www.standard-gutbrod.de/Die\\_Marke/Der\\_Grunder/der\\_grunder.html](http://www.standard-gutbrod.de/Die_Marke/Der_Grunder/der_grunder.html)
- [6] In: SOUŘADNICOVÉ MĚŘÍCÍ STROJE [online]. Katedra výrobních systémů a automatizace [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522>
- [7] ZEISS 3D Automation Webshop: Snímače s M5 [online]. [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: [https://world.probes.zeiss.com/cz/Snimace/Velikost-zavitu/Snimace-s%C2%A0M5/category-14/product-ARTIKEL\\_2421.html](https://world.probes.zeiss.com/cz/Snimace/Velikost-zavitu/Snimace-s%C2%A0M5/category-14/product-ARTIKEL_2421.html)
- [8] Industrial Metrology: Point Clouds at the Speed of Light [online]. [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/sensors/on-cmm/optical-sensors-cmm/linescan.html>
- [9] KREJZEK, Ladislav. Využití počítačové tomografie v rámci kontroly kvality ve strojírenském průmyslu. Praha, 2016. Bakalářská práce. ČVUT v Praze Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [10] Průmyslová metrologie: ZEISS CONTURA [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/bridge-type-cmms/contura.html>
- [11] PURKART, Martin. Využití souřadnicové měřicí techniky v oblasti kontroly kvality. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Strojní fakulta. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [12] Drilling Accuracy Lab Report [online]. 18/08/2017 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://sherrysellsseashells.com/drilling-accuracy-lab-report-3280/>
- [13] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: [http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/METROLOGIE\\_FINAL.pdf](http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/METROLOGIE_FINAL.pdf). Studijní opora. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [14] Pruhová projekce - Systémy COMET: COMET 6 [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://optotechnik.zeiss.com/cz/produkty/3d-skenovani/pruhova-projekce>
- [15] ZUZA, Mikolas. Fotogrammetrie – 3D skenování s použitím fotoaparátu či mobilu. Josef Průša [online]. 23.03.2018 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/fotogrammetrie-3d-skenovani-s-pouzitim-fotoaparatu-ci-mobilu/>
- [16] Applications 3D [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://applications3d.com/>





- [17] White Light Scanning [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/applications3d/white-light-scanning>
- [18] Indiamart [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/3d-white-light-scanner-12862597012.html>
- [19] Využití snímacího systému laser scanneru pro aplikace reverzního inženýrství. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [20] Direct Industry [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <http://www.directindustry.fr/prod/nikon-metrology/product-21023-438093.html>



## Seznam zkratk

NURBS	non-uniform rational basis spline
CAD	computer aided design
CMM	coordinate measuring machine
CT	computed tomography



## **Přílohy**

Přílohy této práce jsou vloženy do výtisku této bakalářské práce, protože se jedná o počítačová data (STL, STEP, atd.).