



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

REVERSE ENGINEERING DÍLU HISTORICKÉHO VOZU

REVERSE ENGINEERING OF A HISTORICAL CAR COMPONENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Bielený

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Tobiáš, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Tomáš Bielený**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Martin Tobiáš, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Reverse engineering dílu historického vozu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výrobci vozidel dodávají na trh veškeré náhradní díly na jimi vyráběná vozidla 20 let po ukončení prodeje daného modelu. Poté jsou zbylé skladové zásoby dílů postupně rozprodány, s klesajícím počtem těchto vozidel v provozu se také ztrácí ekonomická incentiva realizování druhovýroby. Provoz historických vozidel s sebou proto přináší problém dostupnosti některých klíčových náhradních dílů. S pomocí moderních metod pro reverse engineering a rapid prototyping, je možné realizovat jejich kusovou výrobu. Smyslem práce je využít tyto metody k vytvoření podkladů, pro případnou budoucí výrobu vybrané součásti historického vozu.

Cíle bakalářské práce:

Proveďte rešerši různých typů 3D skenerů. včetně popisu principu jejich funkce.

Zvolte díl historického vozu, popište jej a výběr zdůvodněte.

Naskenujte vybraný díl a vytvořte jeho 3D CAD model.

Vytvořte maketu vybraného dílu s pomocí 3D tisku.

Seznam doporučené literatury:

WANG, Wego. Reverse engineering: technology of reinvention. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 978-1-4398-0630-2.

KUMAR, Kaushik; ZINDANI, Divya a DAVIM, J. Paulo. Rapid prototyping, rapid tooling and reverse engineering: From biological models to 3d bioprinters. 2020. ISBN 9783110663242. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/9783110664904>.

SALVATORE BRISCHETTO (ED.). Additive Manufacturing Technologies and Applications. MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2017. ISBN 9783038425489. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/books978-3-03842-549-6>.

GIBSON, Ian; ROSEN, David W a STUCKER, Brent. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. New York: Springer-Verlag, 2010. ISBN 9781441911193. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá využitím technológie 3D skenovania a reverzného inžinierstva pri digitalizácii súčiastky z historického vozidla Mercedes-Benz W201 190D z roku 1985. V rešeršnej časti sú rozpracované princípy fungovania a technické možnosti kontaktných a bezkontaktných 3D skenerov, vrátane detailného opisu optických a laserových metód, ako sú optická triangulácia a štruktúrované svetlo. Praktická časť práce opisuje postup digitalizácie konkrétnej súčiastky pomocou optického skenera so štruktúrovaným modrým svetlom, následné spracovanie dát v softvéroch ZEISS Inspect a GOM Inspect, rekonštrukciu komponentov v prostredí Autodesk Inventor a tvorbu referenčného modelu pomocou aditívnej výroby. Výsledkom práce je digitálny 3D model vhodný na produkciu nedostupných náhradných dielov historického vozidla.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

3D skenovanie, reverzné inžinierstvo, optický 3D skener, optická triangulácia, štruktúrované svetlo, digitálna rekonštrukcia, aditívna výroba, 3D tlač

ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on the application of 3D scanning technology and reverse engineering in the digitization of a component from a historic vehicle 1985 Mercedes-Benz W201 190D. The research part elaborates on the principles and technical capabilities of contact and non-contact 3D scanners, including a detailed description of optical and laser methods such as optical triangulation and structured light. The practical section describes the process of digitizing a specific component using an optical scanner with structured blue light, followed by data processing in ZEISS Inspect and GOM Inspect, reconstruction of components in Autodesk Inventor, and the production of a reference model using additive manufacturing. The thesis results in a digital 3D model suitable for manufacturing unavailable spare parts for the historic vehicle.

KEYWORDS

3D scanning, reverse engineering, optical 3D scanner, optical triangulation, structured light, digital reconstruction, additive manufacturing, 3D printing

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

BIELENÝ, Tomáš. *Reverse engineering dílu historického vozu*. Online, Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2025. Vedúci práce Martin Tobiáš. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/166722>

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Vyhlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Martina Tobiáša, Ph.D. a s použitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

V Brne dňa 23. mája 2025

.....

Tomáš Bielený

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce, Ing. Martinovi Tobiášovi, Ph.D., za odborné vedenie, cenné rady a podporu počas celého vypracovania tejto práce. Rovnako ďakujem svojej rodine a priateľom za trpezlivosť a podporu počas štúdia.

OBSAH

Úvod	10
1 3D skenery	11
1.1 História 3D skenerov	11
1.1.1 Začiatky	11
1.1.2 Optické skenovanie.....	11
1.2 Využitie 3D skenerov v technickej praxi	12
2 Rozdelenie 3D skenerov	15
2.1 Kontaktné skenery	15
2.1.1 Deštruktívne skenery	16
2.1.2 Nedeštruktívne skenery	17
2.2 Bezkontaktné skenery	19
2.1.1 Reflexívne skenery	19
2.1.2 Transmisívne skenery	27
2.1.3 Elektromagnetické skenery.....	28
2.3 Porovnanie vybraných 3D skenovacích technológií	29
3 Skenovanie a tlač súčiastky z historického vozidla	30
3.1 Použitá technológia a prípravky pre skenovanie	30
3.2 Postup digitalizácie súčiastky	33
3.3 Spracovanie dát v softvéri GOM Inspect	38
3.4 Import modelu a premodelovanie súčiastky v Autodesk Inventor	39
3.5 Príprava dát a nastavenie parametrov tlače	43
3.6 Realizácia 3D tlače súčiastok	45
3.7 Vyhodnotenie zmontovateľnosti a presnosti modelu	49
Záver	52
Použité informačné zdroje	53
Zoznam použitých skratiek a symbolov	59

ÚVOD

V posledných desaťročiach dochádza k dynamickému rozvoju digitalizačných technológií, ktoré menia spôsoby navrhovania, výroby a kontroly technických objektov. Jednou z kľúčových technológií v tejto oblasti je 3D skenovanie, ktoré umožňuje rýchlo, presne a bezkontaktným spôsobom zachytiť tvar a rozmery objektov. Vďaka svojej univerzálnosti nachádza táto technológia uplatnenie naprieč viacerými odvetviami – od strojárstva, automobilového a leteckého priemyslu, cez medicínu a archeológiu, až po umenie a ochranu kultúrneho dedičstva.

Spolu s rastúcim dôrazom na efektívnosť a digitalizáciu výrobných procesov narastá aj význam reverzného inžinierstva, ktoré umožňuje vytvoriť technickú dokumentáciu alebo 3D model existujúceho fyzického objektu, a to najmä v prípadoch, keď pôvodná dokumentácia už neexistuje alebo je neúplná. V kombinácii s 3D skenovaním ide o efektívny nástroj na rýchlu rekonštrukciu a opätovnú výrobu dielov.

Jednou z oblastí, kde sa tieto technológie čoraz viac uplatňujú, je renovácia a údržba historických vozidiel. Pri mnohých veteránskych automobiloch sú originálne náhradné diely nedostupné alebo drahé, pričom ručná výroba bez presných podkladov je časovo aj finančne náročná. V takýchto prípadoch predstavuje digitalizácia komponentov a ich následná výroba atraktívne riešenie pre kusovú výrobu nedostupných dielov alebo funkčných prototypov.

Táto bakalárska práca sa zameriava na využitie technológií 3D skenovania a reverzného inžinierstva pri digitalizácii súčiastky z historického vozidla Mercedes-Benz W201 190D. Teoretická časť práce poskytuje prehľad princípov fungovania kontaktných a bezkontaktných skenerov vrátane detailného opisu rôznych meracích metód. Praktická časť opisuje proces digitalizácie konkrétnej súčiastky pomocou štruktúrovaného svetla, spracovanie dát a rekonštrukciu 3D modelu v softvéri Autodesk Inventor, a tiež výrobu referenčného prototypu pomocou 3D tlače.

Cieľom práce je demonštrovať možnosti, ktoré ponúkajú moderné metódy digitalizácie pri obnove a zachovávaní technických komponentov.

1 3D SKENERY

Získavanie trojrozmerných údajov pomocou 3D skenovania patrí medzi najmodernejšie metódy digitálneho zaznamenávania tvaru a rozmerov objektov. Táto metóda umožňuje vytvárať presnú digitálnu reprezentáciu skutočných objektov, ktorá nachádza uplatnenie v širokej škále odborov. Kľúčovým zariadením používaným pri tomto procese je 3D skener, ktorý zaznamenáva tvar objektov prostredníctvom merania vzdialeností jednotlivých bodov na ich povrchu. Funguje podobne ako fotoaparát, no namiesto zachytávania farieb získava tzv. hĺbkové údaje, teda informácie o priestorovej polohe bodov. [1]

Výsledkom procesu skenovania je najprv tzv. mračno bodov – súbor bodov definovaných v trojrozmernom súradnicovom systéme, ktoré reprezentujú zachytený povrch objektu. Tieto dáta sa následne spracovávajú v špecializovaných softvéroch, ktoré ich transformujú na 3D modely vo forme sietí (*mesh*), objemových telies (*solid body*) alebo analytických tvarov, podľa konkrétneho použitia. [1; 2]

Každý 3D skener zaznamenáva iba tie časti objektu, ktoré sú v danom momente priamo viditeľné z jeho pozície. Preto je na vytvorenie kompletného modelu objektov so zložitejšími tvarmi nutné vykonať viacero skenov z rôznych uhlov. Tieto čiastkové skeny sa následne pomocou softvéru spájajú (zarovnávajú a zlučujú) do jedného celistvého modelu. Tento proces využíva referenčné body alebo automatizované algoritmy na porovnávanie prekrývajúcich sa oblastí jednotlivých skenov. [1]

Na získanie hĺbkových údajov sa používajú rôzne technológie, ktoré sa líšia princípom merania, presnosťou a vhodnosťou pre rôzne aplikácie. Najčastejšie sa využíva štruktúrované svetlo, laserové skenovanie, dotykové sondy, fotogrametria, röntgenová počítačová tomografia (*Computed Tomography*, CT) alebo magnetická rezonancia (*Magnetic resonance imaging*, MRI). Každá z týchto technológií má svoje výhody a obmedzenia, ktoré určujú jej vhodnosť pre špecifické aplikácie. [1]

1.1 HISTÓRIA 3D SKENEROV

1.1.1 ZAČIATKY

Vývoj technológie 3D skenovania siaha do 60. rokov 20. storočia. Prvé pokusy o zachytenie trojrozmerných objektov využívali svetlá, kamery a projektory. Tieto systémy však boli limitované vtedajšou technikou, čo spôsobovalo, že presné skenovanie objektov bolo časovo náročné a málo efektívne. [3]

Významný posun nastal v 80. rokoch s príchodom počítačovej techniky, ktorá umožnila spracovávať komplexné trojrozmerné modely. Avšak samotné získanie digitálnych dát bolo stále výzvou. Komplexné povrchy objektov nebolo možné efektívne merať klasickými metódami, a preto boli vyvinuté kontaktné sondy ako presnejšie riešenie pre digitalizáciu tvarovo náročných súčastí. Tie síce dokázali vytvoriť presné modely, no ich používanie bolo pomalé a nevhodné pre citlivé alebo mäkké povrchy. [3]

1.1.2 OPTICKÉ SKENOVANIE

V snahe prekonať nedostatky kontaktných sond sa začali intenzívne rozvíjať optické metódy skenovania. Postupne sa sformovali tri hlavné metódy skenovania: bodová metóda, plošná metóda a pruhová metóda. Bodová metóda zaznamenávala jednotlivé body na povrchu objektu, čím síce dosahovala vysokú presnosť, ale zároveň bola pomalá. Plošná metóda umožňovala zaznamenať väčšie oblasti naraz, ale kvôli technickej náročnosti sa v praxi príliš neujala.

Najúspešnejšou sa stala pruhová metóda, ktorá využívala pás svetla a priniesla ideálny kompromis medzi rýchlosťou a presnosťou, čím sa stala základom modernej éry 3D skenovania. [4]

Po roku 1985 sa začali objavovať nové typy skenerov, využívajúce biele svetlo a laserové lúče, čo umožňovalo presnejšie a rýchlejšie zaznamenávanie objektov. Aj napriek pokročilosti technológie bolo stále problematické softvérové spracovanie dát. Výzvou bolo spojiť dáta z viacerých skenov, odstrániť duplicitné informácie a odfiltrovať nezanedbateľné množstvo nadbytočných dát. [3; 4]

V 90. rokoch našlo 3D skenovanie prvé širšie uplatnenie v praxi – najmä vo filmovom priemysle, animácii a technickom dizajne. Spoločnosť *Cyberware Laboratories* z Los Angeles sa už od 80. rokov špecializovala na vývoj skenerov na snímanie ľudského tela a hlavy. V roku 1994 predstavili celotelový 3D skener s názvom REPLICA, zobrazený na Obr. 1, ktorý bol schopný zaznamenať aj farebné informácie o povrchu objektu. Išlo o prelomový bod pre vizuálne efekty a herný priemysel.

Ďalší prelomový okamih nastal v roku 1996, keď spoločnosť 3D Scanners uviedla na trh systém ModelMaker, známy ako prvý systém, ktorý zachytáva realitu (*Reality Capture System*). Tento systém kombinoval ručne ovládané ramená s pruhovým 3D skenerom, čo umožňovalo nielen rýchle a flexibilné vytváranie zložitých modelov, ale aj ich detailné farebné textúrovanie. Tento pokrok znamenal výrazný posun v oblasti 3D skenovania, keďže umožnil vytváranie detailných, presných a farebných 3D modelov v priebehu niekoľkých minút, čím otvoril cestu širšiemu využívaniu tejto technológie v rôznych odvetviach priemyslu a dizajnu. [3; 4; 5]



Obr. 1: Skener REPLICA (1994) od spoločnosti Cyberware Laboratories využívaný na sken hlavy [5]



Obr. 2: ModelMaker (1996) od spoločnosti 3D Scanners [5]

1.2 VYUŽITIE 3D SKENEROV V TECHNICKEJ PRAXI

Technológia 3D skenovania predstavuje pokročilý merací a digitalizačný nástroj, ktorý umožňuje rýchle a vysoko presné zaznamenanie priestorovej geometrie objektov. Vďaka svojim technickým možnostiam nachádza široké uplatnenie naprieč viacerými priemyselnými odvetvami. [6]

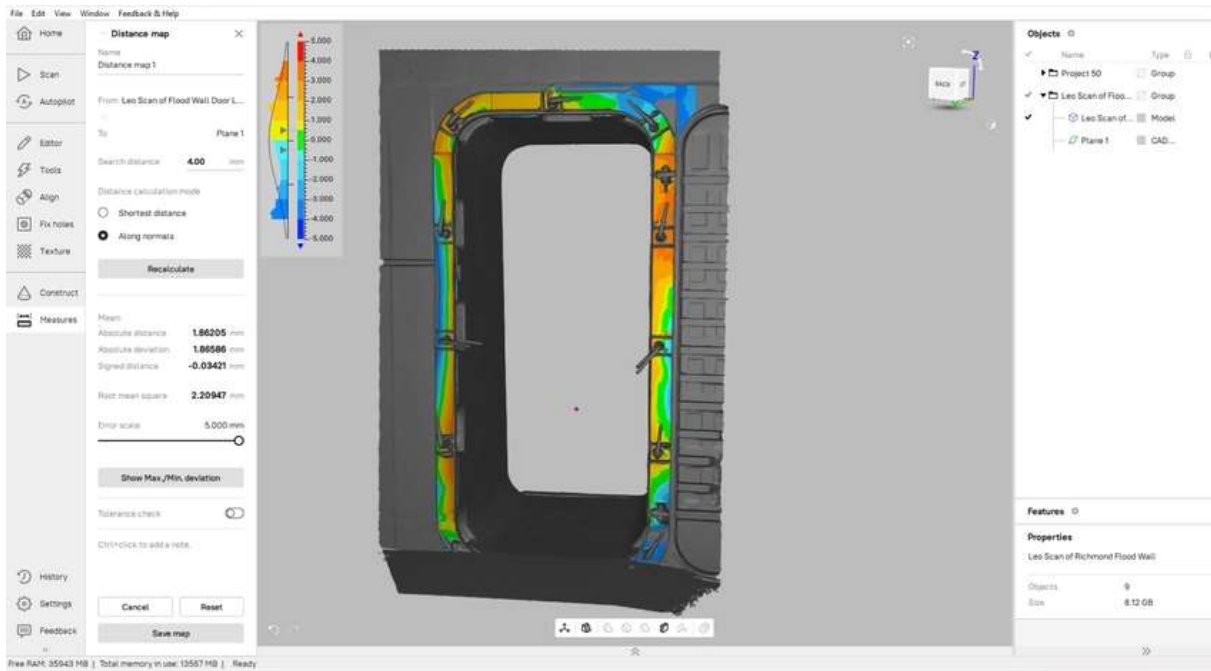
V oblasti strojárstva sa 3D skenery využívajú najmä pri realizácii procesov reverzného inžinierstva, kde slúžia na digitálnu rekonštrukciu existujúcich fyzických komponentov. Takto získané údaje o geometrii umožňujú následné vytvorenie konštrukčnej dokumentácie, prípadne slúžia ako podklad pre výrobu nových alebo náhradných dielov prostredníctvom technológií CNC obrábania, aditívnej výroby či iných výrobných metód. 3D skenovanie týmto spôsobom

výrazne zefektívňuje návrhové a výrobné procesy, najmä v prípadoch, keď nie je k dispozícii pôvodná dokumentácia alebo ide o tvarovo zložité súčiastky. Ďalším významným odvetvím využitia 3D skenerov je kontrola kvality a metrológia, kde presne naskenované modely umožňujú identifikáciu výrobných odchýlok a defektov, čím prispievajú k zlepšeniu a zrýchleniu výrobného procesu. [6] V oblasti medicíny a biomechaniky sa technológia uplatňuje pri výrobe prispôbených protéz, ortéz, ale aj pri vývoji a testovaní biomateriálov. 3D skenery zohrávajú dôležitú rolu aj v ochrane a dokumentácii kultúrneho dedičstva, pretože umožňujú digitálnu archiváciu historických artefaktov či umeleckých diel bez rizika ich poškodenia. Vďaka tomu možno tieto objekty detailne skúmať, digitálne rekonštruovať a sprístupňovať širokej verejnosti. Uplatnenie nachádzajú aj v oblasti dizajnu a prototypovania, kde slúžia na zachytenie konceptov a výrobu rýchlych prototypov, čím významne skracujú vývojový cyklus nových produktov. [3]

Príkladom praktického využitia 3D skeneru pri kontrole kvality je inšpekcia 7,6 metra vysokého protipovodňového múru v meste Richmond (USA). Sken, pri ktorom bol použitý 3D skener *Artec Ray II* v kombinácii s ručným skenerom *Artec Leo*, je prezentovaný na Obr. 3. [3] Cieľom skenovania bolo identifikovať deformácie, merať rozsah korózie a posúdiť celkový stav konštrukcie. Na Obr. 4 je zobrazený výsledok analýzy protipovodňových dverí, pri ktorej boli pozorované deformácie plechu, prítomnosť korózie a odchýlky tvaru v porovnaní s pôvodným návrhom. Výhodou tejto metódy bolo, že umožnila presné zaznamenanie tvaru a poškodenia múru v krátkom čase. Naskenované dáta boli následne spracované v príslušnom softvéri, čím došlo k výraznému zrýchleniu analýzy – z pôvodných dvoch dní na približne 90 minút. Presnosť výsledného skenu bola 0,1 mm. [3]



Obr. 3: Kompletný sken protipovodňovej bariéry [3]



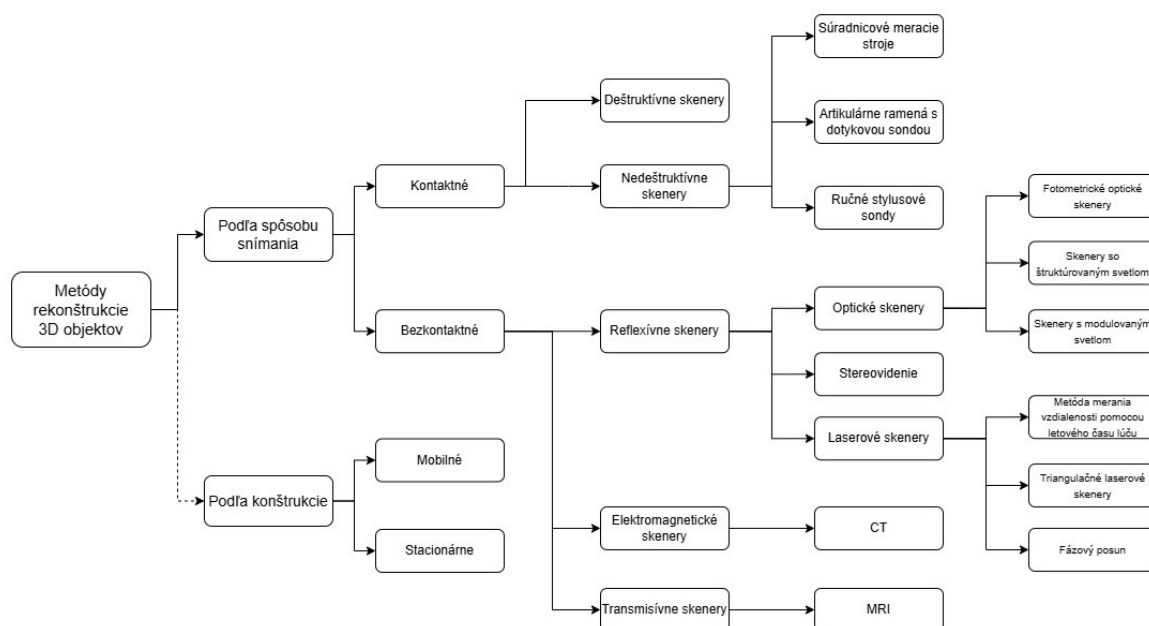
Obr. 4: Analýza odchýlok protipovodňových dverí vykonaná pomocou softvéru Geomagic Control X [3]

2 ROZDELENIE 3D SKENEROV

Existuje niekoľko kritérií, podľa ktorých možno 3D skenery kategorizovať. Podľa konštrukčného vyhotovenia sa delia na **stacionárne** a **mobilné**. Stacionárne skenery sú väčšinou pevne umiestnené na jednom mieste a zvyčajne ide o zariadenia väčších rozmerov s vysokou presnosťou a stabilitou merania. Naopak, mobilné skenery sú konštruované ako kompaktnější zariadenia, ktoré sa dajú jednoducho prenášať k skenovanému objektu a využívajú sa najmä v teréne alebo pri skenovaní rozmernejších a menej dostupných objektov. [7]

Z hľadiska spôsobu snímania možno 3D skenery rozdeliť na **kontaktné** a **bezkontaktné**. Detailnú klasifikáciu spomínaného rozdelenia schematicky približuje Obr. 5. Kontaktné skenery získavajú údaje o geometrii objektu pomocou fyzického dotyku sondy s povrchom objektu, čím zabezpečujú vysokú presnosť merania, no sú obmedzené na tvrdšie materiály. Bezkontaktné skenery sú založené na technológiách, ako sú optické systémy, laserové snímame, ako aj princípy využívajúce elektromagnetické a transmisívne metódy, ktoré umožňujú skenovať aj krehké, mäkké alebo citlivé materiály bez rizika ich poškodenia. [8]

V ďalšej časti tejto kapitoly bude podrobnejšie rozpracovaná klasifikácia 3D skenerov podľa spôsobu snímania, technické obmedzenia a vhodnosť použitia v rôznych oblastiach praxe. Pozornosť bude venovaná kontaktným a bezkontaktným skenerom, pričom jednotlivé podkapitoly budú obsahovať popis ich princípu fungovania, výhody a nevýhody a oblasti uplatnenia.



Obr. 5: Taxonómia 3D skenerov

2.1 KONTAKTNÉ SKENERY

Princíp kontaktných 3D skenerov je založený na priamom fyzickom dotyku meracej sondy s povrchom skenovaného objektu. Počas tohto kontaktu sú zaznamenávané presné priestorové súradnice jednotlivých bodov, ktoré tvoria základ digitálnej reprezentácie objektu. Získané dáta je následne možné spracovať do podoby bodového mračna, kriviek alebo plošného modelu. [9]

Keďže snímanie prebieha postupne – bod po bode – a proces skenovania býva najmä pri komplexnejších geometriách časovo náročný. Navyše, pre zabezpečenie presného merania je nutné, aby sonda vyvíjala určitý tlak na povrch, čo môže byť problémom pri mäkkých alebo deformovateľných materiáloch, akým je napríklad guma. [10]

V závislosti od charakteru kontaktu s objektom možno tieto skenery rozdeliť na dve základné kategórie: **nedeštruktívne** a **deštruktívne**. Voľba konkrétneho typu závisí od požiadaviek aplikácie a citlivosti snímaného povrchu.

2.1.1 DEŠTRUKTÍVNE SKENERY

Ako už samotný názov napovedá, pri použití deštruktívnej technológie je snímaný objekt počas merania nenávratne zničený. Tento spôsob skenovania sa využíva predovšetkým v prípadoch, keď je potrebné získať presný 3D model vrátane vnútorných štruktúr, ktoré nie sú dostupné bežnými meracími technikami. [11]

Povrch a vnútro súčiastky sa pred skenovaním ošetrí špeciálnym kontrastným sprejom alebo práškom, ktorý zvyšuje optickú čitateľnosť pri snímaní. Následne sa z priestoru odstráni vzduch, čím vznikne vákuum, ktoré umožní preniknutie kontrastného materiálu do všetkých dutín objektu. [11] Proces začína dôkladnou prípravou objektu, ktorý sa fixuje do stabilnej polohy – často v upínacom systéme alebo na CNC zariadení. Následne sa z vrchnej časti objektu pomocou frézky alebo brúsneho kotúča odstráni tenká vrstva materiálu. Táto novovzniknutá rovina, ktorá odhaľuje vnútornú štruktúru objektu, je potom zosnímaná pomocou 3D skenera. Skenovanie sa zvyčajne vykonáva kontaktnou metódou, alebo opticky a zaznamenáva presné geometrické údaje danej vrstvy. Tento cyklus – odstraňovanie vrstvy a následné skenovanie – sa opakuje, až kým nie je celý objekt kompletne nasnímaný. Všetky získané vrstvy sa následne spracujú softvérovou a interpolujú do uceleného 3D modelu. Výsledkom je digitálna rekonštrukcia objektu, ktorá obsahuje nielen jeho vonkajší tvar, ale aj vnútorné prvky, ako sú dutiny, výstuže či kanály. [12] Najväčšou výhodou tejto metódy je možnosť presne zachytiť skryté štruktúry, ktoré by inými technológiami (napr. optickým 3D skenovaním) nebolo možné získať. Nevýhodou je nezvratnosť tohto procesu, a preto sa deštruktívne skenovanie využíva najmä v prípadoch, keď je analýza vnútorných častí prioritou a objekt nie je potrebné zachovať. [11]

Na Obr. 6 je znázornený deštruktívny skener CCS-1000, ktorý využíva frézku na postupné odstraňovanie materiálu z objektu. Zariadenie umožňuje skenovanie objektov s maximálnymi rozmermi $300 \times 260 \times 200$ mm a v prípade rovnakého materiálu aj možnosť skenovania viacerých súčiastok súčasne. Systém je kompatibilný s rôznymi materiálmi, ako sú plasty, hliníkové zliatiny, mäkké kovy, liatina, mosadz, nerezová oceľ, meď a zinok.



Obr. 6: Deštruktívny skener CCS-1000 [50]

2.1.2 NEDEŠTRUKTÍVNE SKENERY

Kontaktné nedeštruktívne skenery sú typy skenerov, ktoré získavajú trojrozmerné údaje o povrchu objektu pomocou fyzického dotyku sondy bez toho, aby poškodili materiál alebo štruktúru meraného predmetu. Merané vzorky musia byť vždy pevne prichytené k základnej doske, inak môže dôjsť k nepresnostiam. Delíme ich na: [13]

- súradnicové meracie stroje,
- artikúlárne ramená s dotykovou sondou,
- ručné stylusové sondy.

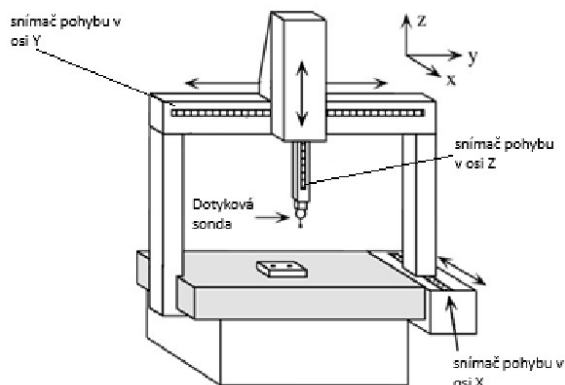
2.1.2.1 SÚRADNICOVÉ MERACIE STROJE

Súradnicové meracie stroje (*Coordinate Measuring Machines, CMM*) patria medzi najpoužívanejšie nedeštruktívne kontaktné zariadenia určené na presné meranie geometrických vlastností objektov. Pracujú na princípe zaznamenávania súradníc bodov povrchu pomocou sondy, ktorá sa pohybuje v trojosom systéme. Umožňujú meranie v karteziánskom, cylindricom a sférickom súradnicovom systéme. Zamerané údaje sú pomocou softvéru transformované na merateľné geometrické prvky. Presnosť CMM merania je vysoká v rozsahu 2–5 μm [14].

Sondy používané v CMM zariadeniach môžu byť rôzneho typu – najčastejšie ide o mechanické dotykové sondy, avšak existujú aj systémy vybavené optickými alebo laserovými senzormi, v závislosti od požiadaviek meracej úlohy. Moderné CMM sú riadené počítačom a umožňujú automatizované meranie. [15]

Na trhu existuje viacero konštrukčných typov CMM zariadení, ktoré sa od seba líšia geometriou rámu, spôsobom vedenia sondy a účelom použitia. Medzi najčastejšie konštrukčné prevedenia patria:

- **Mostové CMM (*Bridge CMM*)**
 - Najrozšírenejší typ CMM, v ktorom je meracia sonda vedená po osiach pohybujúcich sa v pevnom ráme nad meracou plochou. Je vhodný pre malé a stredne veľké diely. [16]
- **Konzolové CMM (*Cantilever CMM*)**
 - Sonda je uchytená na jednom konci konzolovej konštrukcie, čo umožňuje jednoduchší prístup k meranému objektu z viacerých strán. Tento typ sa používa najmä pre malé diely, kde je prioritou rýchlosť a ľahká manipulácia. [15]
- **Portálové CMM (*Gantry CMM*)**
 - Typ podobný mostovým CMM, prispôbený na meranie veľkých a ťažkých komponentov ako napr. karosérie vozidiel alebo letecké štruktúry. [16]



Obr. 7: Schéma mostového súradnicového stroja [51]



Obr. 8: Konzolový typ CMM [16]

- **Prenosné CMM**

- Zahŕňajú ručné dotykové sondy alebo sondy uchytené na robotickom ramene. Sú určené pre meranie priamo na mieste (napr. na výrobní linke), najmä tam, kde nie je možné použiť klasické stacionárne [17]



Obr. 9: Využitie prenosného CMM od spoločnosti Master3DGage na digitalizáciu valcovej hlavy z vozidla NASCAR [52]

2.1.2.2 ARTIKULÁRNE RAMENÁ S DOTYKOVOU SONDOU

Artikulárne ramená predstavujú špecifický typ prenosných súradnicových meracích strojov, ktorých konštrukcia je inšpirovaná pohybom ľudskej ruky. Pozostávajú z viacerých segmentov (typicky 6 až 7), ktoré sú navzájom spojené otočnými kĺbmi (artikuláciami). Na konci ramena sa nachádza stylusová (dotyková) sonda, ktorá sa používa na meranie konkrétnych bodov na povrchu objektu. Každý kĺb artikulárneho ramena obsahuje uhlové snímače polohy, ktoré zaznamenávajú polohu jednotlivých ramien. Na základe údajov zo všetkých kĺbov dokáže softvér s vysokou presnosťou určiť trojrozmernú pozíciu meracej sondy v priestore. Ramená sú často doplnené o vyvažovací mechanizmus, vďaka ktorému sa dá s ramenom pohodlne manipulovať jednou rukou bez nadmerného odporu. V závislosti od konkrétneho modelu môžu mať tieto zariadenia dosah až do 9 metrov. [18]



Obr. 10: Artikulárne rameno Trimos [18]

2.1.2.3 RUČNÉ STYLUSOVÉ SONDY

Sonda podobnú peru je manuálne vedená operátorom, pričom sa operátor dotýka referenčných bodov na povrchu objektu. Na rozdiel od artikulárnych ramien, ktoré určujú polohu rotačných snímačov, ručné stylusové sondy sa nespoliehajú na kĺbovú mechaniku. Ich poloha v priestore je vypočítavaná externe, napríklad pomocou sledovacích kamier alebo laserových trackerov. Vďaka tomu môže operátor vykonávať presné bodové merania bez obmedzenia dĺžky ramena. [16; 19]

2.2 BEZKONTAKTNÉ SKENERY

Bezkontaktné skenovanie umožňuje zaznamenávanie povrchu súčiastky bez priameho fyzického kontaktu s meracím zariadením, pričom sa využívajú optické systémy, laserové technológie a senzory so svetlocitlivými prvkami, ako sú napr. CCD¹ senzory. Výsledkom skenovania je opäť mračno bodov. [20]

Hlavnou výhodou bezkontaktných skenerov je ich schopnosť zachytiť veľké množstvo meracích bodov v krátkom čase, čím sa výrazne zvyšuje efektivita meracieho procesu. Tento faktor je obzvlášť dôležitý v priemyselných aplikáciách, kde je rýchlosť merania kľúčovým kritériom. Napriek týmto výhodám je presnosť bezkontaktného skenovania obmedzená toleranciou v rozmedzí $\pm 0,025$ – $0,2$ mm, čo znamená, že kontaktné metódy môžu poskytovať presnejšie výsledky. [20]

Nevýhodou je problém so správnou detekciou bodov na povrchoch, ktoré sú rovnobežné s osou lasera, čo môže viesť k nepresnostiam v získaných dátach. Okrem toho, pri skenovaní lesklých a reflexných povrchov môže dôjsť k narušeniu presnosti merania v dôsledku nežiaduceho odrazu svetla. [21] Tento problém sa v praxi rieši aplikáciou dočasného matného náteru, ktorý znižuje odrazivosť svetla a zabezpečuje presnejšie výsledky.

Aj napriek týmto limitáciám sú bezkontaktné skenery široko využívané v oblastiach, kde je prioritou rýchlosť merania a kde extrémna presnosť nie je nevyhnutná. Vďaka neustálemu vývoju optických technológií dochádza k postupnému zlepšovaniu presnosti bezkontaktných skenerov, čím sa ich využiteľnosť rozširuje aj do oblastí, kde boli doteraz preferované kontaktné meracie systémy. [10; 13] Bezkontaktné skenery môžeme ďalej deliť na: [22; 23]

- reflexívne skenery,
- elektromagnetické skenery,
- transmisívne skenery.

2.1.1 REFLEXÍVNE SKENERY

Reflexívne 3D skenery získavajú priestorové údaje na základe odrazu žiarenia (svetelného, laserového) od povrchu objektu. Meranie prebieha prostredníctvom analýzy vlastností odrazeného signálu – typicky času návratu, intenzity alebo deformácie vlny – čo umožňuje rekonštrukciu 3D geometrie skenovaného objektu. Táto skupina zahŕňa predovšetkým optické a laserové skenery, ktoré pracujú s rôznymi druhmi svetelného žiarenia. [23; 24]

2.1.1.1 OPTICKÉ SKENERY

Optické skenery predstavujú podskupinu reflexívnych bezkontaktných zariadení, ktoré na získavanie priestorových informácií využívajú svetelné žiarenie (iné než laserové). Princíp ich fungovania je založený na odraze svetla od povrchu objektu a následnej analýze tohto odrazeného signálu. Využíva sa najmä LED, biele, modré alebo infračervené svetlo, pričom

¹ Charge-Coupled Device

samotné meranie je založené na princípoch triangulácie, štruktúrovaného svetla alebo časového oneskorenia svetelného lúču. [1; 25]

Vzhľadom na rozmanitosť technológií využívaných v tejto kategórii skenerov je vhodné rozdeliť optické skenery do viacerých podskupín podľa použitého princípu snímania. Každá z týchto technológií má svoje špecifiká, výhody, ako aj obmedzenia, ktoré ju predurčujú na konkrétne oblasti použitia. V nasledujúcich častiach budú preto podrobne rozobraté tri hlavné typy optických skenerov – skenery so štruktúrovaným svetlom, skenery využívajúce modulované svetlo a fotometrické skenery.

2.1.1.1.1 SKENERY SO ŠTRUKTÚROVANÝM SVETLOM

Základným princípom metódy štruktúrovaného svetla je optická triangulácia, ktorá umožňuje presne zmerať povrch objektu. Patrí medzi najpresnejšie metódy s rozlíšením až do 10 μm . [25]

Optická triangulácia je založená na projekcii svetelného vzoru na povrch objektu, od ktorého sa vzor odráža a je zaznamenávaný kamerami umiestnenými v známej vzdialenosti a pod známym uhlom voči projektoru. Na základe trigonometrických vzťahov medzi týmito prvkami je možné vypočítať presnú polohu jednotlivých bodov v 3D priestore. Poloha každého bodu sa určuje výpočtom jeho priestorových súradníc, pričom sa analyzuje deformácia zachyteného svetelného vzoru. Výsledkom triangulácie je trojuholník, ktorého vrcholmi sú projektor, kamera a bod na povrchu objektu. Opakovaním tohto výpočtu pre všetky zachytené body vzniká kompletný 3D model povrchu objektu. [25]

3D skenery využívajúce metódu štruktúrovaného svetla pracujú na princípe projekcie svetelného vzoru a následnej analýzy jeho deformácie. Schematické znázornenie tohto princípu je uvedené na Obr. 7. Premietaný vzor môže mať jednorozmernú alebo dvojrozmernú podobu, pričom každý typ ponúka odlišné možnosti spracovania dát. [25]

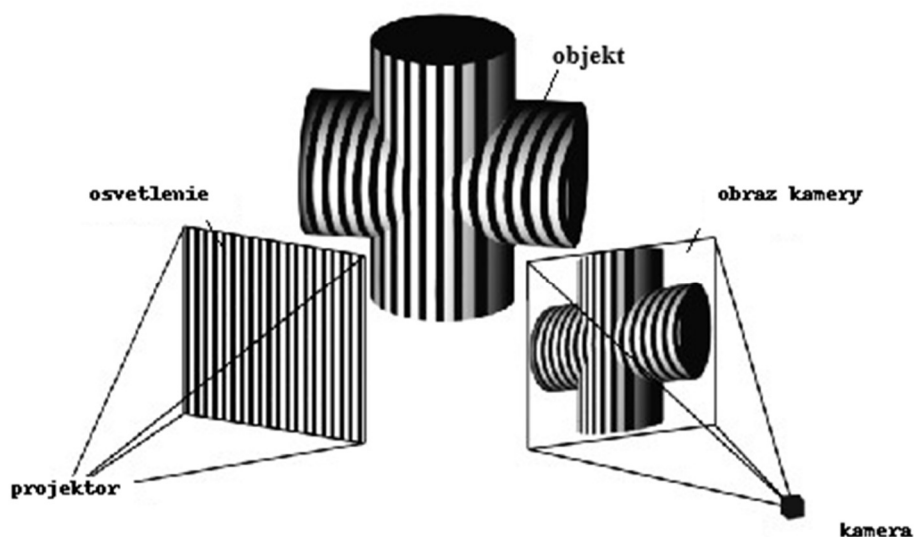
Pri jednorozmernom vzore sa používa úzka svetelná línia, ktorá je obvykle generovaná projektormi typu LCD² alebo DLP³. Kamera vypočítava polohu jednotlivých bodov pomocou vyššie spomínaného princípu triangulácie. Ak sa používa iba jedna línia, je potrebné tento vzor postupne posúvať po celom povrchu skenovaného objektu, aby sa získali kompletne priestorové údaje. [25]

Dvojrozmerný vzor môže mať podobu svetelnej mriežky alebo sústavy pruhov. Kamera zachytáva deformáciu tohto vzoru a špecializovaný algoritmus následne analyzuje pozície jednotlivých bodov v priestore. Ak sa používa sústava vertikálnych svetelných pruhov premietaných horizontálne po povrchu objektu, analyzuje sa poradie pruhov a ich postupnosť v rámci jednej projekcie. [1; 25]

Hlavnou výhodou metódy štruktúrovaného svetla je vysoká rýchlosť snímania. Namiesto postupného zaznamenávania jednotlivých bodov umožňuje táto metóda súčasné zachytenie viacerých bodov naraz alebo aj zachytenie celého zorného poľa. Táto vlastnosť minimalizuje alebo úplne eliminuje skreslenie spôsobené pohybom objektu počas skenovania. Niektoré moderné systémy sú schopné zaznamenávať dokonca aj pohybujúce sa objekty v reálnom čase. [1]

² *Liquid Crystal Display*

³ *Digital Light Processing*



Obr. 11: Schéma princípu fungovania 3D skenera so štruktúrovaným svetlom, upravené podľa [26]

2.1.1.1.2 SKENERY S MODULOVANÝM SVETLOM

Technológia 3D skenovania s modulovaným svetlom je založená na premietaní svetla s časovo premenlivou intenzitou na povrch objektu. Táto intenzita sa mení podľa presne definovaného harmonického priebehu, pričom najčastejšie ide o sínusovú funkciu. Modulácia svetelného signálu v čase umožňuje získať dodatočné informácie o vzdialenosti bodov od snímača, čím sa dosahuje vyššia presnosť merania hĺbky v porovnaní s jednoduchými metódami osvetlenia [1].

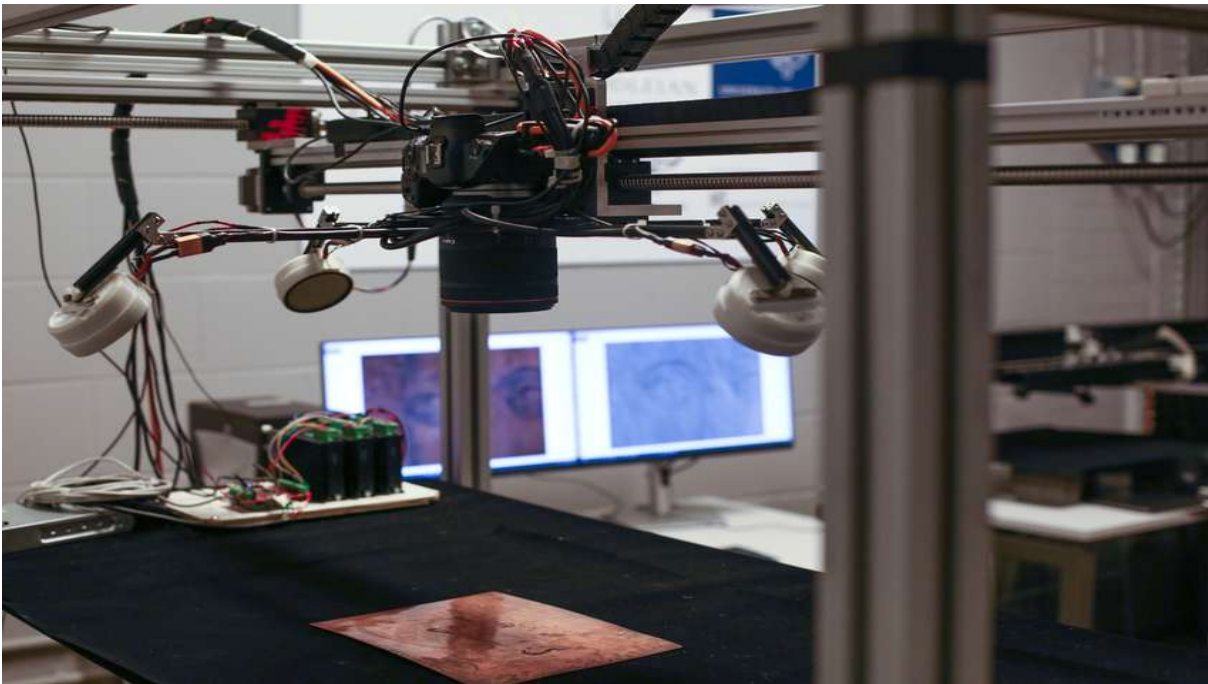
Po dopade modulovaného svetla na povrch objektu dochádza k jeho odrazu, pričom kamera zachytáva zmenený signál. V dôsledku odlišnej vzdialenosti bodov sa prejaví tzv. fázový posun v prijatom svetelnom signáli – čím je bod ďalej od skenera, tým väčší je tento posun. Softvér následne analyzuje tieto fázové rozdiely a na ich základe vypočíta hĺbkovú mapu, ktorá predstavuje základ pre rekonštrukciu trojrozmerného modelu povrchu objektu. [1]

Veľkou výhodou tejto metódy je odolnosť voči rušivému svetlu z prostredia. Keďže systém pracuje s časovo modulovaným signálom, dokáže efektívne potlačiť vplyv iných svetelných zdrojov, ako je napríklad prirodzené denné svetlo alebo umelé osvetlenie v miestnosti. Tým sa dosahuje vysoká kvalita merania aj v menej kontrolovaných podmienkach, kde by iné optické technológie mohli zlyhať [1].

2.1.1.1.3 FOTOMETRICKÉ OPTICKÉ SKENERY

Fotometrické skenery predstavujú špecifickú metódu optického 3D snímania, ktorá slúži na rekonštrukciu tvaru povrchu objektov na základe analýzy ich osvetlenia z rôznych smerov [27]. Technológia je založená na sledovaní zmien intenzity odrazeného svetla a tvorby tieňov pri rôznom osvetlení, čím umožňuje určiť orientáciu povrchových plôch. Metóda dokáže detailne zachytiť jemné reliéfne štruktúry objektov, ako sú drobné ryhy, nápisy alebo mikrodefekty. [28]

Princíp fotometrického skeneru spočíva v tom, že objekt je snímaný stacionárne umiestnenou kamerou, pričom je opakovane osvetľovaný z rôznych, presne definovaných smerov. Praktické vyhotovenie takéhoto zariadenia s kamerou a sústavou osvetľovacích prvkov je uvedené na Obr. 12. Pre každé jednotlivé osvetlenie sa zaznamenáva obraz objektu, pričom kamera sleduje intenzitu odrazeného svetla pre každý bod povrchu (Obr. 13). Na základe rozdielov v intenzitách a známych smerov osvetlenia sa potom výpočtovo určuje normálový vektor každého bodu povrchu. Predpokladá sa pritom, že povrch objektu sa správa ako ideálny difúzny reflektor, teda že svetlo odráža rovnomerne vo všetkých smeroch. [28]

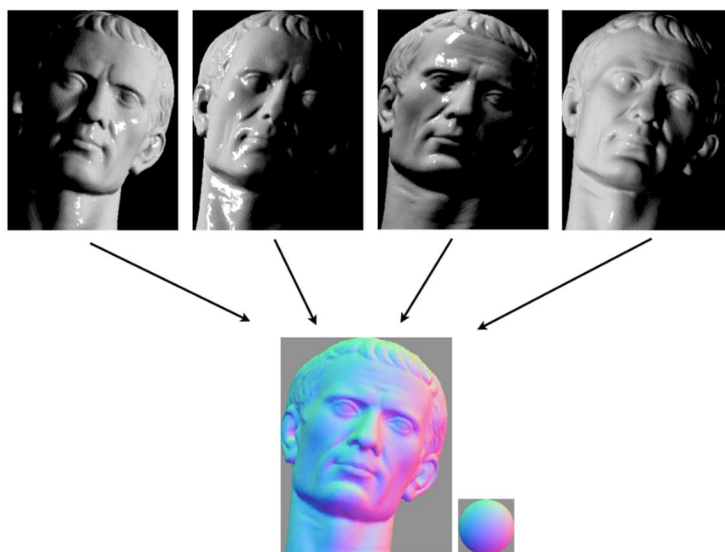


Obr. 12: Fotometrický stereo skener [53]

Po výpočte normálových vektorov nasleduje numerická integrácia, na základe ktorej sa generuje výšková mapa reprezentujúca 3D tvar snímaného objektu. Na rozdiel od triangulačných či metod, ktoré merajú letový čas lúču, však táto technika neposkytuje priamu informáciu o absolútnej hĺbke jednotlivých bodov, ale iba o ich relatívnych výškových rozdieloch. [28; 29]

Fotometrické stereo nachádza uplatnenie predovšetkým tam, kde je potrebné získať veľmi jemné povrchové detaily s vysokým rozlíšením. Používa sa napríklad v priemyselnej metrológii na kontrolu kvality povrchov (napr. detekcia mikrotrhlín alebo škrabancov), v oblasti kultúrneho dedičstva na digitalizáciu historických artefaktov (napr. rytiny, reliéfy, mince), ako aj v biometrii a medicíne na analýzu textúry kože či povrchových štruktúr. [29]

Medzi hlavné výhody fotometrického optického skeneru patrí možnosť snímať s veľmi vysokým rozlíšením a rovnako výhodná je aj jeho jednoduchšia hardvérová konfigurácia (postačuje iba jedna kamera a niekoľko riadených zdrojov svetla). Na druhej strane, medzi nevýhody patrí obmedzená použiteľnosť pri lesklých alebo transparentných povrchoch, silná závislosť od presnosti osvetlenia a tiež fakt, že táto technika neposkytuje absolútnu hĺbku bodov bez ďalších doplnkových metod. [29]



Obr. 13: Zábery z fotometrického skenovania objektu pomocou stacionárnej kamery pri rôznych smeroch osvetlenia [54]

2.1.1.2 LASEROVÉ SKENERY

Laserové skenery predstavujú zariadenia využívajúce laserový lúč na meranie vzdialeností a vytváranie presných trojrozmerných modelov prostredia. Na základe princípu merania vzdialenosti môžeme laserové skenery rozdeliť do troch hlavných kategórií: [1]

- metóda merania letového času lúču,
- triangulačné laserové skenery,
- fázový posun.

2.1.1.2.1 METÓDA MERANIA VZDIALENOSTI POMOCOU LETOVÉHO ČASU LÚČU

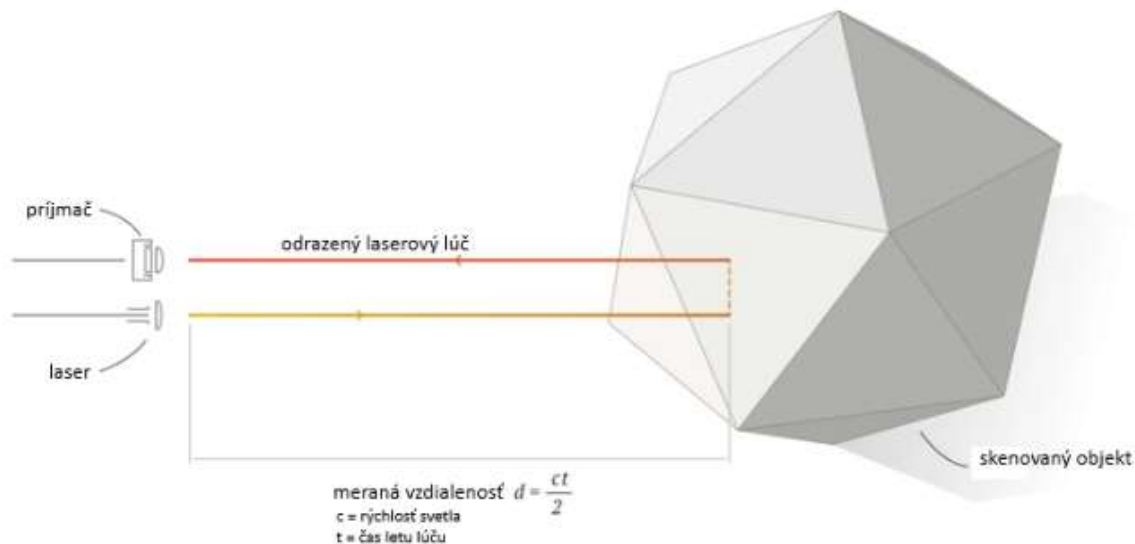
Kamery pracujúce na princípe merania času letu svetelného impulzu využívajú infračervené laserové impulzy na získavanie hĺbkových informácií o prostredí. Princíp ich fungovania spočíva v meraní času, za ktorý sa svetelný impulz od vysielača odrazí od objektu a vráti späť k senzoru. Keďže rýchlosť svetla je známa, systém dokáže presne vypočítať vzdialenosť jednotlivých bodov povrchu. Na tento účel sa využíva modulovaný svetelný zdroj, ktorý osvetľuje scénu, pričom snímač analyzuje odrazené svetlo a určuje priestorovú polohu bodov. Tento proces umožňuje rýchle a presné mapovanie trojrozmerného prostredia v reálnom čase. [30; 31]

Svetelným zdrojom v týchto kamerách býva polovodičový laser alebo infračervená LED dióda s vlnovou dĺžkou približne 850 nm, ktorá je mimo viditeľného spektra ľudského oka. Hlavným problémom pri meraní je eliminácia okolitého svetla, ktoré môže spôsobovať zhoršenú presnosť merania. Meranie vzdialenosti je možné realizovať dvoma hlavnými metódami: [30]

- **Pulzná metóda** (*Direct ToF⁴ – dToF*): Spočíva v generovaní krátkych svetelných impulzov a meraní doby ich návratu k snímaču.

⁴ ToF – Time of flight

- **Metóda fázového posunu** (*Indirect ToF – iToF*): Pri tejto metóde sa intenzita svetla mení v čase podľa sínusového alebo obdĺžnikového priebehu a analyzuje sa fázový posun po odraze od objektu.



Obr. 14: Schéma znázorňuje princíp merania vzdialenosti pomocou metódy Time-of-Flight, upravené podľa [3]

Táto technológia nachádza uplatnenie v oblasti robotiky, autonómnych systémov, pri 3D mapovaní interiérov a exteriérov, ako aj v priemyselnej automatizácii a kontrole kvality. Svoje uplatnenie nachádzajú lasery pracujúce na princípe merania letového času lúču aj v oblasti rozšírenej a virtuálnej reality, kde slúžia na presné snímanie pohybu a priestorovú interakciu v reálnom čase. [30]

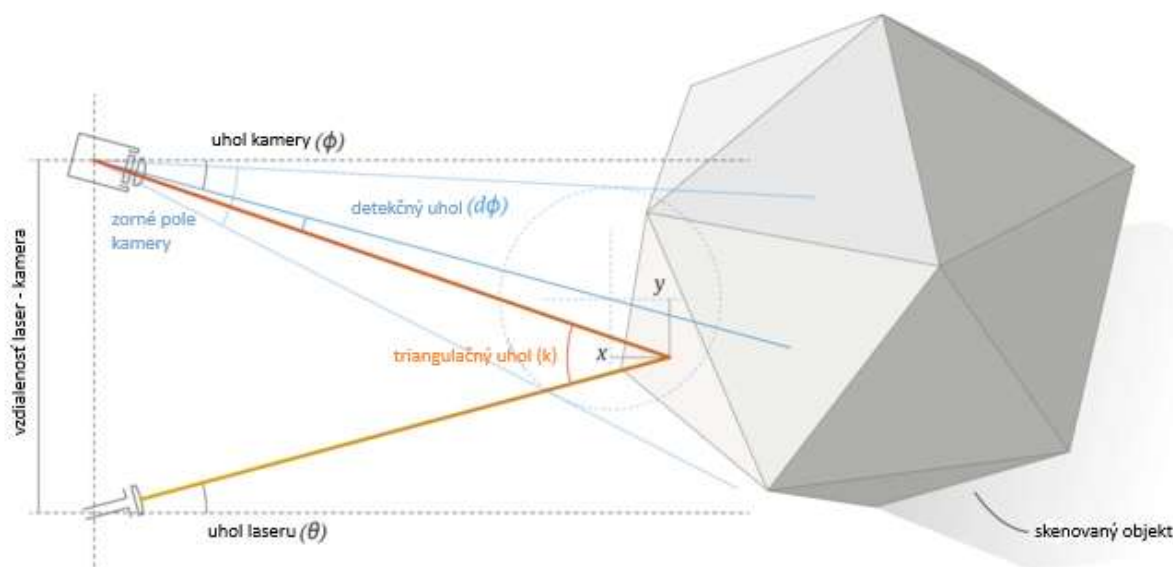
Medzi hlavné výhody patrí vysoká rýchlosť snímania (umožňujúca meranie v reálnom čase), kompaktnosť a jednoduchá integrácia snímačov do rôznych systémov, ako aj schopnosť pracovať v zhoršených svetelných podmienkach. Okrem toho dokáže systém zaznamenať rozsiahle oblasti z jednej pozície, čo zjednodušuje zber dát. [30]

K nevýhodám patrí nižšia presnosť v porovnaní s triangulačnými alebo fázovými metódami, obmedzené rozlíšenie a citlivosť na vplyvy okolia – najmä na rušivé svetlo alebo viaceré odrazy, ktoré môžu skresliť meranie. [30]

2.1.1.2.2 TRIANGULAČNÉ LASEROVÉ SKENERY

Laserové triangulačné skenery využívajú princíp optickej triangulácie (vysvetlené v kapitole 2.1.1.1.1) na presné určovanie trojrozmerných súradníc bodov na povrchu objektu. Výsledná presnosť merania závisí od stability týchto parametrov, ako aj od kvality snímacieho senzora kamery, ktorá zaznamenáva polohu premietnutého laserového lúča. [1; 32]

V závislosti od konfigurácie môžu laserové triangulačné skenery premietat' na povrch buď jednotlivý laserový bod (1D triangulácia), alebo pre rýchlejšie a efektívnejšie skenovanie laserovú čiaru (2D triangulácia). Kamera sleduje odraz laserového lúča na povrchu objektu, pričom poloha tejto projekcie v obraze sa mení v závislosti od vzdialenosti snímaného bodu. Na základe týchto zmien a známych trigonometrických vzťahov je následne možné určiť presnú polohu bodu v trojrozmernom priestore. [1]



Obr. 15: Schéma princípu triangulačného skeneru, upravené podľa [3]

Na rozdiel od systémov so štruktúrovaným svetlom, ktoré na objekt premietajú komplexné svetelné vzory pomocou LCD alebo DLP projektorov, laserové triangulačné skenery využívajú úzky, koncentrovaný laserový lúč [25]. Vďaka vyššej intenzite a koherencii svetla dokážu presne snímať aj objekty s opticky náročnými vlastnosťami, ako sú tmavé, lesklé alebo matné povrchy, kde by svetelné projekcie mohli zlyhávať. Navyše sú menej náchylné na rušivé okolité osvetlenie, čo zvyšuje spoľahlivosť merania v rôznych podmienkach. [32]

Hoci technológia štruktúrovaného svetla umožňuje rýchle plošné snímanie, laserové triangulačné skenery sú uprednostňované tam, kde je rozhodujúca vysoká presnosť a schopnosť detailne zachytiť zložitú geometriu objektov. Vyznačujú sa výbornou čitateľnosťou opticky náročných povrchov, vysokou presnosťou a odolnosťou voči rušivému okolitému osvetleniu. Ich nevýhodou je nižšia rýchlosť a obmedzená snímacia plocha. [1; 25]

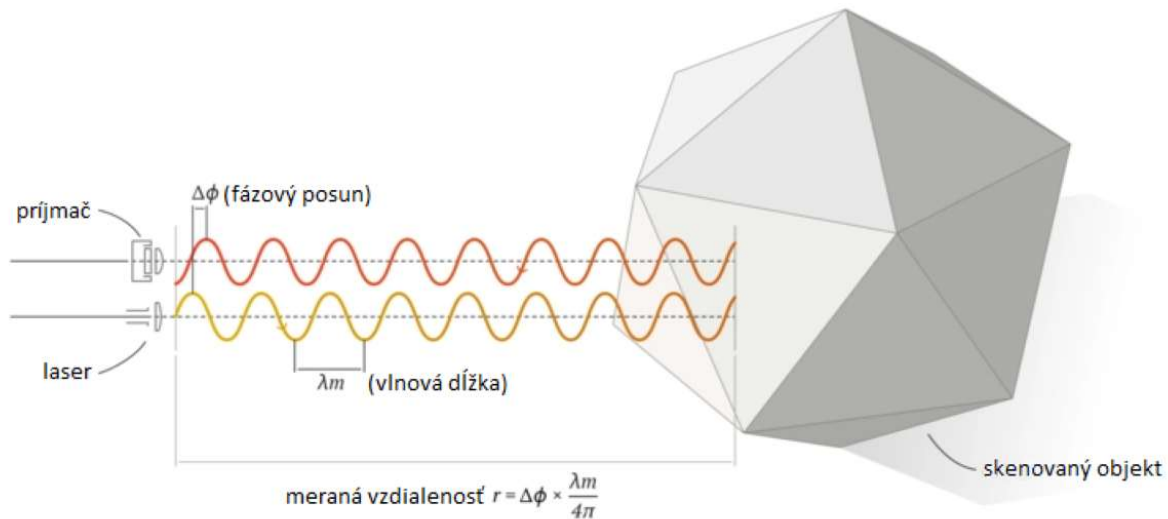
2.1.1.2.3 FÁZOVÝ POSUN

Fázovo-posunové laserové skenery určujú vzdialenosť k objektu na základe porovnania fázy medzi vyslaným a prijatým laserovým lúčom. Princíp fungovania spočíva vo vysielaní kontinuálneho laserového lúču, ktorého intenzita sa periodicky mení podľa známej frekvencie, najčastejšie sínusovo alebo obdĺžnikovo. Keď sa lúč odrazí od objektu, skener analyzuje rozdiel medzi fázou pôvodného a odrazeného signálu. Na základe tohto fázového posunu sa vypočíta vzdialenosť k danému bodu povrchu. [1]

Presnosť metódy závisí od použitých frekvencií – čím je vyššia frekvencia, tým presnejšie je meranie. S narastajúcou presnosťou sa znižuje maximálny dosah zariadenia. Bežný dosah fázovo posunových skenerov je do 80 metrov. Rýchlosť snímania skenera je vysoká, v niektorých prípadoch až 100 000 bodov za sekundu. [33]

Zariadenia tohto typu bývajú často vybavené motorizovaným otočným mechanizmom, ktorý umožňuje rotáciu skenovacej hlavice v horizontálnej aj vertikálnej rovine. Vďaka tomu dokážu snímať celé okolie - vrátane stien, stropov a podláh - bez potreby premiestňovania skenera. Táto vlastnosť je obzvlášť výhodná pri skenovaní interiérov a priestorovo obmedzených oblastí. [33]

V porovnaní s technológiou merania letového času lúču poskytujú fázovo-posunové skenery presnejšie výsledky na kratšie vzdialenosti. Zatiaľ čo ToF zariadenia dosahujú väčší merací rozsah, ich presnosť je spravidla nižšia. Ďalšou výhodou fázovej metódy je vyššia rýchlosť snímania, aj keď za cenu možného výskytu šumu v dátach pri zložitých odrazoch alebo menej ideálnych povrchoch. [1]



Obr. 16: Schéma princípu skenovania pomocou metódy sínusového fázového posunu, upravené podľa [3]

2.1.1.3 STEREO VIDENIE

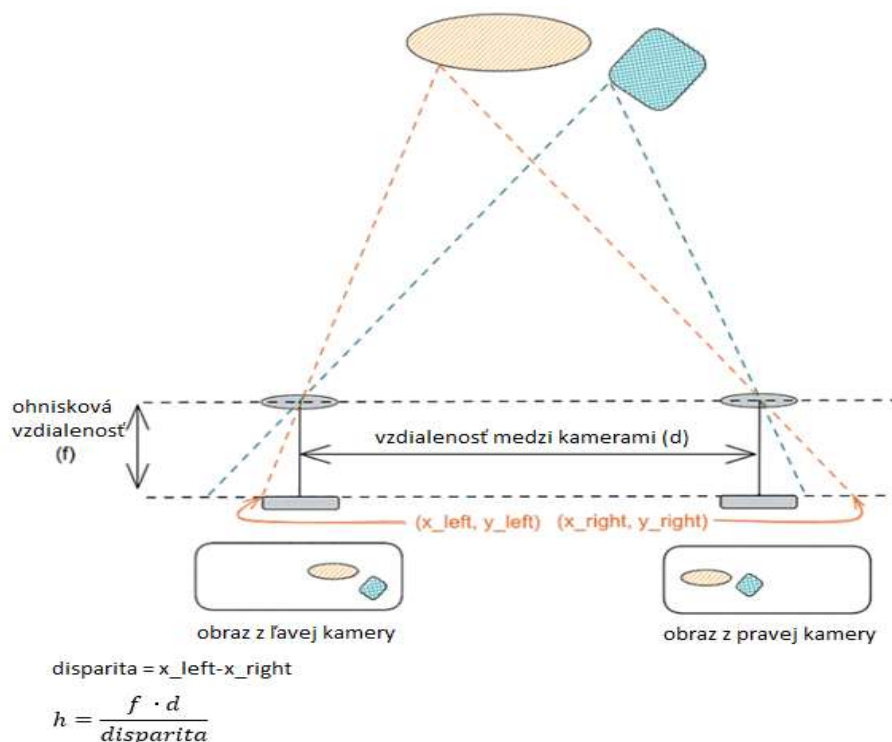
Stereo optické skenery predstavujú osobitnú kategóriu bezkontaktných 3D skenovacích systémov, ktoré využívajú dve alebo viac kamier na súčasné snímání objektu z rôznych uhlov. Princíp tejto technológie vychádza z binokulárneho videnia, podobne ako funguje ľudské oko. Každá kamera zachytáva objekt z mierne odlišnej pozície. Porovnaním týchto obrazov je možné určiť rozdiel v polohe zodpovedajúcich bodov, na základe čoho sa vypočítava hĺbka jednotlivých bodov v priestore. Takto vzniká trojrozmerný model povrchu snímaného objektu.[34]

Vďaka rozdielu medzi obrazmi nasnímanými z rôznych perspektív (disparita) je možné vypočítať hĺbku jednotlivých bodov v priestore a vytvoriť 3D model objektu vo forme mračna bodov. [34] Kvalita a hustota výsledného modelu závisí najmä od rozlíšenia kamier a presnosti výpočtu disparity. [35] Čím väčší je rozdiel medzi dvoma zodpovedajúcimi bodmi na oboch obrázkoch, tým bližšie sa daný objekt nachádza ku kamere. Platí to aj naopak, čím je rozdiel menší, tým je objekt vzdialenejší. Pri porovnávaní týchto dvoch obrazov majú objekty rôzne pozície na jednotlivých snímkach, čo umožňuje výpočet vzdialenosti medzi objektmi a kamerami. [36]

Základom stereo snímání je triangulácia – každá kamera zaznamenáva scénu z inej pozície a softvér porovnáva zodpovedajúce body v oboch snímkach. Na základe známeho usporiadania kamier a rozdielov v polohe bodov (disparity) je následne možné vypočítať súradnice bodov v 3D priestore. Stereo videnie možno rozdeliť na pasívne a aktívne: [37]

- **Pasívne stereo** využíva prirodzené osvetlenie a povrchovú textúru objektu, bez potreby externého svetelného zdroja.

- **Aktívne stereo** používa dodatočné osvetlenie – najčastejšie projektor, ktorý premieta známy vzor (napr. pruhy alebo mriežku) na povrch objektu. Vďaka tomu dokáže systém spoľahlivo rozpoznať body aj na hladkých, lesklých či málo textúrovaných povrchoch, kde by pasívna metóda zlyhala.



Obr. 17: Ilustrácia princípu pasívneho stereo videnia, upravené podľa [55]

V rozšírenej forme sa stereo princíp kombinuje aj s laserovým osvetlením, pričom laserový zdroj premieta bod, čiaru alebo vzor na povrch objektu. Kamery snímajú tento laserový obraz z rôznych uhlov, čím sa spája výhoda stereo triangulácie s presnosťou laserového skenovania. [1]

2.1.2 TRANSMISÍVNE SKENERY

POČÍTAČOVÁ TOMOGRAFIA

Ďalšou významnou kategóriou v oblasti bezkontaktného 3D skenovania sú CT skenery (*Computed Tomography*). Na rozdiel od optických alebo laserových systémov, ktoré sú obmedzené na povrchovú geometriu, CT skenery poskytujú komplexný pohľad dovnútra objektov.

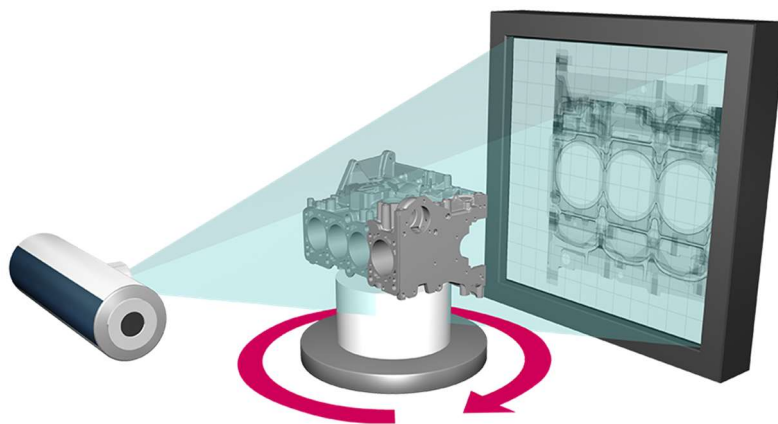
CT skener umožňuje vytvárať trojrozmerné modely vnútorných štruktúr objektov pomocou röntgenového žiarenia. Využíva sa na detekciu vnútorných defektov ako sú póry, trhliny, inklúzie (cudzorodé častice v materiáli) alebo na meranie vnútorných geometrických prvkov, ktoré by inak nebolo možné overiť bez poškodenia súčiastky. Široké uplatnenie má aj v medicíne. [38; 39]

Technológia funguje na princípe snímania objektu sériou 2D röntgenových projekcií z rôznych uhlov. Počas skenovania je objekt umiestnený na rotačný stolík, ktorý sa otáča, zatiaľ čo röntgenový lúč prechádza cez skúmaný materiál. Na Obr. 13 je znázornený rotačný stolík s blokom motora, pričom v pozadí je vidieť výslednú vnútornú štruktúru súčiastky. V závislosti od hustoty a zloženia materiálu sa intenzita žiarenia znižuje. Zvyškové žiarenie dopadá na

detektor, ktorý zaznamenáva rozdiely v absorpcii žiarenia. Tieto 2D snímky sa následne rekonštruujú pomocou algoritmov, ako je filtrovaná spätná projekcia, čím sa vytvára trojrozmerný objemový model objektu tvorený voxelmi – objemovými pixelmi reprezentujúcimi hustotu materiálu v konkrétnych bodoch. [38; 39]

Základom CT technológie je röntgenové žiarenie – forma elektromagnetického žiarenia s veľmi krátkou vlnovou dĺžkou (0,01 až 10 nm). Vzniká pri prudkom spomalení urýchlených elektrónov dopadajúcich na kovovú anódu (zvyčajne z wolfrámu) v röntgenovej trubici. Toto žiarenie má schopnosť prenikať materiálom a je rôzne pohlcované v závislosti od hustoty a atómového čísla látky. Hustejšie materiály (napr. kovy) absorbujú viac žiarenia a na výsledných snímkach sa zobrazujú ako svetlé oblasti, zatiaľ čo menej husté materiály sú tmavšie. [39]

Priemyselné CT skenery umožňujú veľmi presnú analýzu vnútorných aj vonkajších geometrických vlastností objektov. Typické rozlíšenie sa pohybuje od niekoľkých mikrometrov až po submikrometrové hodnoty v prípade vysokokvalitných zariadení. [40]



Obr. 18: Využívanie počítačovej tomografie na sken bloku motoru [56]

V praxi sa priemyselné CT skenery využívajú najmä na kontrolu kvality odliatkov, zvaraných spojov a kompozitných materiálov, v reverznom inžinierstve, overovaní výrobných tolerancií a pri skúmaní komponentov vyrábaných aditívnymi technológiami. [41]

2.1.3 ELEKTROMAGNETICKÉ SKENERY

MAGNETICKÁ REZONANCIA

Zobrazovanie magnetickou rezonanciou (MRI, *Magnetic Resonance Imaging*) je pokročilá technológia umožňujúca detailné trojrozmerné zobrazenie vnútorných štruktúr objektov, založená na princípe jadrovej magnetickej rezonancie (NMR⁵) [42]. MRI je využívaná na skúmanie materiálov obsahujúcich atómy vodíka – najčastejšie vody, polymérov, kompozitov či biologických tkanív. Naopak, nevhodné sú feromagnetické kovy a materiály s nízkym obsahom vodíka, pretože tieto buď narušajú magnetické pole, alebo neposkytujú dostatočný signál pre tvorbu obrazu.[43]

MRI skenovanie prebieha v niekoľkých krokoch. Najprv sa skúmaný objekt umiestni do silného statického magnetického poľa, ktoré spôsobí, že protóny v atómoch vodíka sa zarovnajú podľa smeru tohto poľa. Následne MRI zariadenie vyšle rádiový impulz s presne určenou frekvenciou, ktorý protóny vychýli z rovnovážneho stavu. Po ukončení impulzu sa protóny vracajú späť do pôvodnej orientácie a počas tohto návratu emitujú slabé rádiové signály.[44]

⁵ Nuclear Magnetic Resonance

Tieto signály sú zachytávané snímacími cievkami a ich spracovanie umožňuje získať informáciu o tom, z akej časti objektu signál pochádza. Na určenie polohy jednotlivých bodov v objekte sa v MRI využívajú gradientové magnetické polia. Tieto polia sú generované špeciálnymi cievkami a spôsobujú, že sila magnetického poľa sa mierne mení v závislosti od polohy v priestore – v osiach X, Y a Z. V dôsledku toho sa mení aj frekvencia, pri ktorej protóny rezonujú. Znamená to, že protóny v rôznych častiach objektu vysielať signály s mierne odlišnými frekvenciami, čo umožňuje presnú lokalizáciu pôvodu signálu v priestore. [43]

V technických oblastiach sa MRI využíva najmä v biomechanike a materiálovom inžinierstve. Konkrétne sa táto technológia uplatňuje pri vývoji a testovaní biomechanických implantátov a biomateriálov, kde poskytuje informácie o interakcii materiálov s biologickými tkanivami. Ďalšie technické aplikácie zahŕňajú sledovanie prúdenia kvapalín v poréznych materiáloch, nedeštruktívne testovanie polymérov a kompozitov, ako aj štúdium difúzie a kapilárnych javov v rôznych materiáloch. MRI umožňuje detailne analyzovať pohyb a distribúciu molekúl vody a iných látok v materiáloch, čo je kľúčové napríklad pri vývoji mazacích systémov. [43; 45]

Medzi hlavné výhody MRI v technických aplikáciách patrí absencia ionizujúceho žiarenia. Vďaka tomu je MRI metóda neinvazívna a bezpečná pre opakované merania, čo je výhodné najmä pri práci s biologickými vzorkami alebo pri sledovaní dlhodobých zmien v materiáloch. Okrem toho MRI poskytuje vysoký kontrast pre materiály obsahujúce vodík, umožňuje dynamické sledovanie procesov v reálnom čase a vytvára detailné 2D a 3D obrazy bez potreby narušenia skúmaného objektu. Na druhej strane sú nevýhodami vysoké obstarávacie a prevádzkové náklady, obmedzená použiteľnosť pre kovové materiály a materiály s nízkym obsahom vodíka, ako aj citlivosť na pohyb skúmaného objektu počas merania. [43; 46]

2.3 POROVNANIE VYBRANÝCH 3D SKENOVACÍCH TECHNOLOGIÍ

Pre lepšie pochopenie rozdielov medzi jednotlivými technológiami 3D skenovania je v Tab. 1 uvedené porovnanie najvýznamnejších metód, ktoré boli popísané v predchádzajúcich kapitolách. Porovnanie zahŕňa základný princíp merania, typickú presnosť, približnú cenu zariadení, ako aj výhody, nevýhody a príklady praktického uplatnenia.

Technológia	Typ merania	Presnosť	Cena zariadenia	Výhody	Nevýhody	Typické aplikácie
CMM (Kontaktné)	Kontaktné	±1–5 μm	20 000 €+	Vysoká presnosť, ideálne pre metrológiu	Pomalé, nevhodné pre mäkké objekty	Metrológia, kontrola kvality
Laserová triangulácia	Bezkontaktné	±10–30 μm	5 000 – 30 000 €	Rýchlosť, vhodné pre reflexné povrchy	Citlivosť na prostredie, kratší dosah	Reverzné inžinierstvo, technické súčiastky
Štruktúrované svetlo	Bezkontaktné	±20–50 μm	3 000 – 80 000 €	Rýchle snímanie plôch, vhodné pre menšie objekty	Citlivosť na farbu a osvetlenie	Reverzné inžinierstvo, medicína, kontrola kvality
Time-of-Flight	Bezkontaktné	±5–10 mm	200 – 5 000 €	Lacné, vhodné na veľké vzdialenosti	Nízka presnosť, ovplyvnené svetlom	Robotika, virtuálna realita, navigácia
Fotogrametria	Bezkontaktné	±100–300 μm	1 000 – 10 000 €	Nízka cena, flexibilita	Závislosť od osvetlenia a kvality snímok	Archeológia, architektúra, výskum
CT skenovanie	Bezkontaktné	±1–10 μm	100 000 €+	Zachytáva aj vnútorné štruktúry	Vysoká cena, veľké rozmery zariadenia	Defektoskopia, medicína

Tab. 1: Porovnanie najvýznamnejších skenovacích metód [25; 57; 58; 59; 60]

3 SKENOVANIE A TLAČ SÚČIASTKY Z HISTORICKÉHO VOZIDLA

Cieľom tejto časti je aplikovať získané teoretické poznatky pri digitalizácii konkrétneho objektu – posilňovača riadenia z vozidla Mercedes-Benz W201 190D z roku 1985 zobrazeného na Obr. 19.

Keďže ide o starší automobil, náhradné diely k nemu už nie sú bežne dostupné. Presné 3D nasnímanie tejto súčiastky je preto ideálnym spôsobom, ako vytvoriť jej digitálnu kópiu ktorú by následne bolo možné využiť pri výrobe náhradného dielu pomocou technológie reverzného inžinierstva. Nasledujúce podkapitoly popisujú výber technológie, prípravu skenovania, použitý hardvér a softvér, ako aj samotný proces digitalizácie a následného spracovania dát.



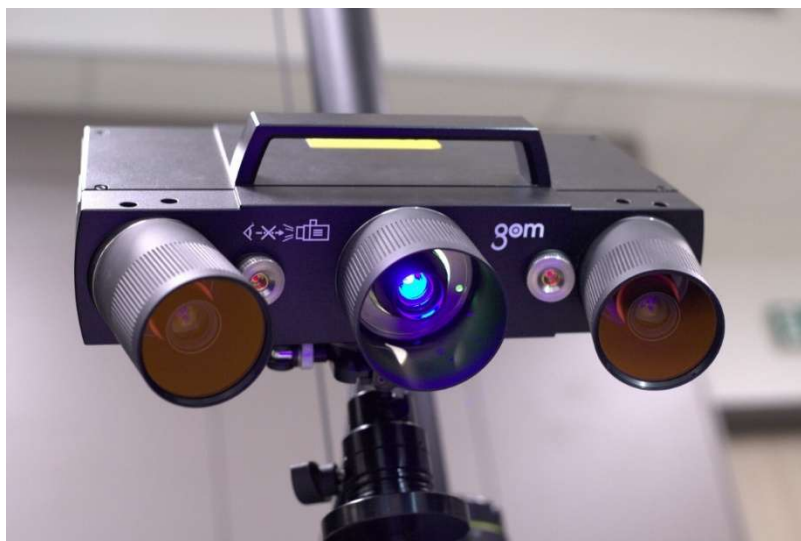
Obr. 19: Posilňovač riadenia z vozidla Mercedes Benz W201 190D [47]

3.1 POUŽITÁ TECHNOLOGIA A PRÍPRAVKY PRE SKENOVANIE

Na digitalizáciu posilňovača bol použitý optický 3D skener ATOS Q 12M (Obr. 20) od spoločnosti ZEISS, ktorý pracuje na princípe projekcie štruktúrovaného modrého svetla (*Blue Light Technology*). Tento princíp umožňuje presné optické meranie pomocou svetelných pruhov premietaných na povrch objektu, pričom modré svetlo minimalizuje vplyv okolitého osvetlenia a zvyšuje kvalitu merania pri opticky náročných povrchoch, akými sú lesklé povrchy súčiastok alebo tmavé vnútorné otvory. [25]

Skener je vybavený dvoma kamerami s rozlíšením 12M, ktoré pri jednom skene dokážu zachytiť až 24 miliónov súradnicových bodov. Každá kamera má rozlíšenie 12 miliónov pixelov, pričom výsledný počet bodov pri jednom skene je dvojnásobný – teda 24 miliónov – vďaka kombinácii dát z oboch kamier. Vďaka kompaktným rozmerom a hmotnosti približne 4 kg je ľahko manipulovateľný a vhodný na použitie v ručnom, poloautomatizovanom, aj plne automatizovanom režime. [48]

3D skener umožňuje výmenu objektívov, vďaka čomu je možné voliť medzi tromi rôznymi meracími objemami podľa veľkosti a zložitosti skenovaného objektu [48]. Táto flexibilita umožňuje optimalizovať rozlíšenie aj rozsah snímania pre konkrétnu aplikáciu. V rámci tohto merania bol použitý stredný merací objem, ktorý najlepšie zodpovedal rozmerom a detailom posilňovača riadenia.



Obr. 20: 3D skener ATOS Q 12M od spoločnosti ZEISS

Počas merania bol skener pripravený na mechanicky nastaviteľný posuvný stojan, ktorý umožňoval vertikálny pohyb, horizontálny posuv, a otáčanie okolo zvislej osi, čím sa zjednodušila manipulácia pri snímaní z rôznych uhlov. Na konci výškovo nastaviteľnej tyče bol umiestnený guľový kĺb, ku ktorému bol pripojený samotný skener. Tento kĺb umožnil presné a plynulé naklonenie alebo otočenie skenera v ľubovoľnom smere.

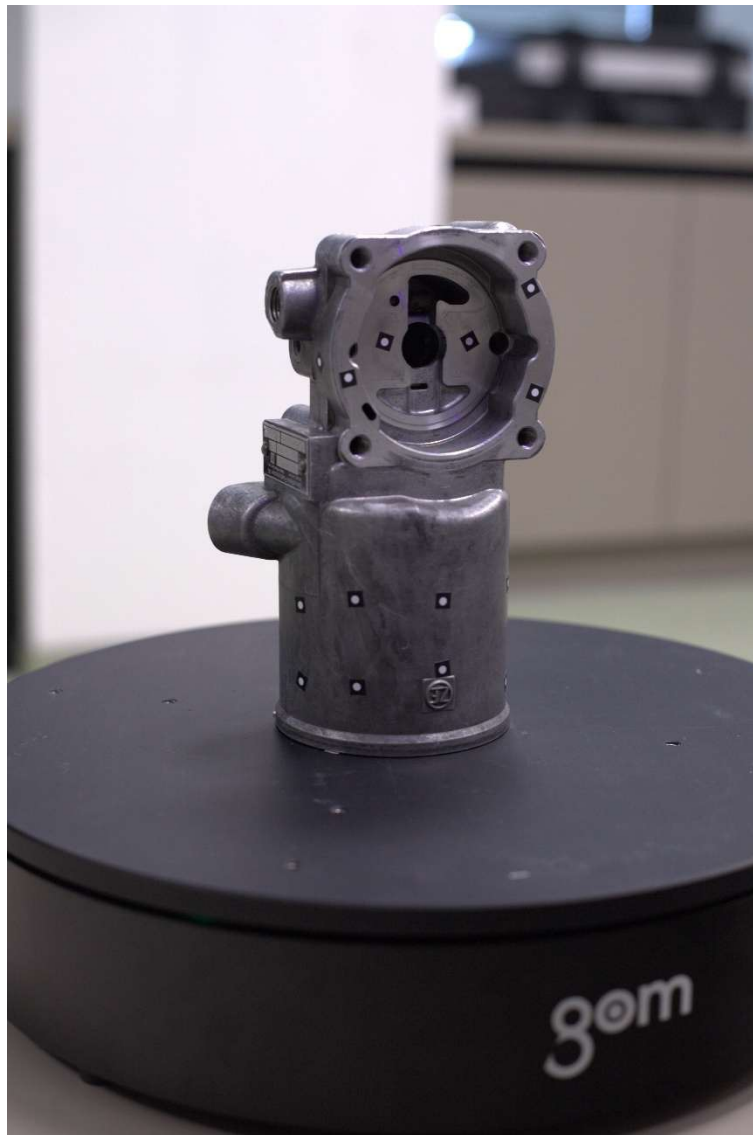


Obr. 21: Zachytený moment skenovania pomocou optického 3D skenera ATOS Q 12M, ktorý je pripravený na nastaviteľnom stojane. Snímaná súčiastka je uložená na rotačnom stolíku a pevne uchytená v pomocnom zveráku

Využitý bol aj rotačný stolík, ktorý umožňoval otáčanie súčiastky bez nutnosti ručnej manipulácie so skenerom. To zabezpečilo plynulý zber dát z viacerých uhlov, čo bolo kľúčové najmä pri komplexnejších geometriách.

Na skenovanie bola využitá aj funkcia automatizovaného otáčania rotačného stolíka, ktorá umožňuje nastavenie počtu otočení a uhla medzi otočeniami. Po spustení skenovania sa celý proces vykonával automaticky – skener vykonal meranie a následne sa stolík otočil o vopred definovaný počet stupňov, pričom tento cyklus sa opakoval, až kým sa nenazbierali všetky potrebné dáta.

Ďalej bol pri skenovaní použitý zverák, ktorý slúžil na pevné uchytenie menších alebo tvarovo zložitých súčiastok. Jeho využitie bolo nutné pri súčiastkach, ktoré nebolo možné položiť voľne na rotačný stolík bez rizika pohybu počas merania. Zverák mal na svojom povrchu vopred nalepené referenčné body, ktoré pomáhali softvéru lepšie a jednoduchšie prepojiť skeny z rôznych uhlov do jedného uceleného 3D modelu. V prípadoch, kde to tvar súčiastky umožňoval, sa skenovanie realizovalo aj bez jeho použitia.



Obr. 22: Očistené telo čerpadla s aplikovanými referenčnými bodmi pripravené na skenovanie pomocou funkcie automatického otáčania rotačného stolíku

Nevýhodou tohto riešenia však bolo, že samotný zverák bol vždy pri skenovaní zachytený kamerou spolu so skenovanou súčiastkou a zobrazoval sa aj v získaných dátach. Z tohto dôvodu bolo potrebné po dokončení skenovania manuálne odstrániť zverák pomocou funkcií na selekciu a orezanie mračna bodov, aby sa získal čistý model samotnej súčiastky bez rušivých prvkov.

Vzhľadom na kovový povrch súčiastky bolo v niektorých prípadoch potrebné aplikovať antireflexné nástreky, ktoré eliminovali nežiaduci odraz svetla z povrchu a zlepšili kvalitu merania. Sprej na báze titánu bol použitý pre náročnejšie časti, kde bolo potrebné dosiahnuť vyššiu kryciu schopnosť a kontrast. Po nástreku museli byť referenčné body očistené, inak by mohlo dôjsť k ich chybnému nasnímaniu.



Obr. 23: Aplikácia antireflexného nástreku na menšiu časť tela čerpadla

3.2 POSTUP DIGITALIZÁCIE SÚČIASTKY

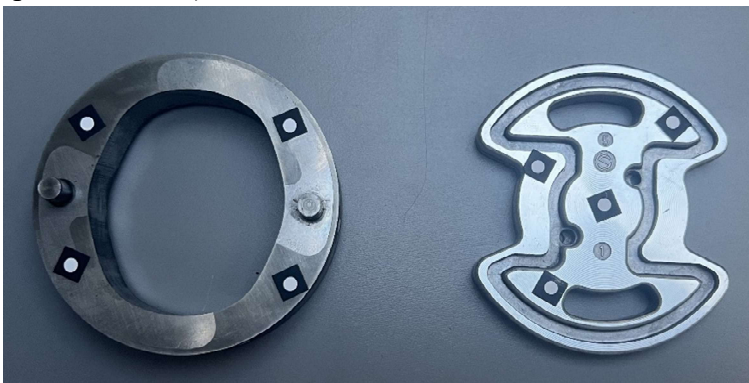
Pred samotným skenovaním bolo potrebné pripraviť demontovaný diel na digitalizáciu. V prvom kroku bola dôkladne očistená od mastnoty, prachu, prevádzkových zvyškov a nečistôt, ktoré by mohli negatívne ovplyvniť kvalitu optického skenovania. Následne bola súčiastka rozobratá na jednotlivé diely, aby bolo možné samostatne nasnímať aj jej ťažšie prístupné alebo vnútorné časti. Každý z týchto dielov bol opakovane čistený, najmä od zvyškov hydraulického oleja, aby sa dosiahol čo najlepší kontrast pre skener.

Po vyčistení boli jednotlivé komponenty označené referenčnými bodmi vo forme samolepiacich značiek. Tieto body slúžili na presné určenie polohy objektu v priestore a uľahčili automatické spájanie viacerých skenov v softvéri. Vďaka nim bolo možné jednotlivé zábery efektívne zlúčiť do jedného uceleného a priestorovo presného 3D modelu.



Obr. 24: Posilňovač riadenia rozobratý na jednotlivé diely

Skenované boli celkovo štyri časti posilňovača riadenia. Prvými boli dve časti telesa čerpadla (*pump housing*) – konkrétne väčší a menší diel krytu zobrazené na Obr. 24 vľavo a v strednej časti. Tretím skenovaným komponentom bolo uloženie rotora čerpadla s vyvýšenými kolíkmi (vpravo dole) a poslednou časťou bol protikus, do ktorého sa uloženie rotora vkladá a ktorý zároveň slúži aj ako uloženie pre tesnenie a distribúciu hydraulického kvapaliny (vpravo v strede).



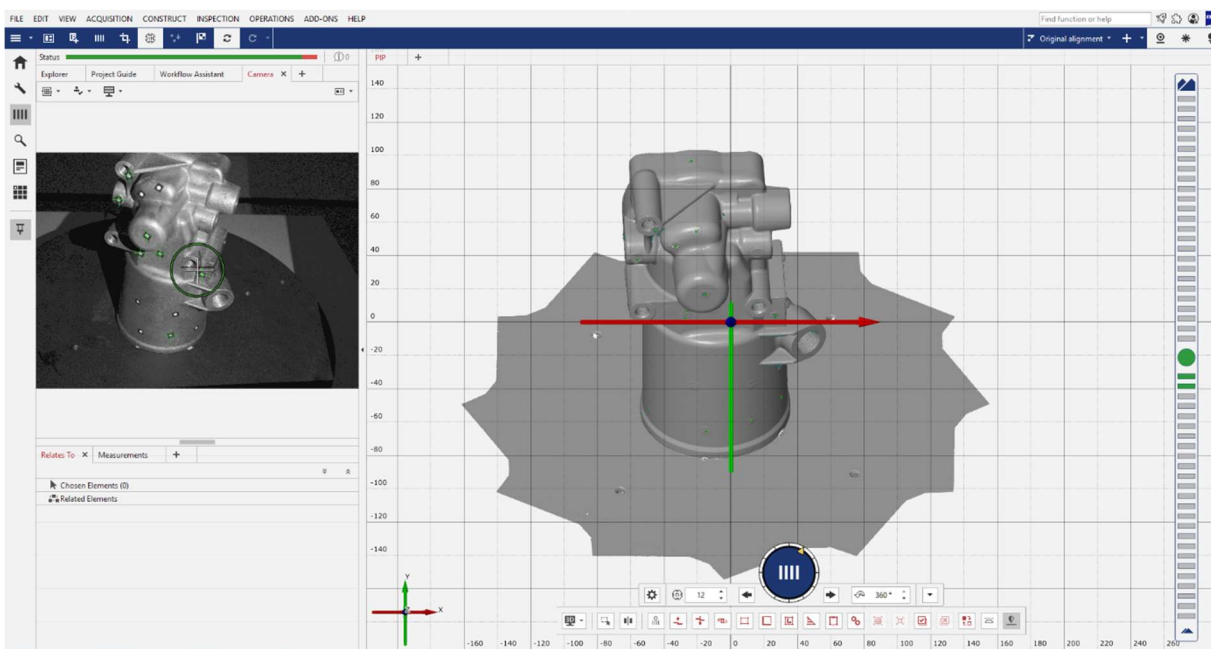
Obr. 25: Uloženie rotora čerpadla a jeho protikus



Obr. 26: Súčiastky uložené v ich pracovnej pozícii

Počas celého procesu skenovania bol používaný softvér ZEISS Inspect, ktorý slúžil na zobrazovanie a kontrolu nasnímaných dát v reálnom čase. Softvér, ktorého prostredie je zobrazené na Obr. 27, zobrazoval iba tie časti objektu, ktoré už boli skenerom zachytené, zatiaľ čo nenaskenované oblasti sa na priebežnom 3D modeli nezobrazovali, čím vznikali viditeľné prázdne miesta. Na základe týchto medzier bolo možné presne určiť, ktoré časti je ešte potrebné doplniť ďalším skenom, aby bol výsledný model úplný a použiteľný pre ďalšie spracovanie.

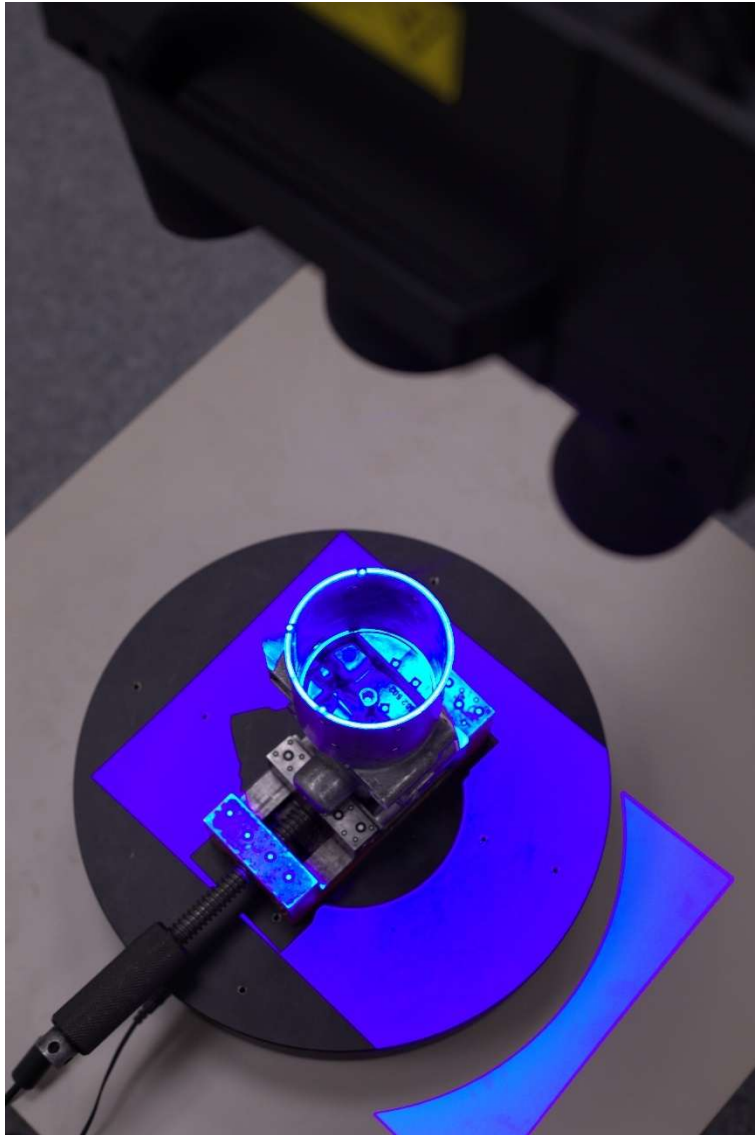
Pri skenovaní väčšej časti telesa čerpadla bol použitý rotačný stolík, na ktorý bola súčiastka umiestnená v obrátenej polohe. V tomto nastavení sa využila funkcia automatického otáčania, pričom sa súčiastka otáčala o vopred definovaný uhol. Skener pri každom kroku zaznamenal časť povrchu, čím sa dosiahlo skenovanie vonkajšieho obvodu komponentu. Takto bolo možné nasnímať väčšinu vonkajšej geometrie a bočných stien súčiastky bez nutnosti manuálneho zásahu.



Obr. 27: Zobrazenie výstupu skenovania hlavnej časti telesa čerpadla v softvéri ZEISS INSPECT. V ľavej časti je vizualizovaný náhľad z kamery so zaznamenanými referenčnými markermi

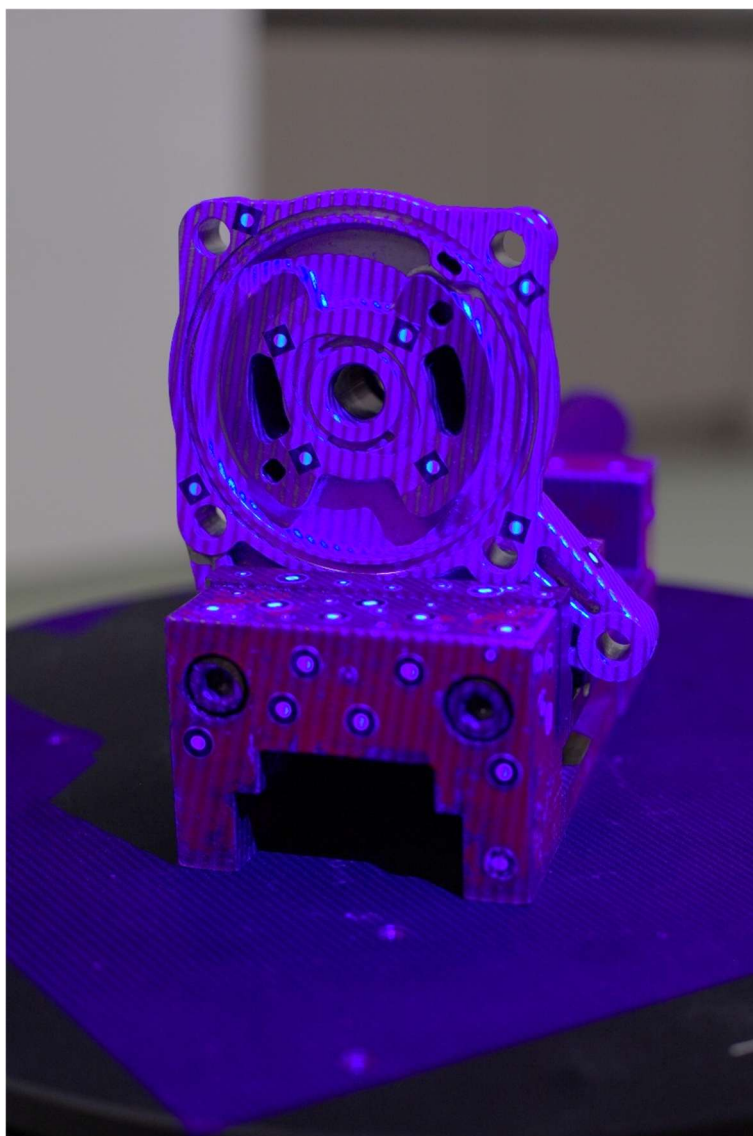
Následne bola súčiastka otočená do svojej bežnej pracovnej polohy a uchytená do zveráka oblepeného referenčnými bodmi. V tejto polohe prebehlo opätovné skenovanie z rôznych uhlov, ktorého cieľom bolo prepojiť nasnímané dáta medzi súčiastkou a zverákom a zároveň zachytiť vrchnú časť valcovitej komory, ktorá bežne slúži ako úložisko hydraulikkej kvapaliny. Tento krok bol dôležitý pre dosiahnutie modelu, v ktorom boli skeny z rôznych polôh presne priestorovo zarovnané. V poslednej fáze skenovania bol skener nasmerovaný kolmo smerom dovnútra súčiastky.

Cieľom bolo zachytiť vnútornú geometriu pumpy a prepojiť ju s bodmi, ktoré boli predtým zoskenované na vrchnej hrane valcovitého priestoru, prípadne bodmi zo zveráku. Tento proces si vyžadoval viaceré opakovania s malým posúvaním polohy a uhla skenera, keďže niektoré časti vnútra boli ťažko prístupné a nebolo možné ich nasnímať priamo. Napriek viacerým cyklom snímania zostali niektoré úseky vnútorného priestoru čiastočne nezachytené, najmä v úzkych alebo zatienených oblastiach, kam lúče štruktúrovaného svetla nemali priamy prístup.



Obr. 28: Skenovanie vnútornej časti tela čerpadla

Menšia časť čerpadla bola skenovaná jednoduchším spôsobom, nakoľko jej tvar a veľkosť umožňovali stabilné uloženie priamo na rotačný stolík. Komponent bol najprv umiestnený v základnej polohe a pomocou funkcie automatického otáčania bol nasnímaný jeho povrch zo všetkých strán. Po dokončení prvého cyklu bol diel ručne otočený do inej polohy tak, aby bolo možné zaznamenať aj už naskenované plochy a zabezpečiť ich správne prepojenie. Pre zachytenie vnútornej geometrie bolo potrebné súčiastku dodatočne uchytiť do zveráka, ktorý umožnil natočenie komponentu do vhodnej polohy pre nasnímanie menej prístupných oblastí. Na Obr. 29 je vidieť premietaný vzor štruktúrovaného svetla generovaný 3D skenerom počas snímania.



Obr. 29: Menšia časť tela servočerpadla uchytená v zveráku kvôli potrebe presného zachytenia vnútornej geometrie

Zvyšné dve časti – samotné uloženie rotora a jeho protikus – mali jednoduchšiu vonkajšiu geometriu a celkovo menšie rozmery. Napriek tomu by ich presné 3D modelovanie iba podľa meraní bolo komplikované a nepresné. Z dôvodu vytvorenia presného digitálneho modelu boli tiež opticky naskenované.

Súčiastky boli počas skenovania uchytené do zveráka alebo voľne položené na stolík. Na povrch dielov bolo nalepených niekoľko referenčných bodov, čo postačovalo na spoľahlivé prepojenie skenov bez potreby ďalších podporných prvkov. Vzhľadom na tvarovú jednoduchosť stačilo polohu zmeniť len raz a to otočenie na opačnú stranu.

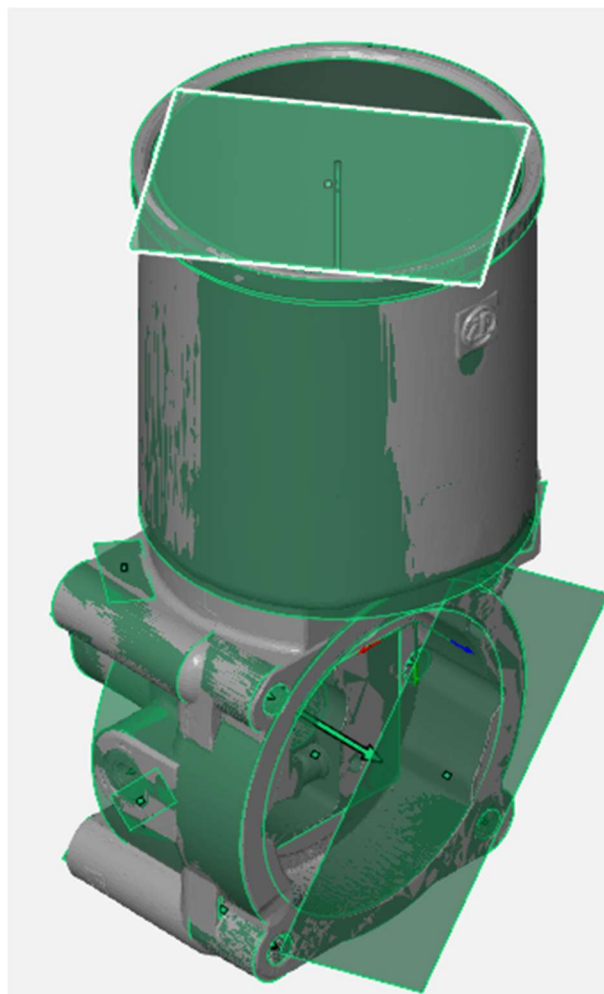
Po ukončení skenovania boli dáta zo zariadenia spracované v softvéri ZEISS Inspect 2023, kde boli jednotlivé skeny automaticky zarovnané na základe referenčných bodov a zlúčené do jedného uceleného 3D modelu siete. Následne bol vytvorený projekt exportovaný a ďalej použitý na podrobnejšie spracovanie v softvéri GOM Inspect.

3.3 SPRACOVANIE DÁT V SOFTVÉRI GOM INSPECT

Po otvorení súboru v GOM Inspect boli po načítaní skenu pomocou nástrojov na orezávanie odstránené nežiaduce fragmenty siete, ktoré vznikli v dôsledku zaznamenania pomocných prvkov. Išlo napr. o podložku, na ktorej boli súčiastky počas skenovania položené alebo o pomocný zverák.

Následne boli funkčné plochy naskenovaného modelu preložené geometriou. Tento krok musel byť urobený z dôvodu, aby pri spätnom modelovaní nemuseli byť rozmery otvorov a ich rozteče manuálne a iteračne merané, ale aby boli zachytené ich základné rozmery. Boli použité najmä funkcie *fitting cylinder* a *fitting plane*.

Prvá z funkcií bola použitá na zarovnanie valcových otvorov, ako sú závitové a vnútorné diery. Druhá bola aplikovaná na rovinné plochy, najmä tie, ktoré budú slúžiť ako dosadacie plochy medzi časťami telesa servočerpádky.



Obr. 30: Model väčšej časti tela servočerpádky s preloženými funkčnými plochami geometriou

Ďalej bol v programe vytvorený nový súradnicový systém, ktorý bol zarovnaný podľa vybraných geometrických prvkov. Tým sa uľahčila ďalšia práca s modelom, najmä pri vyhodnocovaní, meraní a exporte.

Po preložení všetkých dôležitých plôch boli pomocou ďalších funkcií programu uzatvorené všetky nežiaduce otvory a chyby v sieti. Funkcia *Close Holes Automatically* umožnila uzatvorenie väčšiny chýb v sieti, no nedokázala opraviť väčšie chyby, ktoré vznikli v dôsledku

neprístupnosti niektorých oblastí pre skener. Všetky tieto otvory väčších rozmerov museli byť manuálne uzatvorené a neskôr vymodelované.

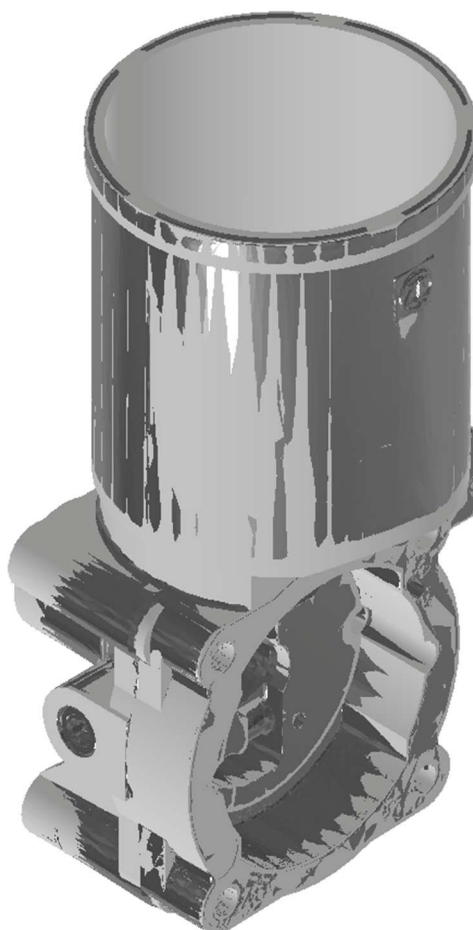
Po úprave a kompletizácii modelu bol výsledok exportovaný v dvoch formátoch:

- STL – trojuholníková sieť, ktorá neskôr slúži ako referenčný model.
- IGES formát obsahujúci len preloženú geometriu vo forme rovín a valcov.

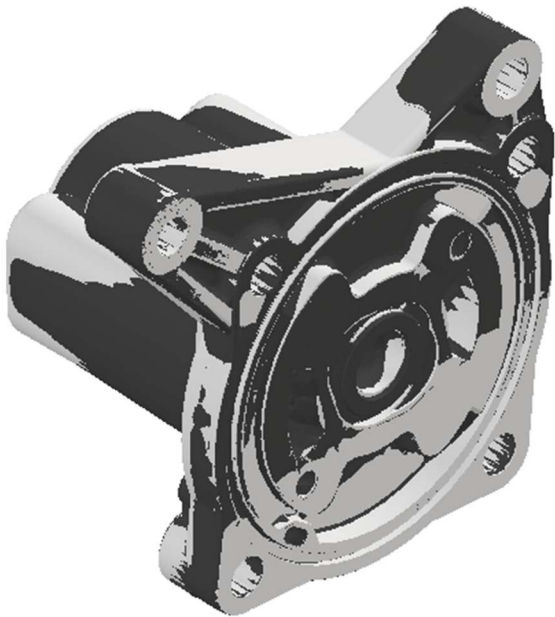
3.4 IMPORT MODELU A PREMODELOVANIE SÚČIASTKY V AUTODESK INVENTOR

Po exportovaní dát z GOM Inspect boli oba formáty – STL aj IGES – importované do softvéru Autodesk Inventor, kde prebehlo ich ďalšie spracovanie. Oba formáty boli zarovnané podľa referenčných rovín, aby sa vzájomne prekryli a mohli byť použité ako podklad pre presné modelovanie. STL model, ktorý obsahoval detailnú sieť pôvodne naskenovaného objektu, slúžil najmä ako vizuálna a tvarová referencia pre konštrukciu presnej CAD geometrie, zatiaľ čo IGES súbor poskytoval základné prvky ako roviny a valce definované pomocou preloženej geometrie.

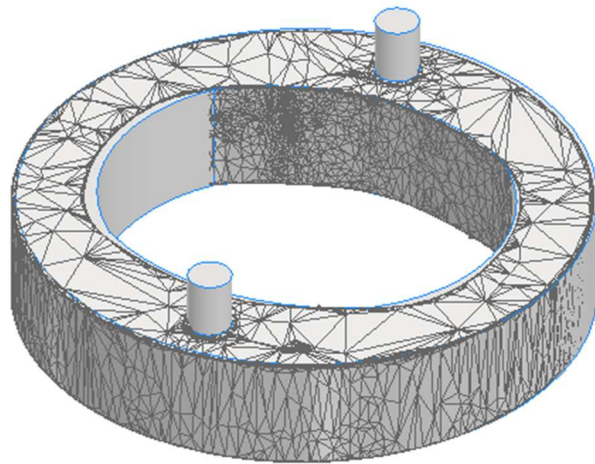
Na tomto základe bola v Autodesk Inventore následne vymodelovaná geometria väčšej aj menšej časti telesa čerpadla, pričom sa dôsledne rešpektovali rozmery a tvary podľa STL referencie. Rovnakým spôsobom bolo vymodelované aj uloženie rotora, ktoré sa taktiež zakladalo na kombinácii preloženej geometrie a STL šablóny.



Obr. 31: Vymodelovaná väčšia časť tela čerpadla zarovnaná so svojim referenčným modelom

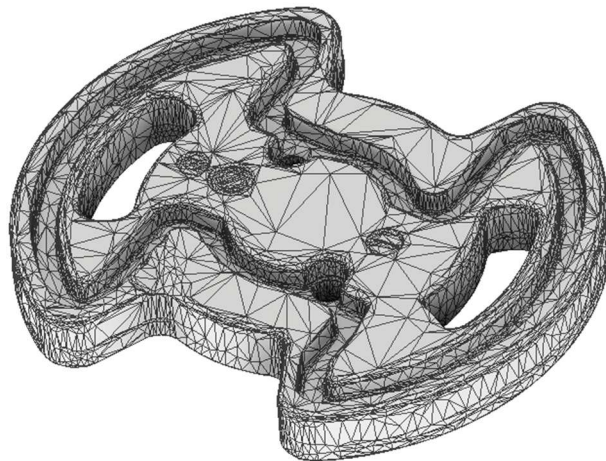


Obr. 32: Model menšej časti telesa čerpadla zarovnaný s referenčným modelom získaným zo 3D skenovania



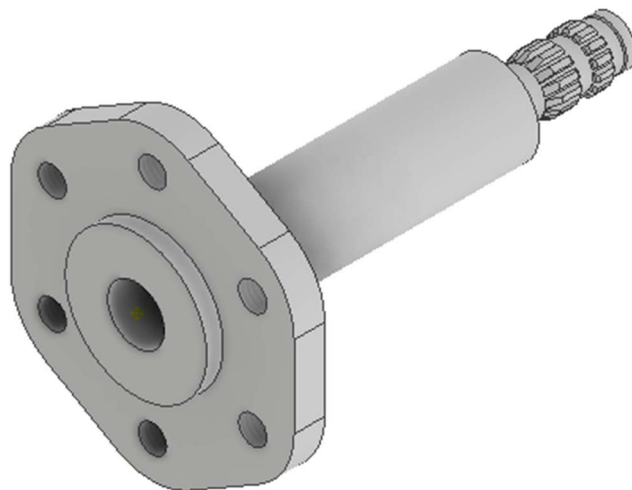
Obr. 33: Vymodelované uloženie rotora telesa s referenčným modelom

Protikus uloženia rotora bol spracovaný mierne odlišne. Keďže jeho sken predstavoval kompletne uzavretý model bez vnútorných skrytých otvorov alebo defektov v sieti, bolo možné sieťový model priamo previesť na objemové teleso (*solid body*) pomocou doplnkovej funkcie *Mesh Enabler* v Autodesk Inventore.



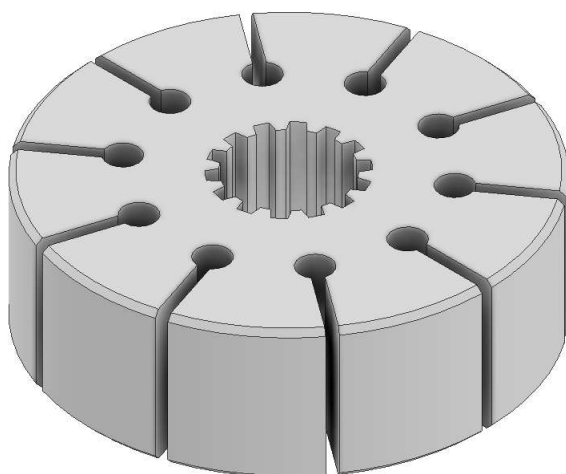
Obr. 34: Prekonvertovaný model protikusu uloženia rotora

Ostatné súčiastky, ktoré neboli geometricky zložité boli vymodelované manuálne, pomocou merania posuvným meradlom. Ide konkrétne o hriadeľ s ozubením, ktorá slúži na prenos krútiaceho momentu od klinového remeňa.

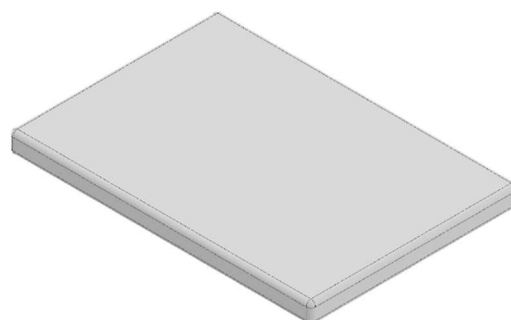


Obr. 35: Vymodelovaný hriadeľ

Rovnakým spôsobom bol vymodelovaný rotor čerpadla a jeho vyberateľné lopatky, ktoré zabezpečujú cirkuláciu a plynulý prietok hydraulickéj kvapaliny vnútri systému.



Obr. 36: Model rotoru



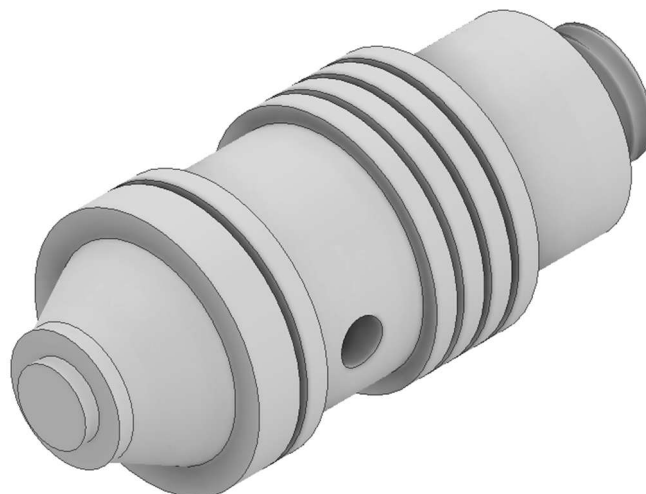
Obr. 37: Model lopatky

Ďalšou modelovanou súčiastkou bol kryt určený na zakrytie nádržky hydraulickéj kvapaliny



Obr. 38: Model krytu nádržky na hydraulickú kvapalinu

Poslednou takto modelovanou súčiastkou je tlakový ventil ktorý zabezpečuje reguláciu maximálneho tlaku v hydraulickom systéme. Jeho hlavnou funkciou je ochrana systému pred pretlakom, udržiavanie stabilného pracovného tlaku a zabezpečenie plynulého chodu posilňovania riadenia počas jazdy. V prípade náhleho zvýšenia tlaku ventil prepustí kvapalinu späť do obehu, čím chráni komponenty pred poškodením.[49]



Obr. 39: Model tlakového ventilu

Po dokončení modelovania všetkých súčiastok boli jednotlivé komponenty exportované vo formáte STL, ktorý je štandardom pre prípravu objektov na aditívnu výrobu.

3.5 PRÍPRAVA DÁT A NASTAVENIE PARAMETROV TLAČE

Po dokončení procesu modelovania boli jednotlivé súčiastky pripravené na výrobu pomocou 3D tlače. Na tento účel bola použitá 3D tlačiareň *Bambu Lab P1S* v kombinácii s filamentom typu *Sunlu PLA Basic*. Ako tlačová podložka bola použitá hladká PEI⁶ (*Smooth PEI plate*), ktorá zabezpečuje spoľahlivú príľnavosť tlačných dielov k podložke a jednoduché odstránenie modelov po dokončení tlače.



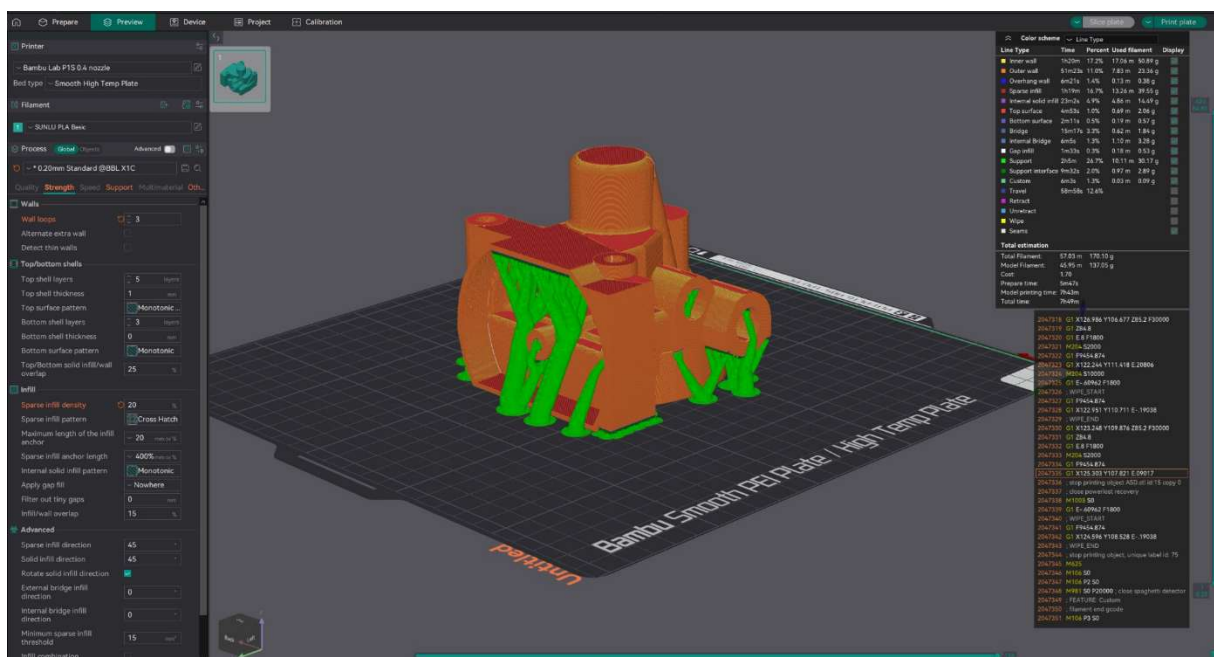
Obr. 40: Tlačiareň Bambu Lab P1S [61]

Príprava pred tlačou zahŕňala niekoľko nevyhnutných krokov, ktoré zabezpečili optimálnu kvalitu a pevnosť vytlačených dielov. Najskôr bola vykonaná kalibrácia filamentu pomocou testov *Pressure Advanced Test* a *Flow Rate Test*, ktoré sú súčasťou softvéru *Orca Slicer*.

Pressure Advanced Test bol použitý na stanovenie optimálnej hodnoty kompenzácie tlaku v tryske extrúdera, pričom výsledná ideálna hodnota bola určená na 0,015. Ide o bezrozmerný parameter v softvéri *Orca Slicer*, ktorý slúži na kompenzáciu oneskorenia výtláčného tlaku v tryske počas zmien rýchlosti pohybu tlačovej hlavy. *Flow Rate Test* slúžil na kalibráciu množstva vytláčaného materiálu, pričom optimálna hodnota prietoku filamentu pre tento konkrétny materiál bola určená na 0,98.

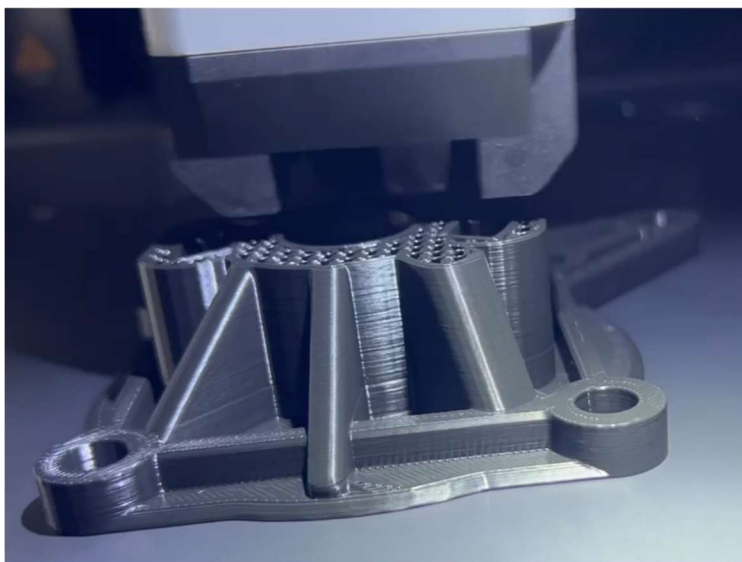
Pred samotnou tlačou boli všetky modely nasliceované v softvéri *Orca Slicer*, ktorý prevádza 3D model do formátu G-code, teda na sekvenciu príkazov, ktoré určujú trajektóriu pohybu trysky, množstvo extrudovaného materiálu, rýchlosti, výšku vrstvy a ďalšie tlačové parametre. Tento proces je nevyhnutný, keďže samotná 3D tlačiareň nedokáže interpretovať 3D modely (napr. vo formáte STL) bez prevodu do strojového jazyka. Počas slicovania sa model rozdelí na horizontálne vrstvy a pre každú vrstvu sa vypočíta presná dráha tlače, výplň, podporné štruktúry a ďalšie detaily.

⁶ Polyetherimide
BRNO 2025



Obr. 41: Náhľad modelu tela čerpadla v prostredí Orca Slicer počas slicovania. Zobrazené sú podporné štruktúry (zelenou) a rozvrhnutie vrstiev modelu (červenou a oranžovou), ako aj nastavenia výplne, stien a podpor určené pre optimalizovanú 3D tlač

Po kalibrácii bol použitý štandardný tlačový profil „20 mm“ dostupný v softvéri *Orca Slicer*. Daný profil bol následne upravený pre potreby súčiastok tlačných v rámci tejto práce. Konkrétne bola nastavená hrúbka steny na dve vrstvy, čím sa zabezpečila vyššia pevnosť tlačných dielov. Vnútrorná výplň modelov bola nastavená na hodnotu 20 % a ako vzor výplne bol zvolený „crosshatch“, ktorý poskytuje rovnomernú pevnosť dielov vo všetkých smeroch.



Obr. 42: Tlač časti krytu čerpadla s viditeľnou výplňou typu „crosshatch“

Na tlač komplexnejších geometrií a previsov bolo nutné použiť podporné štruktúry, ktoré boli nastavené ako stromové. Nastavené parametre podpôr boli optimalizované tak, aby poskytovali dostatočnú stabilitu počas tlače, ale zároveň umožnili jednoduché a rýchle odstránenie z hotových súčiastok.



Obr. 43: Tlač modelu pretlakového ventil s využitím stromových podpôr

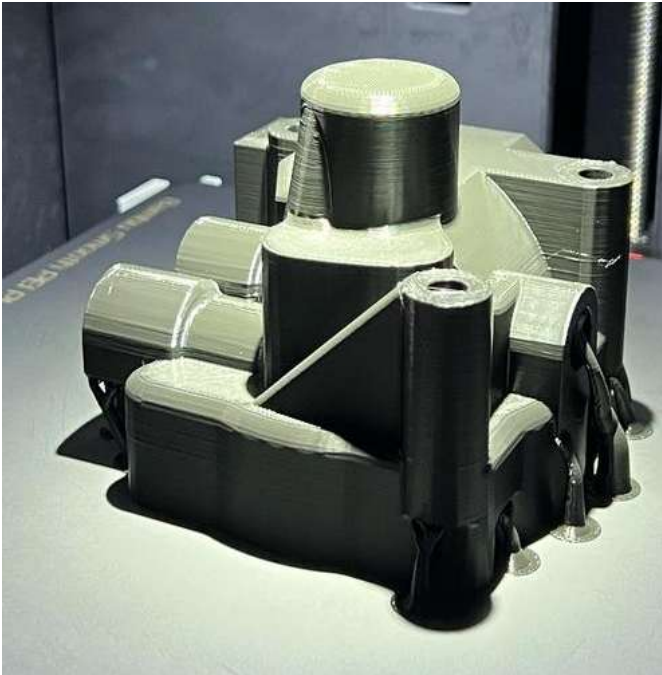
Pre správnu tlačovú teplotu filamentu bola použitá odporúčaná hodnota výrobcu, pričom pre overenie vhodnosti teplotného rozsahu bol predtým vytlačený testovací model tzv. *temperature tower*, ktorý umožňuje porovnanie kvality tlače pri rôznych teplotách extrúzie. Pri testovaní sa ukázalo, že filament *Sunlu PLA Basic* poskytuje stabilné výsledky v širokom teplotnom rozmedzí od 210 °C do 250 °C, pričom kvalita tlače sa naprieč týmto intervalom výrazne nelíšila.

Vzhľadom na to, že výsledná zostava slúži len ako referenčný model, bolo pri tlači súčiastok zohľadnené aj ekonomické hľadisko, predovšetkým úspora materiálu. Preto boli niektoré komponenty rozdelené na časti, vytlačené samostatne a následne spojené lepením. Tento postup šetril tlačový materiál a skracoval celkový čas tlače.

3.6 REALIZÁCIA 3D TLAČE SÚČIASTOK

Po úspešnej príprave a kalibrácii tlačových parametrov nasledovala samotná realizácia 3D tlače jednotlivých dielov posilňovača riadenia. Jedným z najväčších komponentov celej zostavy bolo telo čerpadla, ktorého geometrická zložitosť a rozmery si vyžadovali špecifický prístup k tlači. Pre zabezpečenie optimálneho výsledku a minimalizáciu potreby podporných štruktúr bolo telo čerpadla rozdelené na dve samostatne tlačené časti. Na rozdelenie STL modelu do dvoch segmentov bol použitý softvér Autodesk Fusion 360.

Prvá časť obsahovala všetky funkčné prvky a montážne plochy (Obr. 44), zatiaľ čo druhú tvorila nádržka na hydraulickú kvapalinu (Obr. 45). Toto rozdelenie bolo výhodné najmä v oblasti spojenia tela s krytom čerpadla, kde by sa pri tlači jedného celku vyžadovalo rozsiahle použitie podpor, čo by mohlo negatívne ovplyvniť kvalitu povrchu v presných kontaktných miestach. Umožnenie tlače funkčnej časti priamo na podložku zabezpečilo vyššiu kvalitu povrchu. Po vytlačení boli obe časti zlepené do jedného celku, čím vznikol ucelený model telesa čerpadla.

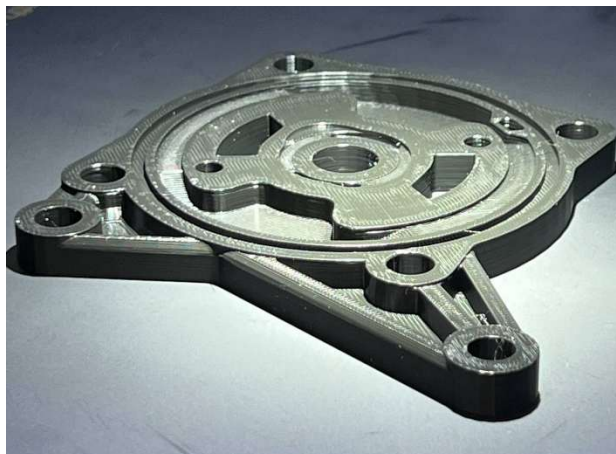


Obr. 44: Polovica tela čerpadla obsahujúca funkčné a montážne plochy



Obr. 45: Druhá časť tela čerpadla s nádržkou na hydraulickú kvapalinu

Kryt tela čerpadla bol taktiež rozdelený na dve samostatné časti a následne vytlačený samostatne. Spodná časť, zobrazená na Obr. 46, obsahovala zahĺbenia, kanály, vyvýšené a znížené plochy, ktoré by si pri jednorazovej tlači vyžadovali rozsiahle použitie podporných štruktúr. Druhá časť, predstavujúca väčšiu z dvojice, mala jednoduchšiu geometriu a bola definovaná najmä jedným priechodným otvorom, ktorý prechádzal naprieč celým dielom, a niekoľkými podpormi. Rozdelením modelu sa podarilo eliminovať potrebu nadmerného použitia podpor, čo prispelo k úspore materiálu a zároveň k vyššej kvalite povrchu v kontaktných oblastiach. Po vytlačení boli obe časti zlepené do finálneho celku.



Obr. 46: Spodná časť krytu čerpadla



Obr. 47: Vrchná časť krytu čerpadla

Hriadeľ čerpadla bola vzhľadom na svoju geometriu znovu rozdelená na dve samostatné časti, ktoré boli vytlačené osobitne a následne zlepené. Orientácia častí pri tlači bola zvolená s cieľom dosiahnuť čo najlepšiu kvalitu v oblasti montážnych plôch. Vonkajšia časť hriadeľa obsahuje vyvýšený osadený priemer pre uloženie remenice, ktorý slúži ako oporný prvok počas montáže vo vozidle. Tlač tejto oblasti bez podpôr by nebola možná bez zhoršenia povrchovej kvality.



Obr. 48: Vytlačený hriadeľ pred zlepením do celku



Obr. 49: Zhoršená kvalita tlače hriadeľa pri pokuse o tlač v jednom celku

Ako ukazuje Obr. 49, pri pokuse o tlač hriadeľa ako jedného celku došlo k zreteľnému zhoršeniu kvality povrchu v oblasti dosadacej plochy. Vytlačením tejto časti samostatne a v správnej orientácii na podložku sa podarilo zachovať čistotu geometrie a zabezpečiť dostatočnú vizuálnu aj tvarovú vernosť referenčného modelu.

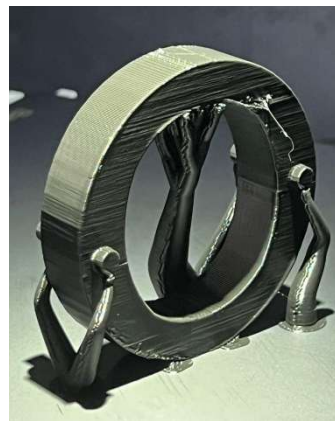
Rotor, jeho uloženie a protikus uloženia boli vytlačené ako samostatné diely bez potreby delenia. Tieto tri komponenty tvoria kľúčovú časť mechanizmu čerpadla, ktorý zabezpečuje prúdenie hydraulického kvapaliny. Rotor slúži na vedenie lopatiek, ktoré pri otáčaní vytvárajú objemové komory zodpovedné za nasávanie a výtlak kvapaliny. Bol tlačný bez podpôr.

Protikus rotora predstavuje stacionárnu časť s profilovanými dráhami, ktoré vedú lopatky a zároveň usmerňujú tok kvapaliny. Vďaka vhodnej geometrii nebolo potrebné použitie podpor ani v tomto prípade.

Uloženie rotora obsahuje montážne kolíky pre presné usadenie, ktoré znemožňovali uloženie priamo na podložku. Preto boli použité stromové podporné štruktúry, ktoré zabezpečili kvalitný výsledok bez deformácií. Všetky tri súčasti boli vytlačené ako funkčné referenčné modely v dostatočnej kvalite pre vizuálnu a montážnu prezentáciu.



Obr. 50: Vytlačený model rotora

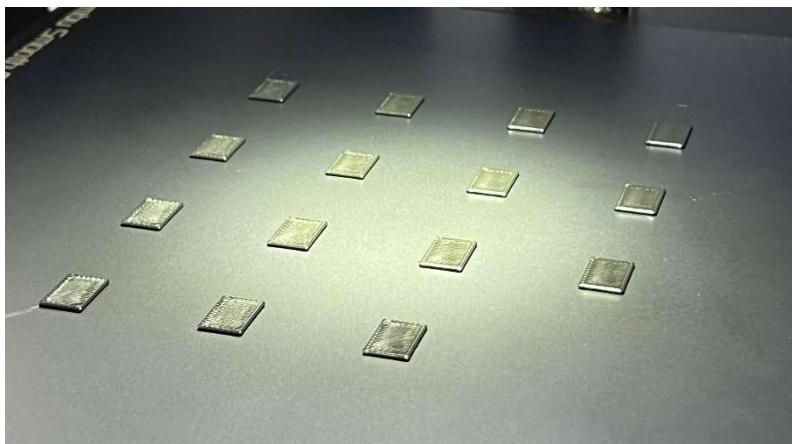


Obr. 51: Vytlačený model uloženia rotora so stromovými podporami



Obr. 52: Model protikusu uloženia rotora

Ako posledné boli vytlačené kryt nádržky hydraulického kvapaliny a lopatky rotora. Vzhľadom na malé rozmery lopatiek ($19 \times 9 \times 1$ mm) sa predpokladala zvýšená náročnosť ich tlače, avšak tlač prebehla bez akýchkoľvek problémov a všetkých 10 kusov bolo vytvorených s dostatočnou presnosťou.



Obr. 53: Vytlačené modely lopatiek rotora



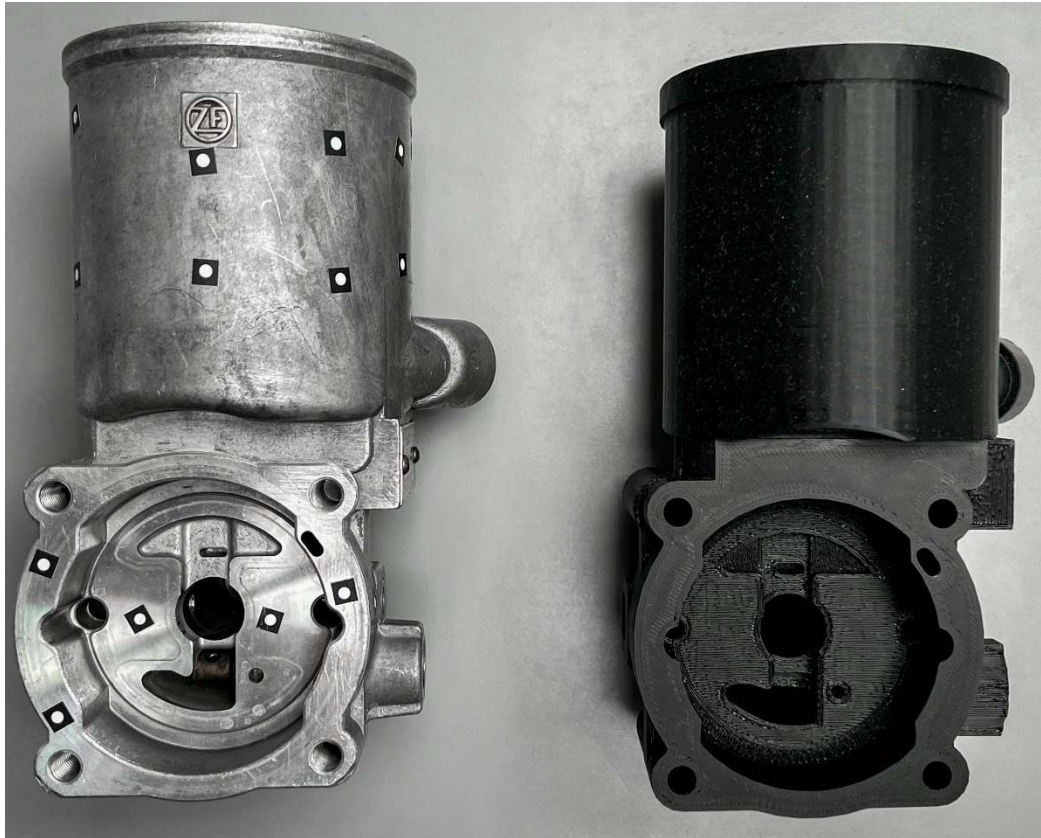
Obr. 54: Vytlačený model krytu nádržky so stromovými podporami

3.7 VYHODNOTENIE ZMONTOVATEĽNOSTI A PRESNOSTI MODELU

Po vytlačení všetkých jednotlivých dielov bola overená ich vzájomná zmontovateľnosť. Jednotlivé komponenty boli poskladané do zostavy s cieľom overiť presnosť modelov a funkčnosť celku. Všetky komponenty do seba zapadli presne a neboli potrebné žiadne dodatočné úpravy.

Niektoré časti dielov boli pri modelovaní zámerne zmenšené z dôvodu, že sa jedná o referenčný model, ktorý bude pri prezentovaní práce viackrát skladaný a rozoberaný. Konkrétne bol zmenšený priemer pretlakového ventilu a kolíky na uložení rotoru, ktorými sa uloženie spája so svojim protikusom a s krytom čerpadla. Každý z dielov bol zmenšený o 0,1 mm v mieste kde by dochádzalo ku kontaktu. Pretlakový ventil bol v pôvodnej súčiastke navrhnutý s uložením o veľmi malej vôli, čo spôsobovalo výrazný odpor pri demontáži – už pri rozobraní originálu vznikali ťažkosti s jeho vybratím. Zmenšením priemeru sa dosiahla primeraná montážna vôľa, ktorá zjednodušila manipuláciu bez vplyvu na vzhľad alebo základnú funkciu modelu.

Správnosť rekonštrukcie bola okrem montáže overená aj vizuálnym porovnaním originálnych komponentov s ich vytlačenými prototypmi, ktoré sú zachytené na nasledujúcich obrázkoch. Na Obr. 55 je zobrazené samotné telo servočerpadla – vľavo originálny kovový diel, vpravo jeho vytlačená plastová replika.

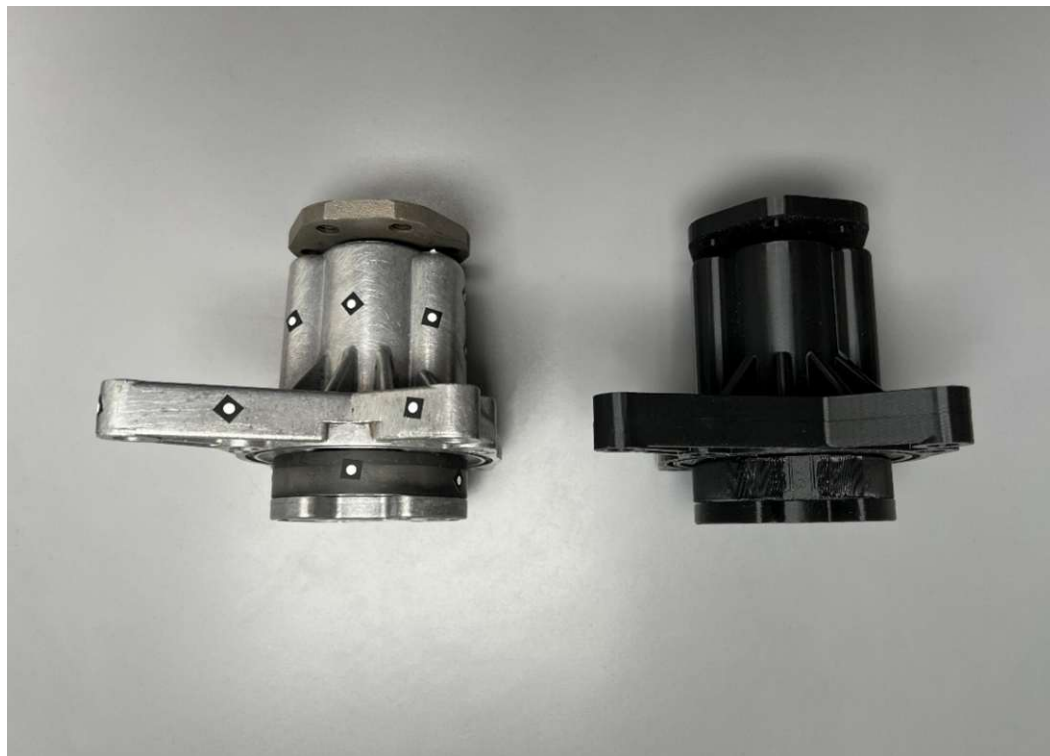


Obr. 55: Originálny model a referenčný model tela čerpadla

Ďalšie zobrazenie (Obr. 56, Obr. 57) zachytáva kompletnú zostavu pozostávajúcu z krytu čerpadla, rotora, uloženia rotora, jeho protikusu, hriadeľa a pretlakového ventilu. Opäť možno vidieť porovnanie originálnych dielov (vľavo) a vytlačeného modelu (vpravo).



Obr. 56: Model originálu a vytlačeného modelu zloženej zostavy servo-čerpadla



Obr. 57: Bočný pohľad na zložené zostavy

Tieto porovnania vizuálne potvrdzujú, že proces reverzného inžinierstva od skenovania cez modelovanie až po aditívnu výrobu prebehol úspešne a umožnil vytvoriť plnohodnotný referenčný model.

ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo praktické využitie moderných metód reverzného inžinierstva a 3D skenovania pri digitalizácii súčiastky veteránskeho vozidla Mercedes-Benz W201 190D z roku 1985. V rešeršnej časti boli podrobne analyzované rôzne typy 3D skenerov a ich využitie v technickej praxi. V praktickej časti bol úspešne realizovaný proces digitalizácie súčiastky pomocou optického skenera ATOS Q 12M. Výsledné dáta boli spracované a premodelované do CAD prostredia Autodesk Inventor, kde bol vytvorený presný digitálny model vhodný na výrobu náhradných dielov. Nakoniec boli jednotlivé komponenty vyrobené pomocou 3D tlače, čím sa preukázala vhodnosť tejto metódy pre výrobu nedostupných súčiastok historických vozidiel. Získané výsledky potvrdzujú efektivitu a presnosť vybranej metodiky a predstavujú dobrý základ pre ďalšie aplikácie reverzného inžinierstva v oblasti renovácie veteránov.

POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] ABDEL-BARYEBRAHIM, Mostafa. 3D Laser Scanners' Techniques Overview. *ResearchGate* [online]. 2013 [cit. 2025-02-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Mostafa-Ebrahim-3/publication/282753883_3D_Laser_Scanners'_Techniques_Overview/links/561b66cb08ae044edbb24210/3D-Laser-Scanners-Techniques-Overview.pdf
- [2] AUTODESK. AUTODESK. 3D laser scanning: Unleashing the power of precision. *Autodesk* [online]. [cit. 2025-04-19]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/solutions/3d-laser-scanning>
- [3] KONEVA, Varvara. What is laser 3D scanning? *Professional 3D scanning solutions | Artec 3D* [online]. [cit. 2025-04-02]. Dostupné z: <https://www.artec3d.com/learning-center/laser-3d-scanning>
- [4] MORTEZA DANESHMAND, Ahmed Helmi. Computer Science Computer Vision and Pattern Recognition. *ArXiv.org* [online]. 2018 [cit. 2025-02-10]. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/1801.08863v1>
- [5] EDL, Milan, Marek MIZERÁK a Jozef TROJAN. 3D LASER SCANNERS: HISTORY AND APPLICATIONS. *Acta Simulatio* [online]. 2018, 2018-12-31, **4**(4), 1-5 [cit. 2025-04-19]. ISSN 13399640. Dostupné z: doi:10.22306/asim.v4i4.54
- [6] RUSSMAN, Victoria. Key Applications of 3D Scanning Across Industries. *Nel PreTech* [online]. [cit. 2025-04-22]. Dostupné z: <https://www.nelpretech.com/blog/key-applications-of-3d-scanning-across-industries>
- [7] A Comparison of the Outputs of 3D Scanners. *Procedia Engineering* [online]. 2014, **2014**(69), 393-401 [cit. 2025-02-11]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.pro-eng.2014.03.004>
- [8] JANI, Gargi, Wenona Star LAVIN, Suresh LUDHWANI a Abraham JOHNSON. An Overview of Three Dimensional (3D) Technologies in Forensic Odontology. *Journal of Forensic Dental Sciences* [online]. 2020, 2020-04-22, 18-27 [cit. 2025-04-22]. ISSN 0975-2137. Dostupné z: doi:10.18311/jfds/12/1/2020.4
- [9] SCHWENKE, Heinrich, Ulrich NEUSCHAEFER-RUBE, Tilo PFEIFER a Horst KUNZMANN. Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering. *CIRP Annals* [online]. 2002, **51**(2), 685-699 [cit. 2025-04-03]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)61707-7
- [10] KUMAR, Kaushik, Divya ZINDANI a J. Paulo DAVIM. Rapid Prototyping, Rapid Tooling and Reverse Engineering. *From biological models to 3d bioprinters* [online]. 2020, **5**(5), 107-123 [cit. 2025-02-19]. Dostupné z: doi:10.1515/9783110664904.

- [11] MMSPEKTRUM. Digitalizace - její princip a rozdělení. *MMSpektrum* [online]. [cit. 2025-04-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-její-princip-a-rozdeleni>
- [12] SAYERS, Ian. How to Utilize Destructive 3D Scanning for Hidden Features. *Hawk Ridge Systems* [online]. [cit. 2025-04-03]. Dostupné z: <https://hawkridgesys.com/blog/how-to-utilize-destructive-3d-scanning-for-hidden-features>
- [13] URBÁNEK, ALEŠ. *KONTROLA SOUČÁSTÍ POMOCÍ METOD REVERZNÍHO INŽENÝRSTVÍ*. BRNO, 2008. Bakalárska práca. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ.
- [14] THORS ELEARNING SOLUTIONS. *THORS eLearning Solutions; YouTube* [online]. [cit. 2025-02-12]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=5F37vUEfxM0>
- [15] WINNDEAVOR. Different Types Of CMM And How They Are Used. *Winndeavor - Where Innovation Meets Precision* [online]. [cit. 2025-04-03]. Dostupné z: <https://winndeavor.com/different-types-of-cmm-and-how-they-are-used/>
- [16] CMMXYZ. Different Types of CMM Machines - How to choose a CMM Machine. *CMMXYZ* [online]. [cit. 2025-04-03]. Dostupné z: <https://www.cmmxyz.com/blog/different-types-of-cmm-machines-how-to-choose-a-cmm-machine/>
- [17] CREAFORM3D. WHAT IS A CMM? EVERYTHING YOU NEED TO KNOW ABOUT COORDINATE MEASURING MACHINES AND THEIR TYPES. *Creaform3D* [online]. [cit. 2025-04-03]. Dostupné z: <https://www.creaform3d.com/Resources/Blog/what-is-cmm-and-their-types>
- [18] TRIMOS. What is a measuring arm? *Trimos - Height gauges, 3D Metrology and Calibration benches* [online]. [cit. 2025-04-03]. Dostupné z: <https://www.trimos.com/products/portable-measuring-arms/what-is-a-measuring-arm/>
- [19] CREAFORM3D. HandyPROBE. *Portable Coordinate Measuring Machine [CMM]* [online]. [cit. 2025-04-03]. Dostupné z: <https://www.creaform3d.com/Products/Coordinate-measuring-machines-HandyProbe>
- [20] MARTÍNEZ-PELLITERO, Susana, Eduardo CUESTA, J. BARREIRO, Braulio ÁLVAREZ a Pedro FERNÁNDEZ. *Comparison between non contact and contact scanning systems for dimensional control*. Second International Conference on Multidisciplinary Design Optimization and Applications, Gijon, Spain, 2008.
- [21] HUANG, Xuanlun, Chenyang WU, Xiaolan XU, et al. Polarization structured light 3D depth image sensor for scenes with reflective surfaces. *Nature Communications* [online]. 2023, **14**(1) [cit. 2025-05-03]. ISSN 2041-1723. Dostupné z: doi:10.1038/s41467-023-42678-5
- [22] CHEN, Yancy. Classification of 3D Scanners: Understanding the Technology Landscape. *LinkedIn* [online]. 2024 [cit. 2025-03-12]. Dostupné z:

- <https://www.linkedin.com/pulse/classification-3d-scanners-understanding-technology-landscape-chen-j7eec/>
- [23] ČERMÁK, Jan. *Metody 3D skenování objektů* [online]. Brno, 2015 [cit. 2025-02-10]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/40812>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Tomáš Marada.
- [24] WULF, Oliver a Bernardo WAGNER. *FAST 3D SCANNING METHODS FOR LASER MEASUREMENT SYSTEMS*. In: . Hannover, 2003, s. 1-6.
- [25] LE, Ace. POLYGA INC. 3D Scanning 101: Basics of Structured Light 3D Scanning. *Polyga* [online]. [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://www.polyga.com/blog/3d-scanning-101-structured-light-3d-scanning/>
- [26] ALFONSO, Mario. 3D Scanning With Structured Light. *Bitfab* [online]. [cit. 2025-04-20]. Dostupné z: <https://bitfab.io/blog/3d-structured-light-scanning/>
- [27] YING, Wu. *Radiometry, BRDF and Photometric Stereo* [online]. 1-10 [cit. 2025-04-09]. Dostupné z: <http://users.eecs.northwestern.edu/~yingwu/teaching/EECS432/Notes/lighting.pdf>
- [28] WOODHAM, Robert J. Photometric Method For Determining Surface Orientation From Multiple Images. *Optical Engineering* [online]. 1980, 1980-02-01, **19**(1) [cit. 2025-04-09]. ISSN 0091-3286. Dostupné z: doi:10.1117/12.7972479
- [29] YANG, Ru, Yaoke WANG, Shuheng LIAO a Ping GUO. DPPS: A deep-learning based point-light photometric stereo method for 3D reconstruction of metallic surfaces. *Measurement* [online]. 2023, **210** [cit. 2025-04-09]. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2023.112543
- [30] LI, Larry. *Time-of-Flight Camera – An Introduction: Technical White Paper* [online]. 2014 [cit. 2025-05-23]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/wp/sloa190b/sloa190b.pdf>
- [31] , FRAMOS. FRAMOS. *WHAT IS ToF? All About Time-of-Flight and the FRAMOS ToF Devkit* [online]. 2024 [cit. 2025-03-12]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=VrM5_EO-bK8
- [32] KREON 3D. How does laser triangulation 3d scanning technology improve manufacturing processes? *Kreon3D* [online]. [cit. 2025-03-15]. Dostupné z: <https://www.kreon3d.com/article/how-does-laser-triangulation-3d-scanning-technology-improve-manufacturing-processes>
- [33] PAYNE, Angie a Kieron NIVEN. What is laser scanning? *Archaeology Data Service* [online]. [cit. 2025-03-15]. Dostupné z: <https://archaeologydataservice.ac.uk/help-guidance/guides-to-good-practice/data-collection-and-fieldwork/laser-scanning-for-archaeology/introduction/what-is-laser-scanning/>

- [34] KIVOLYA, Bynatalia. How does 3D scanning technology work? *Professional 3D scanning solutions | Artec 3D* [online]. [cit. 2025-04-21]. Dostupné z: <https://www.artec3d.com/learning-center/3d-scanning-technology>
- [35] ROSELL, J.R. a R. SANZ. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. 2012, **81**, 124-141 [cit. 2025-03-16]. ISSN 01681699. Dostupné z: doi:10.1016/j.compag.2011.09.007
- [36] BUTT, Muhammad Zohaib, Nazri NASIR a Rozeha Bt A. RASHID. A review of perception sensors, techniques, and hardware architectures for autonomous low-altitude UAVs in non-cooperative local obstacle avoidance. *Robotics and Autonomous Systems* [online]. 2024, **173** [cit. 2025-03-16]. ISSN 09218890. Dostupné z: doi:10.1016/j.robot.2024.104629
- [37] HAN, Soonyoung, Minh Duc DO, Mingeon KIM, Seungyon CHO, Seung-Kyum CHOI a Hae-Jin CHOI. A precise 3D scanning method using stereo vision with multipoint markers for rapid workpiece localization. *Journal of Mechanical Science and Technology* [online]. 2022, **36**(12), 6307-6318 [cit. 2025-04-04]. ISSN 1738-494X. Dostupné z: doi:10.1007/s12206-022-1142-2
- [38] Q-TECH. CT scan: A crucial technology in modern mechanical engineering. *Q-Tech* [online]. 2023 [cit. 2025-04-14]. Dostupné z: <https://en.q-tech-rodind.de/news/ct-scan-eine-entscheidende-technologie-im-modernen-maschinenbau>
- [39] JOHNS, H.E., J. BATTISTA, M.J. BRONSKILL, R. BROOKS, A. FENSTER a M. YAFFE. Physics of CT scanners: Principles and problems. *International Journal of Radiation Oncology*Biophysics*Physics* [online]. 1977, **3**, 45-51 [cit. 2025-04-14]. ISSN 03603016. Dostupné z: doi:10.1016/0360-3016(77)90225-5
- [40] CASTILLO, M. The Industry of CT Scanning. *American Journal of Neuroradiology* [online]. 2012, 2012-04-10, **33**(4), 583-585 [cit. 2025-04-14]. ISSN 0195-6108. Dostupné z: doi:10.3174/ajnr.A2742
- [41] *Waygate Technologies Industrial CT Scanners* [online]. [cit. 2025-04-25]. Dostupné z: <https://www.bakerhughes.com/waygate-technologies/industrial-radiography-and-ct/industrial-ct-scanners>
- [42] TAHA, Dalya Mahmood, Ahmed Thaer ABDULQADER, Abbas Maan Hadi AL-KHAWAJA a Hayder Adeeb MOUSA. Review article about Magnetic Resonance Imaging (MRI). *European Journal of Theoretical and Applied Sciences* [online]. 2024, 2024-09-01, **2**(5), 530-535 [cit. 2025-04-15]. ISSN 2786-7447. Dostupné z: doi:10.59324/ej-tas.2024.2(5).51
- [43] VAN GEUNS, Robert-Jan M., Piotr A. WIELOPOLSKI, Hein G. DE BRUIN, Benno J. RENSING, Peter M.A. VAN OOIJEN, Marc HULSHOFF, Matthijs OUDKERK a Pim J. DE FEYTER. Basic principles of magnetic resonance imaging☆. *Progress in*

- Cardiovascular Diseases* [online]. 1999, **42**(2), 149-156 [cit. 2025-04-15]. ISSN 00330620. Dostupné z: doi:10.1016/S0033-0620(99)70014-9
- [44] NATIONAL INSTITUTE OF BIOMEDICAL IMAGING AND BIOENGINEERING (NIBIB). Magnetic Resonance Imaging (MRI). *National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering* [online]. [cit. 2025-04-15]. Dostupné z: <https://www.nibib.nih.gov/science-education/science-topics/magnetic-resonance-imaging-mri>
- [45] KOPTYUG, Igor V. MRI of mass transport in porous media: Drying and sorption processes. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy* [online]. 2012, **65**, 1-65 [cit. 2025-04-15]. ISSN 00796565. Dostupné z: doi:10.1016/j.pnmrs.2011.12.001
- [46] JONES, Jeremy. MRI. *Radiopaedia* [online]. [cit. 2025-04-15]. Dostupné z: <https://radiopaedia.org/articles/mri-2?lang=gb>
- [47] WHYKARE. Power steering pump mercedes e class w124 230e 250 300d 1244600280 zf. *Whykaren.com* [online]. 2025 [cit. 2025-05-16]. Dostupné z: <https://whykaren.com/en/product/12254584688/>
- [48] ZEISS. ATOS Q. *3D Metrology* [online]. [cit. 2025-04-03]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/en/systems/optical-3d/3d-scanning/atos/atos-q.html>
- [49] POOCCA. What Is A Hydraulic Relief Valve? *News* [online]. [cit. 2025-04-30]. Dostupné z: <https://www.poocca.com/news/what-is-a-hydraulic-relief-valve-78014386.html>
- [50] CAPTURE GEOMETRY INTERNALLY. *Destruktivní skener CSS-1000 SYSTÉM* [online]. [cit. 2025-04-23]. Dostupné z: http://www.cgiinspection.com/products_css-1000.cfm
- [51] SINGHOSE, W.E. Sketch of a Typical CMM. . *ResearchGate* [online]. 1996 [cit. 2025-02-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Sketch-of-a-Typical-CMM_fig1_2584285
- [52] THORNE, Evan Jones. Potent portables: Portable CMM arms bring sophisticated inspection to the shop floor. *Cutting Tool Engineering* [online]. 2014 [cit. 2025-04-03]. Dostupné z: <https://www.ctemag.com/articles/potent-portables-portable-cmm-arms-bring-sophisticated-inspection-shop-floor>
- [53] FACTUM FOUNDATION. Selene Photometric Stereo System. *Factum Foundation* [online]. [cit. 2025-04-23]. Dostupné z: <https://factumfoundation.org/technology/2-5d-digitalisation/selene-photometric-stereo-system/>
- [54] WIKIPEDIA. Photometric stereo. In: *Wikipedia, The Free Encyclopedia* [online]. [cit. 2025-04-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Photometric_stereo
- [55] PEREIRA, Francisco Pereira. ML6. Optical 3D Acquisition Methods: A Comprehensive Guide [Part 2]. *ML6* [online]. 2022 [cit. 2025-05-09]. Dostupné z:

<https://www.ml6.eu/blogpost/optical-3d-acquisition-methods-a-comprehensive-guide-part-2>

- [56] COMET YXLON. Industrial CT. *Comet YXLON* [online]. [cit. 2025-05-09]. Dostupné z: <https://yxlon.comet.tech/en/technologies/industrial-ct>
- [57] FORMLABS. How to Choose the Best 3D Scanner to Use With Your 3D Printer. *Formlabs* [online]. 2025 [cit. 2025-05-22]. Dostupné z: https://formlabs.com/eu/blog/how-to-choose-a-3d-scanner-for-3d-printing/?srsltid=AfmBOoppITvIR17EVM-CuaCv-pZ7hZgImHHv2d55L4sqm3FohGcWPiFQ&utm_source=chatgpt.com
- [58] KEYENCE. Comparing 3D Scanners: Handheld vs Desktop and Other Options. *KEYENCE America* [online]. 2025 [cit. 2025-05-22]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/products/3d-measure/cmm/resources/cmm-resources/comparing-3d-scanners.jsp>
- [59] SOLIDPRINT3D. Comparing 3D Scanning Technologies. *Solid Print3D* [online]. 2025 [cit. 2025-05-22]. Dostupné z: <https://www.solidprint3d.co.uk/comparing-3d-scanning-technologies-22/>
- [60] WYLIE, Hunter. Types of 3D Scanning Technology: Pros. *Crow Engineering Inc. | Licensed, Accredited* [online]. 2025 [cit. 2025-05-22]. Dostupné z: <https://crowengineering.com/engineering-design-services/types-of-3d-scanning-technology-pros-cons/>
- [61] 3DJAKE. Bambu Lab P1S Combo. *3DJake Česká republika* [online]. [cit. 2025-05-01]. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/bambu-lab/p1s-combo>

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

3D	Trojrozmerný
CAD	<i>Computer-aided Design</i>
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CMM	<i>Coordinate Measuring Machine</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
CT	<i>Computed Tomography</i>
DLP	<i>Digital Light Processing</i>
IGES	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
MRI	<i>Magnetic Resonance Imaging</i>
STL	<i>Stereolithography</i>
ToF	<i>Time of Flight</i>
mm	milimeter
μm	mikrometer
nm	nanometer