



**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

**VYUŽITÍ 3D SKENOVÁNÍ V OBLASTI PŘESNÉHO  
VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ**

USAGE OF 3D SCANNING IN PRECISE INJECTION MOULDING

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Michal Chylík

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Aneta Zatočilová, Ph.D.

BRNO 2016

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Michal Chylík**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení  
Vedoucí práce: **Ing. Aneta Zatočilová, Ph.D.**  
Akademický rok: 2015/16

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:

### Využití 3D skenování v oblasti přesného vstřikování plastů

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Použití technik 3D skeneru, expandujících v současnosti v technické praxi jako je automotive, výroba plastů a strojírenství, v oblasti přesného vstřikování plastů. Práce by se měla zabývat třemi okruhy. Možnost použití 3D skeneru jako inspekčního nástroje pro kvalitativní posouzení plastových výlisků, resp. náhrada a výpomoc konvenčním technikám jako je kontaktní 3D měření. Dále možnosti rekonstrukce plastových dílů v obchodních případech, tedy obnova chybějících dat pro následné naceňování a případnou výrobu nových lisovacích nástrojů tam, kde chybí výkresová i 3D dokumentace. A v posledním případě použití 3D skeneru jako služba nástrojáren pro výrobu lisovacích nástrojů, rekonstrukce prasklých a jinak poškozených dílů lisovacích nástrojů. Součástí bakalářské práce budou ukázky realizace a výsledků (3D modely, výkresová dokumentace).

#### **Cíle bakalářské práce:**

Cílem práce je vytvoření rešeršní studie v oblasti 3D skenování a reverzního inženýrství s ohledem na technickou praxi. Práce je zaměřena na aktuální problematiku a její součástí je vytvoření třech příkladů užití skenování a reverzního inženýrství v technické praxi v oblasti přesného vstřikování plastů. Dle zadání budou tři příklady realizovány ve formě měrového protokolu, výkresu součásti a 3D modelu.

#### **Seznam literatury:**

Shigley, J. E., Mischke Ch. R. a Budynas R. G. (2010): Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUUM.

Svoboda, P., Brandejs, J., Dvořáček, J. a Prokeš, F. (2009): Základy konstruování, CERM Brno.

Svoboda, P., Brandejs, J. a Prokeš, F. (2009): Výběry z norem pro konstrukční cvičení, CERM 2009,

Raja, V., Fernandes, K. (2008): Reverse Engineering: An industrial perspective. Springer, London.

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. a Harley, I. (2011): Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications. UK: Whittles Publishing.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty



## ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je vytvoření rešeržní studie v oblasti 3D skenování a reverzního inženýrství s ohledem na technickou praxi. Součástí je vytvoření třech příkladů užití a to možnosti využití 3D skeneru pro rekonstrukce plastových dílů v obchodních případech, tedy obnovu chybějících dat pro následné naceňování. Dále použití skeneru jako inspekčního nástroje a výpomoc konvenčním metodám měření, konkrétně kvalitativní posouzení plastových vylisků. A poslední oblastí je možnost výroby identického dílu pro požadavky nástrojářen. Součástí je výkresová dokumentace včetně měrového protokolu a 3D modelů.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Digitalizace, 3D skener, reverzní inženýrství, 3D skenování, přesné vstřikování plastů.

## ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is creating a complex study on the topic of 3D scanning and reverse engineering regarding technical praxis. Part of this bachelor thesis are three examples of usage. Using 3D scanner for reconstruction of plastic parts in marketing praxis, specifically for recovering of missing data and subsequent valuation. Using 3D scanner as an inspectional tool - a support for measurement of quality of plastic moulding. And last but not least an option of creating an identical part to fit requirements of tool shop. The drawing documentation including protocol for inspect and 3D models are included in the thesis.

## KEYWORDS

Digitalization, 3D scanner, reverse engineering, 3D scanning, precision plastic injection moulding.



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

CHYLÍK, M. *Využití 3D skenování v oblasti přesného vstřikování plastů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aneta Zatočilová, Ph.D.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Anety Zatočilové, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 27. května 2016

.....

Michal Chylík



## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto chci poděkovat vedoucí bakalářské práce paní Ing. Anetě Zatočilové, Ph.D. za odborné vedení, také panu Ing. Vladimírovi Čudkovi, Ph.D. za pomoc při zpracování této práce a v neposlední řadě své rodině za podporu při studiu.



## OBSAH

Úvod .....	10
1 Přehled současného stavu .....	11
1.1 Digitalizace .....	11
1.1.1 Kontaktní digitalizace konvenčními metodami .....	11
1.1.2 Bezkontaktní digitalizace pomocí 3D skeneru .....	12
1.2 Rozdělení 3D skenerů dle konstrukce a způsobu snímání .....	13
1.2.1 Mechanický 3D skener .....	13
1.2.2 Optický 3D skener .....	14
1.2.3 Ultrazvukový 3D skener .....	17
1.2.4 3D skener využívající rentgenového záření .....	17
1.2.5 Laserový 3D skener .....	18
1.2.6 3D skener využívající magnetické resonance .....	19
1.3 Rozdělení 3D skenerů dle mobility .....	19
1.3.1 Mobilní 3D skener .....	19
1.3.2 Stacionární 3D skener, 3D skenovací box .....	20
1.4 Rozdělení 3D skenerů dle míry poškození skenované součásti .....	20
1.4.1 Nedestruktivní 3D skener .....	20
1.4.2 Destruktivní 3D skener .....	20
2 Skenování .....	22
2.1 Obecné Parametry 3D skeneru .....	22
2.2 Hlavní parametry skeneru Atos triple scan III: .....	22
2.3 Příprava 3D skeneru .....	23
2.4 Příprava vzorku .....	24
2.4.1 Měření bez referenčních bodů .....	25
2.4.2 Měření s referenčními body .....	25
2.5 Popis měření .....	26
3 Reverzní inženýrství .....	27
3.1 Vytvoření modelu .....	27
3.1.1 Úprava dat .....	27
3.1.2 Export do univerzálního formátu .....	27
3.2 Interpretace výsledků .....	28
4 Aplikace RE ve strojírenství .....	29
4.1 Rekonstrukce modelu pro poptávkové řízení .....	29
4.2 Měření odchylek a kontrola kvality výroby .....	32
4.3 Výroba identického dílu .....	34



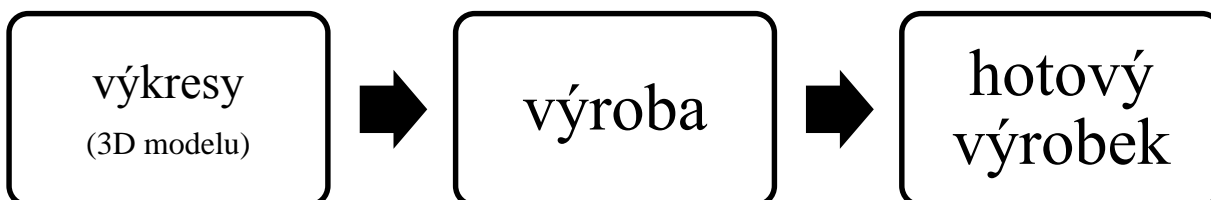


Závěr.....	36
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	40
Seznam příloh.....	41

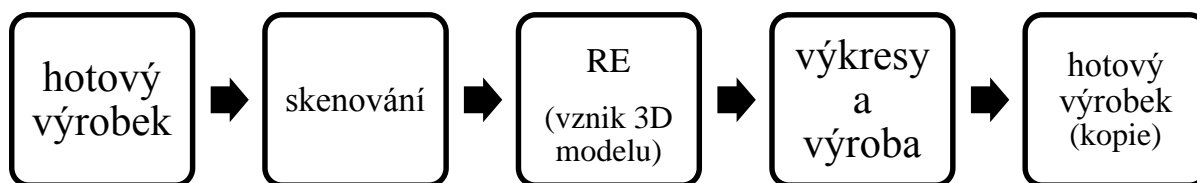


## ÚVOD

Hlavním tématem této bakalářské práce (dále BP) je skenování a reverzní inženýrství (dále RE). Pojem RE pochází z anglického jazyka a lze ho přeložit jako zpětné či obrácené inženýrství. To přesně vystihuje princip výroby při použití tohoto odvětví, který je patrný ze schématického porovnání s tradiční výrobou.



*Schéma č. 1 Tradiční postup výroby*



*Schéma č. 2 Postup výroby při použití RE*

Základním úkolem RE je zmapovat pomocí různých postupů princip funkce, tvar i strukturu hotového výrobku a poté jej nechat dle nasbíraných údajů vyrobit stejný či vylepšený oproti vzoru, který byl zpracován.

Uplatnění se nalézá napříč různými obory jako je design, architektura, archeologie, lékařství atd. V současnosti lze ale říci, že největší využití má RE ve strojírenství. Každé odvětví má specifické požadavky na přesnost měření a případné odchylky - řádově se jedná od setin milimetru až po metry.

Pro digitalizaci a získávání informací o analyzovaném objektu nejčastěji používáme skenery a měřidla. Tyto informace poté za pomoci softwarů computer aided design (dále CAD) necháme přetvořit v trojrozměrné (dále 3D) modely. Ty potřebujeme pro další použití směřující k výrobě nového dílu nebo pro zjištění důležitých informací, které mají další návaznosti.

Jedná se ve strojírenství o odvětví s obrovským potenciálem. Jedno z prvních výraznějších použití reverzního inženýrství jsme mohli zaznamenat během druhé světové války, kdy Britové a Američané vytvářeli kanystry dle německého vzoru. Ti ovšem neměli k dispozici skenery a používali pouze kontaktní měřidla. První 3D skenery se pak datují přibližně k roku 1990, což stejně jako ve většině oborů využívajících digitalizaci měl na svědomí rozvoj výpočetní techniky a od té doby se velmi rychle zpřesňují a zdokonalují jak ve funkcích, post procesech, tak i přesnosti. [2] [3] [4]



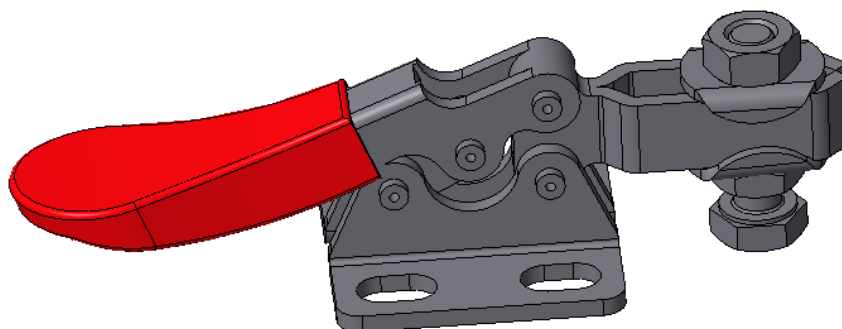
# 1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

Kapitola shrnuje podstatné rozdíly mezi jednotlivými typy 3D skenerů, jejich použitím a metodami, kterými se docílí digitalizace. Přibližuje také aktuální situaci na trhu v této oblasti.

V poslední době probíhá zpřístupnění 3D skenerů i menším firmám a široké veřejnosti. To se děje zejména díky většímu objemu prodaných skenerů a s tím souvisejícím zlevnění technologie výroby i vývoje a vývojem cen v oblasti počítačů a jejich výkonu. Výrobci se obecně drží trendu nabízet přístroje s vysokou přesností a dalšími sledovanými parametry viz kapitola 2.1 včetně snižování náročnosti obsluhy.

## 1.1 DIGITALIZACE

Obecně digitalizaci lze chápat jako převod dat do počítače. V tomto případě se skládá ze samotného skenování a reverzního inženýrství. Cílem je dostat a mít k dispozici 3D model a dvojrozměrnou (zkratka 2D)/3D dokumentaci pro následnou výrobu, kontrolu rozměrů, označení funkčních ploch a uzlů, definici kvality povrchu apod. Pokud tyto data nemáme z předchozích operací, je nutné je vytvořit a to lze pomocí dvou základních metod.



*Obr. 1 Ukázka digitalizované upínky od firmy Zamet [1]*

### 1.1.1 KONTAKTNÍ DIGITALIZACE KONVENČNÍMI METODAMI

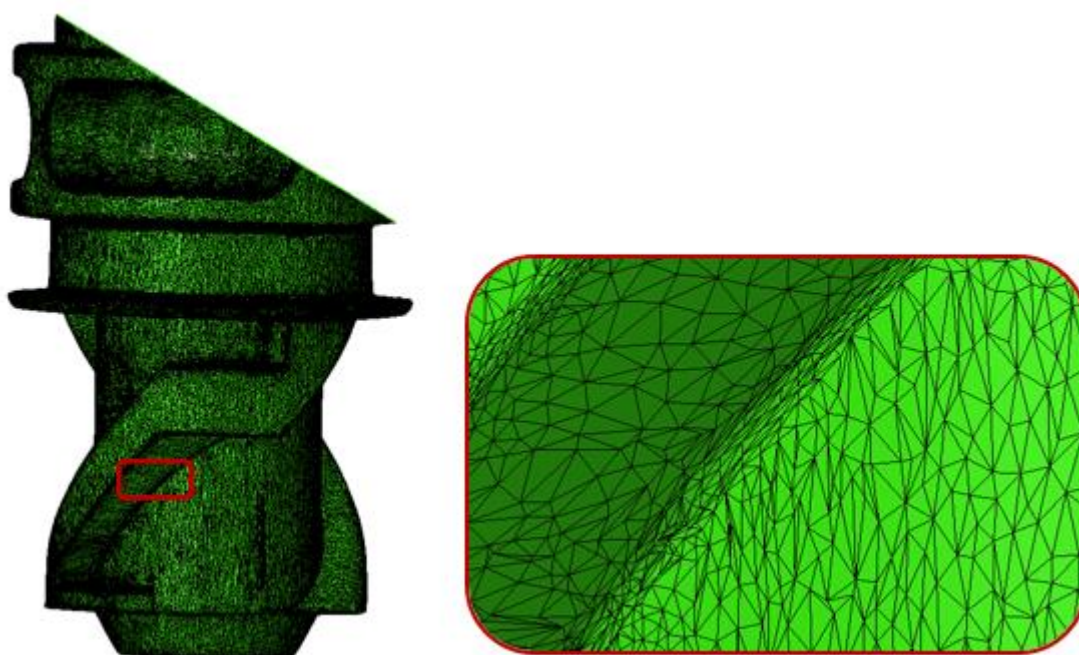
Na základě výkresové dokumentace nebo měření objektu kontaktními měřidly ho překreslíme do CAD systému. Při jednoduchých dílech je tento způsob dostačující, ovšem častěji je potřeba získat model se složitými tvarovými plochami, komplikovanou strukturou, zaoblením a úkosy. Měření pouze posuvným měřítkem či mikrometrem by bylo v takovém případě časově náročné, popř. by nebylo vůbec možné, a proto se používá především druhá polo automatizovaná metoda 3D digitalizace.



### 1.1.2 BEZKONTAKTNÍ DIGITALIZACE POMOCÍ 3D SKENERU

Tato metoda využívá k digitalizaci 3D skener. Obecně se jako 3D skener označuje přístroj, který je schopen nasnímat předmět ve 3 rovinách definujících prostor. Za pomoci skenerů lze získat tzv. mrak bodů vznikající z různých úhlů, které s danou přesností dle typu použitého skeneru odpovídají měřenému objektu (leží na jeho povrchu). Často jde o velký soubor obsahující řádově i miliony bodů umístěných v prostoru.

Z mračna bodů je poté možné vytvořit za pomoci speciálních algoritmů tzv. polygonální síť tj. síť tvořenou mnoha polygony (mnohoúhelníky) s uzlovými body odpovídajícími bodům získaných skenerem. V optimálním případě jsou polygony definovány jako trojúhelníky. Tato síť s odpovídající přesností kopíruje skutečný povrch tělesa (Obr. 2) a je základním stavebním kamenem při následném zpracování dat.



Obr. 2 Naskenovaný objekt a detailní pohled na polygonální síť

Tuto síť je potřeba upravit tak, aby byla co nejvíce bližící se reálnému tělesu. To znamená odstranění bodů vzniklých šumem, zašití děr vzniklých špatným skenováním a oprava překrývajících se nebo nedotýkajících se polygonů. Takto zpracovaná síť je pak dobrým startovacím bodem pro tvorbu 3D modelu. Nejjednodušší cesta je nechat CAD software převést povrchovou polygonální síť na objemové těleso nebo plošné těleso některou z metod aproximace nebo interpolace. Pokud je síť nadměrně poškozena a není to možné, alternativou je model ručně překreslit, což ovšem zabere daleko více času, především u složitých tvarů – z polygonální sítě jsme schopni změřit důležité kóty a v CAD softwaru vytvořit 3D model. [16] [17] [18] [19]



## 1.2 ROZDĚLENÍ 3D SKENERŮ DLE KONSTRUKCE A ZPŮSOBU SNÍMÁNÍ

Skenování se využívá v mnoha oblastech. Každý typ skeneru se hodí na určitý druh měření, má odlišnou časovou náročnost měření, pořizovací náklady i přesnost. Liší se i specifickými nároky na rychlost měření a na přesnost.

Jedná se o odchylky v řádech metrů při monitorování zemského povrchu, centimetrů při snímání budov, mostů a památek ve stavebnictví či archeologii, jednotky až desetiny milimetrů při vytváření duplikátů v umění, lékařství nebo strojírenství. Je ovšem možné dosáhnout u některých typů skeneru i výrobcem garantované až setiny milimetru. Základní typy se dělí podle druhu konstrukce a způsobu, jakým se snímá. Rozdělení je následující.

### 1.2.1 MECHANICKÝ 3D SKENER

Jedná se o typického představitele kontaktního měření a jde rozdělit na skenery s ramenem a souřadnicové. Princip je založen na fyzickém kontaktu mezi měřeným objektem a skenerem. Jde v podstatě o mechanickou paži, která může být řízená (strojově ovládaná) nebo ruční. Vykonává lineární pohyby ve třech a více stupních volnosti.

Pro oba typy skenerů platí, že měření je pomalejší a proto se používá spíše pro jednodušší díly nebo v kombinaci s dalšími typy skenerů nebo u dílů, kde je vyžadována vysoká přesnost. Výrobci těchto typů skenerů jsou Faro, Romer, Microscribe (Obr. 3) atd. Přesnost je relativně velká, dosahuje hodnot až tisícín mm. Problém těchto skenerů je především omezený přístup k měření u komplikovaných dílů. V případě skenerů s ramenem se obsluha nemusí dostat ke všem zákoutím se snímacím hrotem, který je umístěn na jeho konci.



Obr. 3 Kontaktní mechanický skener od firmy Microscribe [5]

Druhou skupinou jsou souřadnicové měřicí stroje (dále SMS). Existují jedno souřadnicové, dvou souřadnicové a tří souřadnicové. Tyto stroje umí měřit v jedné ose, resp. dvou tedy rovině a třech osách tedy prostoru. Princip spočívá v tom, že určíme základní nulový bod. Polohy dalších bodů na měřené součástce získáme formou souřadnic v osách  $x$ , resp.  $y$  a  $z$ .



SMS se používá především jako alternativní metoda ke konvenčním metodám měření z důvodu menší časové náročnosti. Konkrétně ke kontrole rozměrů, ploch a tvaru bez dutinových výrobků. Výrobci těchto typů skenerů jsou např. Mitutoyo (Obr. 4), Universal, Duramax, Wenzel či Somet.

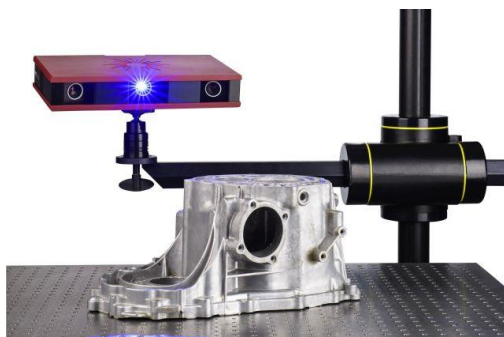


Obr. 4 SMS od firmy Mitutoyo [6]

### 1.2.2 OPTICKÝ 3D SKENER

Jedná se o bezkontaktní skener. To znamená, že na rozdíl od kontaktních skenerů nevzniká kontakt mezi měřeným objektem a skenerem. Tohoto jevu se uplatňuje mimo jiné u horkých forem.

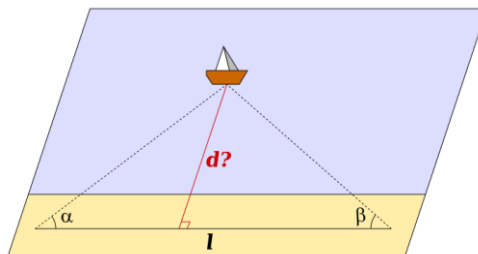
Skládá se ze senzoru, který je složen z řídicí jednotky, minimálně jednoho objektivu s kamerou a jednoho projektoru, kde objektiv snímá polohu jednotlivých bodů a projektor osvětluje modrobílým světlem, dále stojanu, který je pomocí aretačního upnutí (možnost pohybovat všemi směry – 3osy) spojen s projektorem, výkonného počítače s důrazem na grafickou kartu a operační paměť. Skener může být doplněný o rotační stůl s automatickým i manuálním ovládním.



Obr. 5 Optický skener od firmy Atos [7]



Jedním ze dvou technik, které skenery využívají, je princip trigonometrie. Trigonometrie je oblast matematiky, kdy se k řešení využívá trigonometrických funkcí. Je nutná pro triangulaci (Obr. 6), která se zabývá výpočtem souřadnic a vzdáleností bodů.



Obr. 6 Princip triangulace pro výpočet vzdálenosti lodi od pobřeží [8]

Popis úkonů, kterými je možné zjistit polohu objektu jako je např. loď od pobřeží je následující. Nejprve se zjistí úhel  $\alpha$  a  $\beta$ , tyto vrcholy si označíme A a B. Pokud známe vzdálenost  $l$  nebo souřadnice bodů A i B, je možné vypočítat souřadnice lodě v bodě C a vzdálenost od pobřeží  $d$ . V rovinné úloze stačí aplikovat pět základních pravidel. A to, vnitřní součet úhlů v trojúhelníku je  $180^\circ$ , dále Sinová věta, Kosinová věta, Tangentová věta a Pythagorova věta. [8]

Skenery pracující na principu trigonometrie jsou tedy založeny na principu ozáření objektu nejčastěji tzv. „modrým světlem“, které není citlivé na vnější světelné podmínky a skener je tak možné použít i za běžných podmínek denního světla. Světelná délka je řádově 400 – 500 nm a nese střední riziko při pohledu do světelného zdroje podle standartu DIN EN 62741, vydaného v březnu 2009. Po osvětlení (Obr. 7) se vytvoří na povrchu objektu definovaný rastr a objektiv nebo objektivy zachytí polohy jednotlivých osvětlujících přímek rastru, jejich zakřivení a vypočítá 3D polohu jednotlivých bodů na součásti. [9]



Obr. 7 Osvícení skenovaného předmětu [10]

Druhá technika, kterou v současné době 3D skenery využívají, je metoda fotogrammetrie. Ta spočívá v porovnání fotografií a vypočtení polohy objektu. Jsou dva základní typy fotogrammetrie – jedno snímková, kterou lze získat pouze rovinné souřadnice předmětu a dvou snímková, kterou lze získat prostorové souřadnice z dvojice snímků. Druhá zmiňovaná metoda se také nazývá stereofotogrammetrie a používá se právě pro 3D skenování. Vyhodnocením nejčastěji tzv. normálního případu stereofotogrammetrie (Obr. 8) se získávají 3D souřadnice skenovaných bodů.

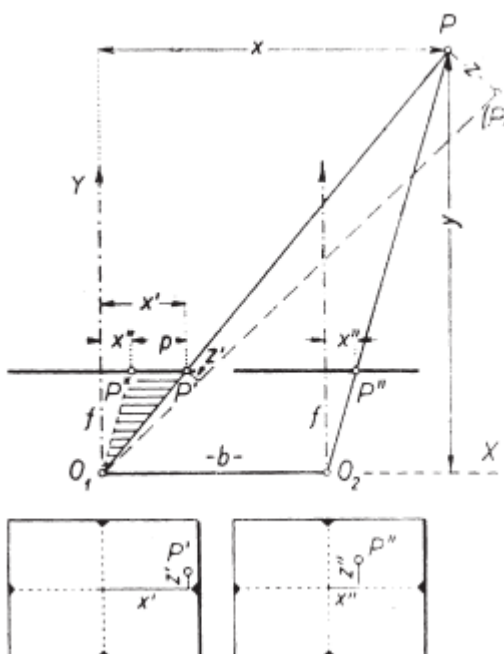


Stereofotogrammetrií (Obr. 8) se získávají 3D souřadnice skenovaných bodů. Popis principu této metody je následující. Na Obr. 8 je zachycený bod  $P$  na pravém i levém snímku a označený jako bod  $P'$  a  $P''$ . Je patrné, že platí vztah, který nazýváme horizontální paralaxí.

$$P'P'' = x'x'' = p \quad [m = m = m] \quad (1)$$

Z podobnosti trojúhelníků  $O^1P'P''$  a  $O^1O^2P$  se získá základní rovnice:

$$z = \frac{z'y}{f} = \frac{b z'}{P} \quad [m = \frac{m}{m} = \frac{m}{m}] \quad (2)$$



Obr. 8 Normální případ stereofotogrammetrie [11]

Skenovat je možné fotoaparát nebo kamerou i přes to, že zpracující program dostane pouze fotografie z různých úhlů bez informací o umístění objektivu. To z této metody dělá jednu z nejlevnějších, protože lze využít třeba i fotoaparát v mobilním telefonu. Přesnost však zůstává za výrazně sofistikovanějšími 3D skenery využívající triangulace.

Mezi výhody patří relativně vysoká přesnost měření a možnost u velkých objektů využití navazování fotek, které mohou být pořízeny např. letadlem nebo pozemní cestou autem. Lze skenovat budovy ale i velmi malé předměty.

Nevýhody této metody je, že snímá pouze opticky povrch - nelze naskenovat dutiny ani hlubší díry, protože není možné osvětlit takto hluboké kapsy a jiné geometrie. Řešením může být odvození vnitřní geometrie od vnější, pokud má těleso pravidelné stěny. Další možnost je destruktivní rozdělení součásti a naskenování každé části zvlášť. Zpět ke spojení v jeden model dojde až během post procesu v softwaru. Pokud se k osvětlování využívá modrobílé světlo, je nutné, aby nebyl povrch lesklý. To totiž znemožní měření viz kapitola 2.4.





Měření probíhá s referenčními nebo bez referenčních bodů (popis kapitola 2.4 a podmínky použití kapitola 2.5). Nejznámější výrobci jsou např. Atos (Obr. 5), Revscan, Trimble, Steinbichler, Comet, Breuckmann.

### 1.2.3 ULTRAZVUKOVÝ 3D SKENER

Princip je stejný jako u využití ultrazvukových přístrojů v jiných odvětvích, především zdravotnictví. Na základě odrazu a časové odezvy ultrazvukových vln, které leží nad hranicí slyšitelných zvuků pro člověka, se určuje tvar a struktura materiálu v daném místě. Dá se používat podobně jako rentgenový skener na kontrolu potrubí s tím rozdílem, že ultrazvuk je vhodné používat pro malé průměry a není lidskému zdraví natolik nebezpečný jako rentgenové záření.

Výhoda je cena přístroje a proniknutí pod některé druhy povrchů. Nevýhoda je hlavně nízká přesnost, přibližně 0,5mm a proto se hodí pro film, reklamu, kontrolu velkých prasklin apod. Nejznámější výrobci jsou např. Olympus, Ge measurement.

### 1.2.4 3D SKENER VYUŽÍVAJÍCÍ RENTGENOVÉHO ZÁŘENÍ

Pracují na principu využití rentgenového záření (dále RTG) a v dnešní době se používají především ve zdravotnictví. Je ale pravdou, že nacházejí i uplatnění ve strojírenství a jiných oborech, kde je zapotřebí znát vnitřní strukturu objektů. U těchto bývá intenzita záření řádově vyšší než ve zdravotnictví a jedná se často o mobilní zařízení používané třeba v oblasti kontroly potrubí s velkými průměry atd.

Výhodou těchto systémů je možné využití tzv. techniky computed tomography, překládáno jako počítačová tomografie (dále CT). Vyhodnocení je založeno na absorpci použitého záření materiálem. Tomografie pak vychází z principu skládání různě orientovaných řezných rovin s přesnou definicí jejich polohy. Řezy (snímky) jsou pak pomocí matematického aparátu, založeného na Fourierových transformacích skládány dohromady a objekt je rekonstruován na 3D těleso. Známy výrobci jsou např. NSI (Obr. 9), Ge measurement.



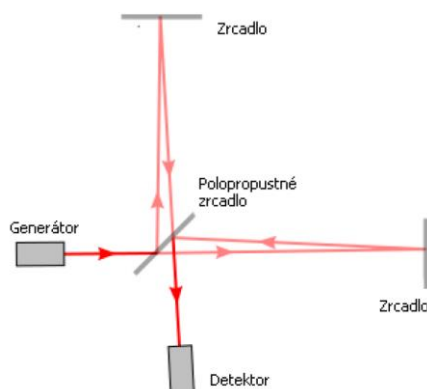
*Obr. 9 Průmyslové CT od firmy Nsi [12]*



### 1.2.5 LASEROVÝ 3D SKENER

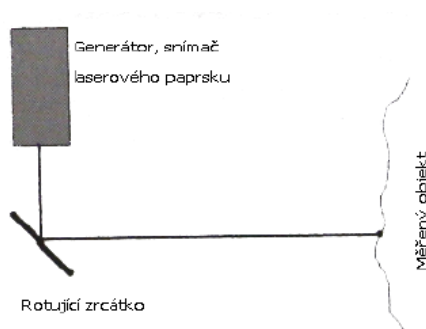
Laserový skener funguje obdobně jako radar či sonar, akorát vysílá místo radiových či ultrazvukových vln vysílá laserové paprsky. Ty se od objektu odrazí a letí zpět k čidlům, které je zachytí. Pomocí triangulačních principů (kapitola 1.2.3), interferometrie (Obr. 10) nebo doby letu (Obr. 11) se spočítá přesná poloha bodů.

Interferometrie – přístroje fungující na základě tohoto principu využívají vlnové podstaty světla. Z generátoru je vyslán laserový paprsek, který se na polopropustném zrcadle rozdělí na dva. První pokračuje k objektu, kde se odrazí a letí zpět na zrcadlo a detektor paprsků. Druhý je odražen přímo přes zrcadlo zpět k detektoru. Z fázového rozdílu mezi paprsky lze určit vzdálenost skeneru a objektu.



Obr. 10 Princip skenování pomocí interferometrie [15]

Doba letu – přístroje využívající doby letu určují polohy bodů na základě vyslání laserového paprsku. U něj určí vzdálenost skenovaného bodu pomocí času letu a úhel natočení, který udá směr.



Obr. 11 Princip skenování pomocí doby letu [15]

Nevýhoda je, že snímá pouze povrch na základě odrazu laserových paprsků. Je tedy nutné mít nebo upravit povrch tak, aby odrazil laserové paprsky.

Tímto měřením získáme tvar předmětu, nikoliv však informace o povrchu. Což lze docílit doplněním skeneru o tzv. charge coupled device (dále CCD) snímače. Většina výrobců již



skenery běžně vybavuje CCD snímači. Nejznámější výrobci jsou Minolta, Handyscan, Leica (Obr. 12), Trimble, Riegl, Optech, Nikon.



*Obr. 12 Laserový skener od firmy Leica [28]*

### **1.2.6 3D SKENER VYUŽÍVAJÍCÍ MAGNETICKÉ REZONANCE**

Princip této zobrazovací metody, označované jako magnetic resonance imaging (dále MRI), funguje na základě silného magnetického pole a elektromagnetického vlnění s vysokou frekvencí.

Každým materiálem projde jinak silné magnetické pole, to zachytí senzory a na základě tohoto jevu je možné předmět zobrazit. Použití je opět především v lékařství. Je možné skenovat pouze ne feromagnetické objekty, tedy ty, které nereagují na magnetické pole. Nevýhoda MRI je nadměrný hluk, nulová mobilita i pořizovací cena. [14] [15] [17] [18] [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27]

## **1.3 ROZDĚLENÍ 3D SKENERŮ DLE MOBILITY**

Dalším typem rozdělení je dle možnosti pohybu skeneru. Toto kritérium bývá při výběru jedno ze základních, protože pokaždé není možné hýbat se skenovaným předmětem.

### **1.3.1 MOBILNÍ 3D SKENER**

Na rozdíl od druhé skupiny se jedná o skenery s možností přemístění za měřeným objektem. To bývá nepostradatelné při skenování velkých konstrukcí, které nelze přemístit ke skeneru. Obecně se dnes výrobci všech skenerů snaží držet trendu, aby byla zaručena mobilita a proto je většina skenerů alespoň částečně mobilních.



### 1.3.2 STACIONÁRNÍ 3D SKENER, 3D SKENOVACÍ BOX

Nevýhoda tohoto typu je možnost skenovat pouze předměty, které je možno přemístit ke skeneru. Tyto skenery se používají např. v odvětví automobilním (dále automotive), kdy se využívá skenovacích center pro kontrolu výroby, která jsou nemobilní.

Do této skupiny lze zařadit i kombinaci skenerů s průmyslovými roboty, umístěnými v uzavřených boxech. Tyto tzv. skenovací boxy (Obr. 13) jsou používány především v automotive pro kontrolu a měření částí kapot automobilů a nejčastěji se jedná o kontaktní nebo optický skener. Výrobce průmyslových robotů jsou firmy Kuka, ABB, Fanuc, Mitsubishi, Eprin, Motoman. [21] [29]



Obr. 13 Stacionární skener od firmy Atos [29]

## 1.4 ROZDĚLENÍ 3D SKENERŮ DLE MÍRY POŠKOZENÍ SKENOVANÉ SOUČÁSTI

Některé skenery potřebují k provedení měření část rozdělit na menší části nebo ji dokonce samotným měřením zničí.

### 1.4.1 NEDESTRUKTIVNÍ 3D SKENER

Skenovaná součást není měřením poškozena. Skener nezanechá žádné stopy. Tímto způsobem funguje většina skenerů a to jmenovitě ultrazvukové, rentgenové, skenery fungující na základně MRI, laserové i optické.

### 1.4.2 DESTRUKTIVNÍ 3D SKENER

Skenovaná součást je měřením poškozena, často zničena.

Jedním z typů destruktivních metod je použití speciálního materiálu (dále SM), kterým se povrch objektu pokryje. Poté se odčerpá z měřicího prostoru vzduch, čímž vznikne vakuum. To způsobí vniknutí SM do všech dutin. Dále se odfrézuje vždy velmi tenká vrstva materiálu a proběhne samotné naskenování nejčastěji optickým skenerem. Materiál skenované součásti



musí být tedy možné obrobit. Největší výhodou této metody je možnost zachytit i komplikované dutiny a díry.

Skenery, u kterých je třeba těleso rozřezat tak, aby bylo vidět i do dutin a děr, se neoznačují jako destruktivní. Není to totiž jejich základní vlastnost. Rozřezání se používá pouze sporadicky v případě potřeby pro zvýšení zachycení bodů uvnitř tělesa. Nicméně, velmi často toto zacházení vede k úplné destrukci objektu nebo jeho velkému poškození a je typickým případem při měření na optických 3D skenerech. [17] [21]



## 2 SKENOVÁNÍ

Je proces, kdy sadou měření získáme mračno bodů umístěných v 3D prostoru, z kterého je poté možné pomocí úprav a metod RE získat rekonstruovaný 3D model. Ten je potřebný pro následné operace. Pro optické 3D skenery se měření provádí s následujícím postupem.

### 2.1 OBECNÉ PARAMETRY 3D SKENERU

Obecně sledujeme u skeneru tyto hlavní parametry:

**Přesnost měření** – říká, s jakou tolerancí, tedy odchylkou měříme a je závislá na mnoha faktorech. Při vyhodnocování výsledků je nutné vždy uvádět naměřené hodnoty včetně přesnosti měření. V této chybě jsou zahrnuté nepřesnosti vzniklé skenerem při měření, opakovatelnost nebo např. rozlišení systému.

**Měřicí objem skeneru** – je maximální objem, ve kterém je skener schopen s danou přesností body zachytit. Souvisí s ním i kalibrace, viz níže kapitola 2.3.

**Rozlišení měření** – jedná se o nejmenší vzdálenost dvou různých bodů, u nichž lze s jistotou říci, že se jedná o dva různé body. Musí být tedy od sebe jasně ohraničeny. Tento parametr je závislý jak na optickém systému, který skener používá, tak na rozlišení CCD čipu, použitého v kameře.

**Počet naskenovaných bodů** – počet bodů, které je možné zachytit na jeden záběr.

**Robustnost skeneru** – udává náchylnost ke zkreslování výsledků měření při různých pracovních podmínkách způsobené přenášením vibrací. To je možné částečně řešit speciálním způsobem uchycení skeneru, umístěním v definovaném prostředí s přípravou proti vibracím atd. Většina skenerů v současnosti vibrace kontroluje na základě softwarového vyhodnocení snímků a předchází tak špatným výsledkům.

**Rychlost měření** – množství bodů, které je schopen skener zachytit s danou přesností za jednotku času. [9] [21] [30]

### 2.2 HLAVNÍ PARAMETRY SKENERU ATOS TRIPLE SCAN III:

Seznam částí:

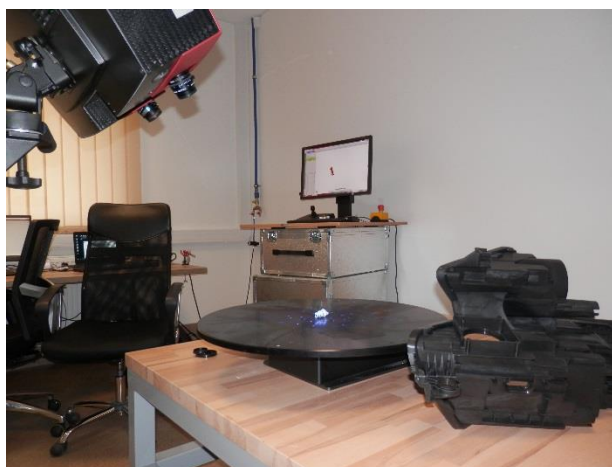
- Senzor, který obsahuje řídicí jednotku, dva objektivy s kamerami a jednoho projektoru (Obr. 14). Možnost výměny objektivů na jiné měřicí rozsahy.
- Stojan skeneru vč. aretačního upnutí (Obr. 15).
- Výkonný počítač (Obr. 15).
- Rotační stůl pro automatické nebo poloautomatické skenování podle jedné osy (Obr. 15).



Obr. 14 Senzor 3D skeneru od firmy Atos [31]

### Důležité Parametry:

- Přesnost měření - až 0,01 mm dle použitých objektivů a při pracovní vzdálenosti 0,49 - 2 m.
- Měřicí objem – možnost použití objektivu ,400° – 170x130x130 až 1500x1130x1130mm a objektivu „SO“ – 38x29x15 až 320x240x240mm.
- Rozlišení měření – 0,012 - 0,45 mm dle použitých objektivů.
- Počet naskenovaných bodů – přes 8 milionů na jeden záběr, tj. 3296x2472 bodů, což odpovídá cca 100 bodů na mm<sup>2</sup>.
- Vyhodnocení a komunikační software – GOM Inspect. [9] [18] [20] [21]



Obr. 15 3D skener Triple cam III od firmy Atos

## 2.3 PŘÍPRAVA 3D SKENERU

Skener je vždy třeba dle požadavků výrobce připravit před měřením. Často má různé měřicí objemy, je třeba zvolit takový, aby se nám měřený objekt do objemu vešel (na jeden záběr). Větší objemy nejsou tolik náchylné na otřesy při měření, nejsou ovšem tolik přesné a dokáží zachytit body s horším rozlišením. Otřesy mohou vyvolat jakékoliv náhodné i systematické otřesy okolí, což může být např. chvění budovy, rázy lisů v nástrojárnách, přítomnost vytěžované silnice či železniční tratě apod. Proto je výběr vhodného objemu velmi důležitý.



Po zvolení musíme vyměnit objektivy, nechat skener nahřát na provozní teplotu a kalibrovat přístroj. Kalibruje se pomocí kalibračních desek, které jsou velmi choulostivé na veškeré nečistoty. Kalibrační objekty jsou tvořeny černými body na bílém pozadí.

Je potřeba dodržet doporučení, aby byly tyto desky ve stejné místnosti jako skener alespoň dvě hodiny před měřením. Tyto desky se položí na stůl, popřípadě rotační stůl, pokud je jím skener vybaven a změříme jejich teplotu. Kvůli případnému poškození při přiložení teploměru se musí měřit teplota vždy pouze na okraji.

Na počítači v programu GOM Inspect nastavíme teplotu a spustíme kalibraci. Pomocí jednotlivých kroků otáčení, přibližování, oddalování a úpravy laserů ji dokončíme. Těmito úkony zajistíme zaostření kamer i ostrost promítaných rastrů na povrchu objektu (s ohledem na hloubku ostrosti systému) a zároveň nastavíme i vyrovnanost intenzit (osvětlení/detekce).

### Postup kalibrace:

- Nechat zahřát senzor na provozní teplotu (teplotní stabilita při měření).
- Zvolení měřicího objemu a příslušné pozice kamer a typu objektivů (kvalita z hlediska přesnosti měření).
- Nastavení správných expozičních časů dle odrazivosti materiálu skenovaného kalibru.
- Postupné měření 12 poloh kolmých na plochu kalibrační desky (různé polohy zaostření systému).
- Postupné měření kalibrační desky pod různými úhly.
- Při kladném výsledku ukončení a uložení kalibrace a hodnot dosažených při kalibraci (předpokládaná přesnost). [9] [17]

## 2.4 PŘÍPRAVA VZORKU

Při měření je důležité, aby byl skenovaný díl matný. U lesklých (vysoce odrazných) ploch často dochází k nežádoucím odrazům a promítaný rastr, pomocí něž systém vyhodnocuje a vytváří mračno bodů, není dostatečně vypovídající. V takových případech je třeba nanést vrstvu, která zajistí dostatečně difuzní povrch. V praxi se používají nejčastěji dvě metody. Titanový povlak, komplikovanější na aplikaci nebo aplikačně jednodušší křídový povlak, který ale vytváří silnější vrstvu a tím může docházet ke zkreslování výsledků. Jedná se o titanový nebo křídový prášek rozpuštěný v technickém lihu v přibližném poměru 1:3. Titanový prášek se nanese pomocí vzduchové stříkácí pistole, která za pomoci podtlaku nastříká na předmět tenkou vrstvu řádově 0,01 mm (Obr. 16).





Obr. 16 Ukázka aplikace titanového povlaku

Křídový prášek se nanáší ve spreji a vytváří vrstvu přibližně 0.1 mm. Předmět musí být nemastný, aby směs byla schopna správně přilnout. Měřit lze bez nebo s referenčními body.

#### 2.4.1 MĚŘENÍ BEZ REFERENČNÍCH BODŮ

Měření bez referenčních bodů snižuje stabilitu měření, proto se takto měří především při snížení nároku na přesnost měření. Tento způsob skenování se také používá u dílů, kde software po nalepení referenčních bodů a otočení součásti při měření není schopen rozeznat dostatek bodů, tedy min. 3.

Výhoda je zrychlení měření. Nevýhoda potom, že díl musí mít dostatečné množství obrysů (dobře rozeznatelných různě orientovaných kontur) a dále série měření musí mít dostatek oblastí překrývajících se s jinými měřeními. Software GOM Inspect pak využívá k transformaci (umístění jednotlivých měření do 3D prostoru) tzv. bestfit – nejlepší tvarovou shodu. To je umístění naskenovaných dat z různých měření tak, aby se v co nejvíce místech poloha uzlových bodů shodovala.

#### 2.4.2 MĚŘENÍ S REFERENČNÍMI BODY

Referenční body (Obr. 17) – anglicky reference points, Pro skener použitý v této práci bylo třeba zvolit správnou velikost optických samolepících referenčních bodů, které se pohybují od průměru 0,8mm do 8mm dle velikosti tělesa a měřícího objemu a také nastavit zvolenou velikost v ovládacím softwaru. Nelepení na objekt musí proběhnout dle následujících pravidel. Imaginární protnutí tří bodů nesmí tvořit přímku a musí být umístěny alespoň o vzdálenost svého průměru.

V některých případech lze použít i magnetické referenční body. Obecně to jsou vlastně dvě soustředné kružnice černé barvy vnitřní a bílé vnější, které jsou schopny kamery rozeznat. Používají se proto, aby si systém uvědomil polohu kamer a pozici skenovaného objektu a dokázal naskenované body z obou pohledů na součást správně umístit v 3D prostoru.



*Obr. 17 Ukázka aplikace referenčních bodů (bez titanového povlaku)*

V praxi se skenovaným předmětem v drtivé většině případů potřebujeme pohnout, natočit jej a provést více měření a proto je použití referenčních bodů nezbytné. V případě nutného titanového nebo křídového povlaku se nejdříve nanese povlak a až poté referenční body. V případě špatného držení povlak v místě, kde má být referenční bod, oťžeme do sucha. [9] [32]

## 2.5 POPIS MĚŘENÍ

Před měřením je nutné připravit skener a vzorek viz kapitoly 2.3 a 2.4. Poté je již možné začít se samotným měřením. Skenovaný předmět se musí umístit v ideálním případě na matnou podložku (viz vliv lesklého povrchu na znehodnocení rastru při skenování kapitola 2.4).

Pokud je k dispozici rotační stůl, položíme předmět na otočný stůl, přibližně do osy otáčení. V softwaru pro ovládání skeneru si vybereme mód rotačního stolu, ve kterém chceme měřit: Automatický nebo Manuální. Manuální, kdy provádíme veškerá jednotlivá měření ručně. Automatický, kdy vybereme výšeč 10-360° ve kterém mají proběhnout jednotlivá měření a počet těchto měření s počtem 2 a více, nejčastěji 6-12.

Výhoda tohoto způsobu měření je rychlost a možnost nepoužívat referenční body. V případě, že potřebujeme doskenovat pouze nějaký pohled – kde není dostatek zachycených bodů, lze přejít do manuálního režimu a doplnit měření o námi potřebný (již nutnost referenčních bodů v případě pohnutí se součástí mezi jednotlivými měřeními. [9] [17] [18]



## 3 REVERZNÍ INŽENÝRSTVÍ

Pojem RE vyjadřuje výrobu, která má opačný postup oproti tradiční výrobě viz Schéma č. 1 a č. 2 v úvodu. Po naskenování dochází k operacím, které vedou k vytvoření 3D modelu, vytvoření výsledných výkresů či zjištění potřebných informací.

Jedná se o zpětnou analýzu, která má za úkol zjistit funkci skenované součásti. Pokud je žádané vyrobit repliku skenované součásti, nemusí vždy rozměry a tvar zcela odpovídat vzoru. Klíčové je zachování funkce.

### 3.1 VYTVORENÍ MODELU

Cílem je dosáhnout plnohodnotného 3D modelu, který dostaneme následujícími kroky navazující na skenování.

#### 3.1.1 ÚPRAVA DAT

Jde o post procesní zpracování dat. Po dokončení sady měření je nejdříve potřeba zkontrolovat mračno bodů a upravit ho tak, aby vznikl pouze čistý model bez podložky. To lze provádět jak v software, který slouží přímo ke skenování, tak i v CAD systémech a dalších na to zaměřených programech jako je např. Rhinoceros. Po úpravě dat je možno přejít k převodu mračna bodů na polygonální síť.

Následným krokem je opravení sítě, zalepení děr a získání základních entit, jako jsou rovinné plochy, válcové plochy, kulové plochy, plochy vyšších řádů a jiné pro rekonstrukci tvaru povrchových ploch rekonstruovaného objektu.

Dalším krokem je spojení těchto entit a jejich případným ořezáním a doplněním o přechodové plochy je možné vytvořit uzavřenou plochu. Je nezbytné pro dostatečnou rekonstrukci skenovat tak, že vytváříme mrak bodů ze všech ploch nebo nenaskenované části nahrazovat např. plochami nebo známou geometrií. Poté se nechá v CAD systému vyvolat funkce na převod z plošného modelu na objemový model, pokud ho požadujeme k navazujícím operacím.

#### 3.1.2 EXPORT DO UNIVERZÁLNÍHO FORMÁTU

Model se musí exportovat do formátu, který umí číst CAD systémy, nejčastěji se používá formát stereolithography (dále STL), který umí přečíst většina programů. Jsou dva typy formátování a to binární, tedy číselný a American Standart Code for Information Interchange (zkratka ASCII), tedy textový, který zabírá více místa.



### 3.2 INTERPRETACE VÝSLEDKŮ

Výsledkem 3D skenování a RE je 3D model. Z něhož je možné získat různé informace o potřebném materiálu, rozměrech, může sloužit jako podklad k výkresům a tedy i výrobě, kontrole výroby, vývoji či k pevnostním simulacím. Výrobou se nerozumí pouze standartní výroba. Model může být použit i pro moderní oblast strojírenství - 3D tisk. Jmenovitě pro:

**Rapid prototyping (dále RP)** – jde o malosériovou výrobu prototypů, která má dodat představu především o vzhledu a nemusí splňovat veškeré pevnostní nároky. Model je rozřezán na mnoho velmi tenkých vrstev, které jsou poté různými metody vrstveny na sebe na 3D tiskárně. RP se uplatňuje nejvíce v automotive.

**Zmenšené/zvětšené i skutečné modely** - reálných výrobků, budov či věcí. Mohou sloužit jako dekorace, pro představu skutečné realizace i jako náhrada za dosavadní výrobek. [18] [19] [20]



## 4 APLIKACE RE VE STROJÍRENSTVÍ

Níže jsou uvedené tři různě obtížné praktické ukázky využití RE z technické praxe v odvětví automotive:

- Oblast poptávkového řízení,
- Oblast kontroly dílů vyrobené pomocí přesného vstříkovaní plastů,
- Oblast oprav vstříkovacích forem.

Je nutné si také upřesnit, co je to vstříkovací forma na plasty. Jedná se o nejpoužívanější způsob výroby plastových dílů, kdy je plast v tekuté podobě s vysokou teplotou vstříknut do formy. Tam je stlačen a ochlazen. Po otevření formy si ponechá tvar dutiny formy.

### 4.1 REKONSTRUKCE MODELU PRO POPTÁVKOVÉ ŘÍZENÍ

Vstupem je hotový výrobek, ke kterému není dostupná žádná výkresová dokumentace ani přibližný model. Ukázka v této práci byla realizována na plastovém potrubí, skládajícího se ze dvou do sebe zalisovaných dílů. Předpokládaným výstupem byl přibližný 3D model pro posouzení odformovatelnosti a vyrobitelnosti s definicí objemu s přijatelnou odchylkou (množství materiálu pro výrobu). Tyto fakta jsou pak stavebními kameny pro nacenění výroby formy a případného sériového lisování. Z hlediska zjištění objemu lze postupovat i několika triviálními způsoby:

**Výpočet:**

$$V = \frac{m}{\rho} \quad [m^3 = \frac{kg}{kg\ m^{-3}}] \quad (3)$$

Za předpokladu, že rekonstruovaný díl je z jednoho materiálu, u kterého známe hustotu  $\rho$ . Hmotnost  $m$ , kterou lze zjistit vážením je potom možné z výše uvedeného vztahu viz rovnice 3 vypočítat objem  $V$ .

#### Konvenční měření

Jednodušší předměty lze změřit kontaktními měřidly. Např. posuvným měřidlem a vymodelovat je v bez skenování, v CAD systému poté odečíst objem tělesa.



Z hlediska rekonstrukce tvaru a tvorby modelu je ve většině případů využití RE nejpřesnější a nejrychlejší metoda. Časová náročnost celého zpracování se pohybuje dle náročnosti skenování v jednotkách až desítkách hodin. Přesnost u tohoto typu využití RE bývá zpravidla dostačující v řádech jednotek mm.



*Obr. 18 Skenované potrubí s referenčními body*

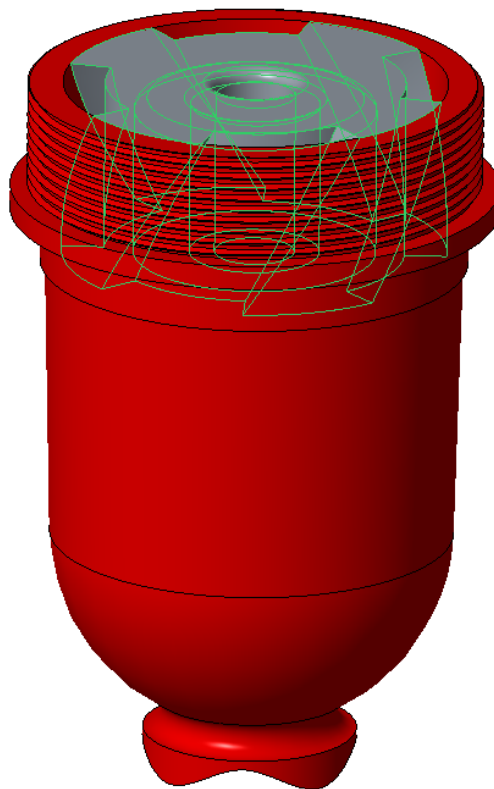
#### **Pracovní postup:**

- Příprava skeneru – nastavení měřicího objemu, kalibrace přístroje dle postupu popsaného v kapitole 2.3.
- Příprava vzorku - nalepení referenčních bodů (Obr. 18) a rozhodnutí, že není potřeba aplikovat zmatňující povlak a rozřezání (Obr. 19) na tři části tak, aby při skenování bylo možné vidět do všech míst. Vše dle pravidel uvedených v kapitole 2.4.



*Obr. 19 Rozřezané skenované potrubí*

- Skenování – skenování každé části zvlášť dle postupu v kapitole 2.5.
- Vyčištění mračna bodů a vygenerování polygonální sítě.
- Vytvoření 3D modelu (Obr. 20) a odečtení objemu.



*Obr. 20 3D model potrubí*

Zde byla použita při tvoření modelu kombinace s alternativní metodou viz kapitola 1.1.2. Spočívá v odečtení důležitých kót z polygonální sítě a ruční překreslení modelu. Některé kóty bylo možné získat i pomocí konvenčních metod přímo z potrubí.

3D model byl zde vytvořen v softwaru PTC Creo 3 Parametric. Programy, které by bylo možné použít, jsou také Catia, Unigraphics, Solid works, Autodesk Inventor a další.

Poté došlo po vytvoření 3D modelu k usazení modelu v GOM Inspect na polygonální síť pomocí funkce bestfit viz kapitola 2.4.1. Tím došlo ke kontrole správného tvaru 3D modelu. Nyní je možné odečíst objem v software od PTC pomocí vyvoláním funkce volum, která určila objem  $V = 208,3 \text{ cm}^3$ .



## 4.2 MĚŘENÍ ODCHYLEK A KONTROLA KVALITY VÝROBY

Vstupem od zákazníka je hotový výrobek s výkresovou dokumentací (popř. i 3D dokumentací) a tzv. inspekčním výkresem. Jedná se o výrobní výkres nebo výkres skupiny s předepsanými kóty, signifikantními znaky a poznámkami, které definují za jakých podmínek, jak často a s jakými výsledky je nutné díly ve vývojovém stádiu i v sériové produkci kontrolovat. Kóty a tolerance, které jsou vyžadovány a je nutno z nich vytvářet záznamy pro dokazování kvality výroby jsou pak označovány jako inspekční.

Výstupem je následně měrový protokol, který porovnává skutečné rozměry a předepsané rozměrové a geometrické tolerance dle výkresové dokumentace pomocí 3D modelů. Tato metoda se označuje jako computer aided inspection (dále CAI). Alternativní metodou k CAI mohou být kontaktní měření, které je ovšem výhodné využít pouze u jednodušších součástí.

Časová náročnost záleží na složitosti výrobku i přesnosti, řádově se pohybuje v desítkách hodin. Přesnost měření realizovaného v rámci této práce byla limitována přesností skeneru, která se pohybuje okolo 0,01 mm, dále bylo třeba uvažovat nepřesnost vlivem titanového pokrytí až 0,01 mm.

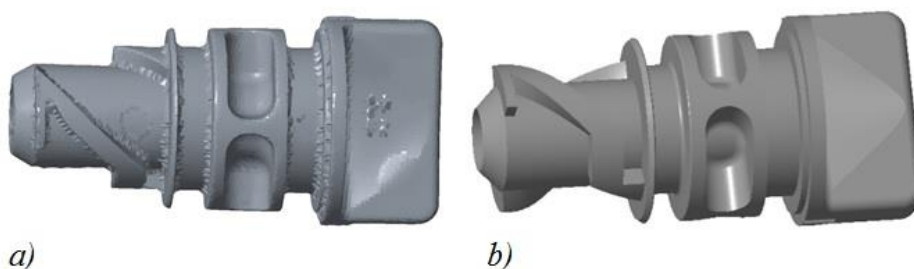
V praxi reálně kromě teoretické tolerance musíme připočítat i vliv chyb při úpravě dat resp. polygonální sítě a chyby při převodu polygonální sítě na objemové těleso, protože CAD systémy pracují s určitým zaokrouhlením. Příklad takového použití je reprezentován na vytvoření ukázky měrového protokolu na zátce s označením Drain-plug.

### Pracovní postup:

- Příprava skeneru - nutno zahřát na provozní teplotu, vybrat měřicí objem a kalibrovat přístroj dle postupu popsáno v kapitole 2.4.
- Příprava vzorku - nalepení referenčních bodů a rozhodnutí, že není potřeba aplikovat zmatňující povlak. Vše dle pravidel uvedených v kapitole 2.3.
- Skenování - naskenování dle postupu v kapitole 2.1.
- Vyčištění mračna bodů a vygenerování polygonální sítě.
- Rekonstrukce – částečná rekonstrukce pouze v místech inspekce (díry, polohy os, vzdálenosti bodů jako průsečík rovin atd.)
- Inspekce – částečná rekonstrukce v předepsaných místech a porovnání modelů a vytvoření měrového protokolu/zprávy dle aktuálních výsledků v porovnání s předepsanými.

Protokol porovnává dva 3D objekty (Obr. 21). Jedním z nich je 3D model reprezentující nominální hodnoty a druhým je polygonální síť, ze které jsou nejčastěji best-fitem získávány základní geometrické entity jako je válec (kontrola průměru), osa (základní entita pro tvorbu řezu), plocha (předpis vzdálenosti), zaoblení (kontrola poloměru). Ty jsou následně porovnávány s 3D modelem.

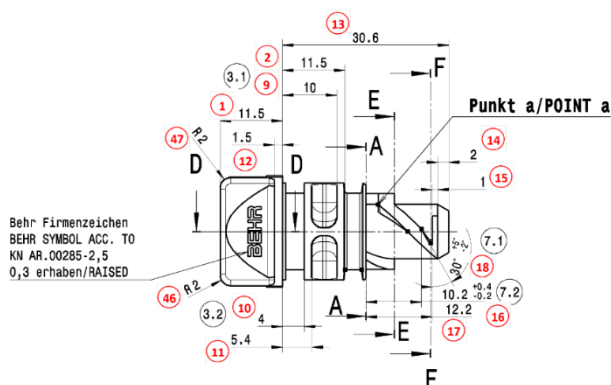




Obr. 21 Zobrazení polygonální sítě ze skenování a 3D modelu pro inspekci

a) vzniklý skenováním, b) vzniklý z výkresové dokumentace

Tato metoda je již sofistikovanější využití 3D skeneru, kde je nutné dodržovat vyšší přesnosti. Je tedy často časově náročnější. Na druhou stranu je možné vytvářet na skutečném modelu šablonu inspekci, kdy naskenovaný díl je pouze vyčištěn (odstranění nežádoucích bodů a oprava polygonální sítě) a zarovnán na 3D model různými metodami (best-fit, 3-2-1, pomocí lokálních best-fitů atd.). Následuje pak pouze automatické zhodnocení přenastaveným inspekčních míst (Obr. 22) a vygenerování protokolu.



Obr. 22 Ukázka inspekční výkresové dokumentace

Na obr. 23 je ukázka výsledného inspekčního protokolu, tabulky obsahující nominální hodnoty, toleranční pole, maximální a minimální hodnoty a skutečně naměřené hodnoty. Dále je zde uvedena odchylka od nominálu a zvýrazněno dle 3 sigma naplnění požadavků tolerančních polí. Spolu s inspekčním protokolem tvoří výsledek měření.

Generated with GOM Inspect V8 gom

Přehled

Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Úhel 04		∠	+32.00	+26.64	-1.00	+1.00	-5.36	<div style="width: 100%; height: 10px; background: linear-gradient(to right, red, white, green);"></div>	-4.36
Rozměr 35		L	+1.63	+1.46	-0.23	+0.03	-0.16	<div style="width: 100%; height: 10px; background: linear-gradient(to right, green, white, red);"></div>	

Obr. 23 Ukázka měrového protokolu



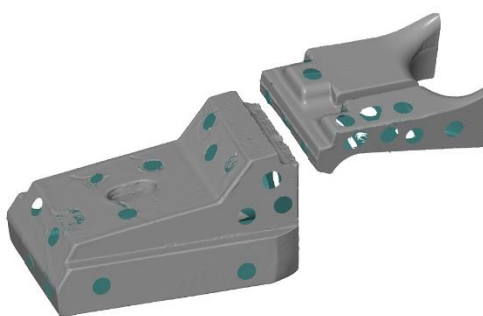
### 4.3 VÝROBA IDENTICKÉHO DÍLU

Vstupem může být funkční i poškozený díl. K dílu bývá nekompletní nebo jako v prezentovaném případě zcela chybějící výkresová dokumentace i jakýkoliv 3D model. V tomto případě se jednalo o tvarovou boční posuvnou čelist (tzv. šíbr) do vstřikovací formy na plasty (Obr. 24), který byl zničen únavovým lomem. Výstupem je v takovémto případě výkresová dokumentace sloužící k vyrobení nového náhradního dílu, který bude splňovat funkci předešlého v plné míře. Je zde tedy kladen především důraz na splnění funkčních podmínek, které jsou dány rozměrovými tolerancemi, geometrickými tolerancemi, drsností povrchu, tvarovou návazností na okolní díly (těsnost formy) a typ použitého materiálu s požadovanou tepelnou úpravou.



Obr. 24 Skenovaná součást přelomená na dvě části

Alternativní metodou je opět kontaktní měření, které je ovšem z časových důvodů nevýhodné a u složitějších dílů velmi nepřesné. Tato ukázka užití RE je časově nejnáročnější, protože je zde kladen důraz na schopnost dílu těsnit ve formě, na tvorby konstrukčního uzlu společně s okolními díly, které formují tvar plastového výlisku atd.. V případě nejistot především tvarových ploch je navíc nutné zachovat pravidlo opravitelnosti, tedy v problematických místech raději ponechat více materiálu (řádově 0,1 až 0,05 mm) a upravit součást až při samotné montáži.



Obr. 25 Naskenovaná součást

Materiál a povrchové úpravy volíme, pokud to jsme schopni určit, dle skenovaného dílu. Případně navrhneme nově s ohledem na funkci, požadované vlastnosti i trvanlivost. Obecně jsou zde vysoké požadavky na RE, v tomto případě ale i na znalost výroby vstřikovacích forem a jejich montáže.

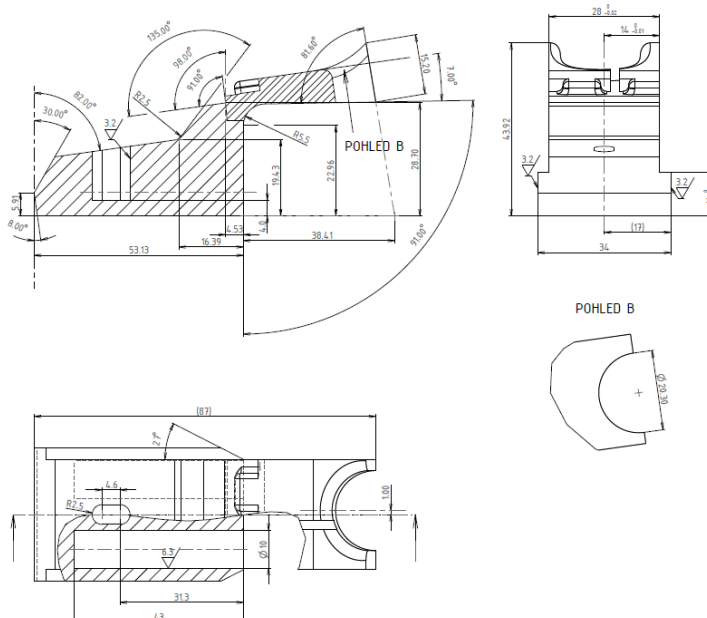


### Pracovní postup:

- Příprava skeneru - nutno zahřát na provozní teplotu, vybrat měřicí objem a kalibrovat přístroj dle postupu popsáno v kapitole 2.4.
- Příprava vzorku - nalepení referenčních bodů a rozhodnutí, že není potřeba aplikovat zmatňující povlak. Vše dle pravidel uvedených v kapitole 2.3.
- Skenování - naskenování dle postupu v kapitole 2.1.
- Vyčištění mračna bodů (Obr. 25) a vygenerování polygonální sítě.
- Rekonstrukce – kompletní rekonstrukce dílu na základě ručního měření a polygonální sítě
- Vyčištění mračna bodů a vygenerování polygonální sítě.
- Vytvoření 3D modelu a výkresové dokumentace
- Výroba a případné doladění tvaru dle reálné zástavby ve formě

Využití 3D skeneru a RE tímto způsobem je vzhledem ke znalosti systémů a doby zpracování nenáročnější ze všech tří prezentovaných ukázek. Je zde nutné znát nejen problematiku konstrukcí, ale také dobře ovládat metody skenování a rekonstrukcí pomocí RE.

Na Obr. 26 je ukázka výkresové dokumentace se znázorněním místa lomu tlustou čarou a odlišením dílčích rekonstruovaných částí odlišným šrafem. Pro rekonstrukci v tomto případě byly použity best-fity rovinných ploch s podmínkami kolmosti a best-fity pro válcové plochy. Dále vzhledem ke komplikovanosti lomu a špatného stanovení poloh obou částí vůči sobě bylo nutné odměřit a odhadnout jejich pozice z formy a reálného výlisku. Došlo tedy ke kombinaci všech dostupných zdrojů pro dosažení požadovaného výsledku.



Obr. 26 Ukázka výkresové dokumentace



## ZÁVĚR

Cílem práce bylo zpracování přehledu využití 3D skenerů, které se staly nedílnou součástí nejen strojírenství. Důležité jsou také v stavebnictví, lékařství, archeologii i v oblasti umění. Technologie skenování a RE se neustále vyvíjí a má značný potenciál prosadit se i do dalších odvětví. Nyní se však nejvíce uplatňuje především v automobilním průmyslu, kde se pracuje se složitými křivkami a obecnými tvarovými plochami a digitalizace jinou metodou by byla obtížná.

Dle způsobu snímání lze rozdělit 3D skenery na 6 základních typů – mechanické, optické, ultrazvukové, rentgenové, laserové a 3D skener využívající magnetické resonance. Každý druh je specifický svojí přesností, počtem zachycených bodů, rychlostí měření, rozlišením, robustností, měřicím objemem, vhodností na určité materiály i pořizovací cenou. Tato škála naznačuje, že je nutné pro konkrétní měření v daném odvětví zvolit správný typ.

V neposlední řadě jsou obsaženy i tři příklady užití RE v technické praxi včetně ukázky měrového protokolu, rekonstruovaného modelu a výkresové dokumentace. A to jmenovitě:

### Zjednodušený model pro zjištění objemu

V tomto případě skenování zabralo cca 5 hodin a vytvoření 3D modelu také 5h. Dohromady 10 hodin práce. Přesnost vzniklého modelu je zde nejmenší a dosahovalo 0,5 mm, což je pro dané účely dostačující.

### Měření odchylek a kontrola kvality výroby

Zde si bylo potřeba vyčlenit na skenování cca 5 hodin času a na vypracování měrového protokolu 10 hodin. V součtu tedy okolo 15 hodin práce. Odhad dosažené přesnosti byl  $\pm 0,02$  mm, tedy o řád přesnější než požadavky dle předepsaných tolerančních polí. Tento způsob kontroly výroby je ideální pro sériovou výrobu.

### Výroba identického dílu

Samotné skenování trvalo cca 11 hodin, vytvoření 3D modelu cca 10 hodin a výkresová dokumentace včetně úprav a konzultací s nástrojárnou 44 hodin. Časově nejnáročnější ukázka užití, která si vyžádala okolo 65 hodin práce. Výrobek musel být upraven ještě při montáži. To se očekávalo, vzhledem k míře poškození a opotřebení skenovaného dílu. Po odebrání přebytečného materiálu a vložení do vstřikovací formy plní funkci předešlého poškozeného dílu.



## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Zamet. Upínky. *Zamet.cz* [online]. ©2011 [cit. 2016-5-22]. Dostuné z: <http://www.zamet.cz/cz/2-upinky.html>
- [2] SEDLÁK, Josef. *Technologie výroby prototypů s podporou reverzního inženýrství a CAD/CAM*. V Brně: Vysoké učení technické, 2008. Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně. Phd Thesis. ISBN 978-80-214-3689-3.
- [3] SolidVison. 3D skenování. *Solidvision.cz* [online]. 2016 [cit. 2016-5-22]. Dostuné z: <http://www.solidvision.cz/3d-skenovani/>
- [4] Mcae. Reverzní inženýrství. *Mcae.cz* [online]. ©2016 [cit. 2016-5-22]. Dostuné z: <http://www.mcae.cz/reverzni-inzenyrstvi>
- [5] ROWE, Jeffrey. *Reverse Engineering With Solidworks and Inventor* [online]. San Jose, 2006. Dostuné z: [http://gocreative.net/070207-MCADCafe\\_Reverse-Engineering\\_Dec06.pdf](http://gocreative.net/070207-MCADCafe_Reverse-Engineering_Dec06.pdf)
- [6] Mitutoyo. Crysta-Apex S Coordinate Measuring Machine. *Mitutoyo.com* [online]. ©2012 [cit. 2016-5-22]. Dostuné z: <http://www.mitutoyo.co.uk/hometabs/top-rated/191-s9106>
- [7] Mcae. Atos triple cam. *Mcae.cz* [online]. ©2016 [cit. 2016-5-22]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/atos-core>
- [8] Triangulace. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11. 12. 2006, last modified on 18. 2. 2014 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Triangulace>
- [9] Mcae. *Návod na obsluhu 3D skeneru Atos triple cam*.
- [10] ZATOČILOVÁ, Aneta. *Konstrukce formy pro výrobu trupu ultralehkého letounu*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. <http://igdm.vsb.cz/igdm/materialy/Fotogrammetrie.pdf>
- [11] BÖHM, Jozef. *Fotogrammetrie* [online]. Ostrava, 2002 [cit. 2016-5-22]. Dostupné z: <http://igdm.vsb.cz/igdm/materialy/Fotogrammetrie.pdf>
- [12] Nsi, Cxmm 50. *Nsi.com* [online]. ©2016 [cit. 2016-5-22]. Dostupné z: <http://4nsi.com/news/2016/01/11/nsi-celebrates-30-years-of-ingenuity/>
- [13] Ge measurement, GRP – Ultrasonic Tube and Pipe Tester. *Gemeasurement.com* [online]. 2016 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <https://goo.gl/4t50ZP>
- [14] Katedra výrobních systémů a automatizace. Souřadnicové měřicí stroje. *Ksa-tul.cz* [online]. 2011 [cit. 2016-5-22]. Dostuné z: <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522>
- [15] CAGAŠ, Radek. *Analýza teplotních deformací plastového dílu pomocí optické digitalizace*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.



- [16] CHARVÁT, Jan. *Využití 3D modelování v elektronickém obchodě*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta podnikatelská, Ústav informatiky.
- [17] ČERMÁK, Jan. *Metody 3D skenování objektů*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky.
- [18] HAVEL, Zbyněk. *Využití reverzního inženýrství ve strojírenské technologii*. Zlín, 2014. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství.
- [19] JANEČKA, Karel. *Digitalizace výfukového potrubí*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
- [20] WEIDNER, Lukáš. *Trojrozměrné skenovací systémy*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
- [21] ŠNAJDÁREK, Ladislav. *Metody 3D laserového skenování obrobků ve výrobním procesu*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky.
- [22] ŘEHÁK, Martin. *Využití bezpilotních prostředků ve fotogrammetrii*. Praha, 2012. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Katedra mapování a kartografie.
- [23] ZATOČILOVÁ, Aneta. *Měření a vyhodnocování přímosti osy rotačních výkovků pomocí fotogrammetrie a analýzy obrazu*. Brno, 2014. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, Odbor reverzního inženýrství a aditivních technologií.
- [24] KELLER, Petr a Petr ZELENÝ. *Obsluha měřících zařízení, kontaktní metody* [online]. Liberec, 2015 [cit. 2016-5-22]. Dostupné z: <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2518>
- [25] Katedra výrobních systémů a automatizace. *3D měření a optická digitalizace, reverzní inženýrství*. *Ksa.tul.cz* [online]. 2016 [cit. 2016-5-22]. Dostupné z: <http://www.ksa.tul.cz/pro-firmy/3d-mereni-a-opticka-digitalizace-reverzni-inzenyrstvi>
- [26] Land managment. *Metoda laserové skenování*. *La-ma.cz* [online]. 2011 [cit. 2016-5-22]. Dostupné z: <http://www.la-ma.cz/?p=88>
- [27] Mcae. *3D digitalizace*. *Mcae.cz* [online]. ©2016 [cit. 2016-5-22]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/3d-digitalizace-a-mereni>
- [28] Leica. Geosystems. *Leica-geosystems.com* [online]. ©2016 [cit. 2016-5-22]. Dostupné z: <http://leica-geosystems.com/>
- [29] Mcae. *Atos Scan Box*. *Mcae.cz* [online]. ©2016 [cit. 2016-5-22]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/atos-scan-box>
- [30] MENDŘICKÝ, Radomír a Petr KELLER. *3D skenery pro použití průmyslu* [online]. 2015 [cit. 2016-5-22]. Dostupné z: <http://automa.cz/res/pdf/54325.pdf>



- [31] Mcae. Atos Triple Cam. *Mcae.cz* [online]. ©2016 [cit. 2016-5-22]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/atos>
- [32] LOWY, Vít. *Získání 3D informací o struktuře vyvíjeného materiálu SI3N4 pro válcování legovaných drátů*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

2D		two dimensional, dvojrozměrný
3D		three dimensional, trojrozměrný
ASCII		American StandardC for Information
automotive		automobilní průmysl
BP		bakalářská práce
CAD		computer aided design, počítačem podporované projektování
CCD		charge coupled device
CT		computed tomography, počítačová tomografie
m		metr
mm		milimetr
MRI		magnetic resonance imaging, zobrazování pomocí magnetické resonanci
RE		reverse engineering, revezní inženýrství
RP		rapid prototyping
RTG		rentgenové záření
SM		speciální materiál
SMS		souřadnicový měřicí stroj
STL		stereolithography
$x'$	[m]	souřadnice $x'$
$x''$	[m]	souřadnice $x''$
$\rho$	[kg m <sup>-3</sup> ]	hustota, měrná hmotnost
$P^x$	[m]	souřadnice bodu P v ose x
$P'$	[m]	souřadnice bodu P zachyceného z levé strany
$P''$	[m]	souřadnice bodu P zachyceného z pravé strany
$V$	[m <sup>3</sup> ]	objem
$b$	[m]	souřadnice b
$f$	[m]	souřadnice f
$m$	[kg]	hmotnost
$p$	[m]	souřadnice p
$z$	[m]	souřadnice z
$z'$	[m]	souřadnice $z'$





## **SEZNAM PŘÍLOH**

- 1) 3D model potrubí (pouze v elektronické verzi)
- 2) Inspekční výkres zátky 01
- 3) Inspekční výkres zátky 02
- 4) Měrový protokol zátky
- 5) Výkres posuvné čelisti