

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní



**Inovace rozměrového měření ve
Škoda Auto**

Dimensional measurement innovation in the Škoda Auto

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR THESIS

JOSEF ŘEHOŘÍK

AUTOR / AUTHOR

doc. Ing. RUDOLF DVOŘÁK, CSc.

VEDOUČÍ PRÁCE / SUPERVISOR

Praha, 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Řehořík** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **424670**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Inovace rozměrového měření ve Škoda Auto

Název bakalářské práce anglicky:

Dimensional measurement innovation in the ŠKODA Auto

Pokyny pro vypracování:

1. Popis stávající problematiky
2. Aplikace nové metody měření
3. Porovnání původního a navrženého měření
4. Zhodnocení a přínos výsledků inovace

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Rudolf Dvořák CSc., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji panu doc. Ing. Rudolfu Dvořákovi, CSc. za jeho rady, připomínky a čas strávený vedením této práce. Také děkuji panu Ing. Ambrózu Bothovi ze společnosti MCAE Systems, který si našel čas pro předání a vysvětlení podstatných a důležitých informací.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci vypracoval samostatně, pouze pod odborným vedením pana doc. Ing. Rudolf Dvořák, CSc. Dále prohlašuji, že veškeré podklady a zdroje ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze, 10.7.2017

.....

Podpis

Anotace

Tato práce se zabývá měřením rozměrů modelů zařízení a konstrukcí pro zpracování karoserií vozů Škoda, také jednotlivých částí těchto karoserií, popisem inovace této činnosti a vyjádřením jejího přínosu ve společnosti Škoda Auto. Bude popsáno měření objektů pomocí Souřadnicového Měřicího Stroje (SMS), fotogrammetrie a prostřednictvím optického 3D skenování, konkrétně s využitím technologie fringe projection. Vysvětlím rozdíly mezi nimi a výhody každého z nich. Tato práce také vyjadřuje podstatu a postup 3D digitalizace reálných fyzických předmětů a provázanost mezi výstupy této technologie měření a CAD modely. Při této práci byly čerpány teoretické podklady a informace mimo jiné také od společnosti MCAE Systems, od které přístroje pro optické měření firma Škoda Auto pořídila. Prostřednictvím tohoto zařízení byla realizována praktická část této práce. Cílem je zhodnotit přínos nasazení tohoto bezkontaktního měření a představení jeho výhod oproti měření pomocí SMS v praxi, kdy se pomocí něj reálně vyvíjí přípravky pro lemování plechů částí karoserií automobilů, v tomto případě konkrétně vozu KODIAQ.

Klíčová slova

CAD model. CCD čip. Digitalizace. Fotogrammetrie. Proužková projekce. Měření. Mračno bodů. Polygonální síť. Reverzní inženýrství. Souřadnicový měřicí stroj – SMS. STL model. Strukturované světlo. Triangulace. 3D skenování. 3D inspekce.

Abstract

This thesis deals with the measurement of the dimensions of the equipment and structures for the Škoda bodywork, the individual parts of these bodies, the description of the innovation of this activity and the explanation of its contribution to Škoda Auto Company. Measurement of objects using Coordinate Measuring Machines (CMM), photogrammetry and optical 3D scanning will be described, using fringe projection technology. I will explain the differences between them and the benefits of each. This thesis also expresses the essence and progress of 3D digitization of real physical objects and the interconnection between outputs of this measurement technology and CAD models. In this thesis, theoretical backgrounds and information were also taken from MCAE Systems Company, from which Škoda Auto acquired optical measuring instruments. A practical section of this thesis was implemented through this device. The aim is to evaluate the benefits of using this contactless measurement and presenting its advantages throughout SMS measurement in practice, when it is actually developing the products for sheet metal trimming of car body parts, in this case KODIAQ in particular.

Keywords

CAD model. CCD chip. Digitalization. Photogrammetry. Fringe projection. Measurement. Cloud of points. Measuring. Polygonal mesh. Reverse engineering. Control Measuring Machine – CMM. STL model. Structure light. Triangulation. 3D scanning. 3D inspection.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ, ZKRATEK A TERMÍNŮ	8
ÚVOD.....	9
1 ZPŮSOBY MĚŘENÍ ROZMĚRŮ A SKENOVÁNÍ	10
1.1 MĚŘENÍ KONTAKTNÍMI METODAMI	10
1.1.1 <i>Přístroje pro dotykové měření.....</i>	<i>11</i>
1.2 MĚŘENÍ BEZKONTAKTNÍMI METODAMI.....	11
1.2.1 <i>Pasivní metody</i>	<i>12</i>
1.2.2 <i>Aktivní metody.....</i>	<i>13</i>
2 MĚŘENÍ POMOCÍ CMM.....	14
2.1 HISTORIE.....	14
2.2 TECHNOLOGIE A PRINCIP	15
2.3 KONSTRUKCE CMM	15
2.4 SPÍNACÍ MĚŘICÍ SONDY.....	16
2.5 MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PRO KONSTRUKCI CMM	16
2.5.1 <i>Kompozitní materiály.....</i>	<i>16</i>
2.5.2 <i>Keramika.....</i>	<i>16</i>
2.5.3 <i>Ocel.....</i>	<i>17</i>
2.5.4 <i>Granit.....</i>	<i>17</i>
2.5.5 <i>Al a jeho slitiny</i>	<i>17</i>
2.6 POSTUP KONTROLY SOUČÁSTI NA CMM.....	17
3 3D OPTICKÉ MĚŘENÍ A SKENOVÁNÍ.....	18
3.1 CCD ČIP	18
3.2 FRINGE PROJECTION	19
3.3 STL SOUBOR.....	20
3.4 FOTOGRAMMETRIE	20
3.5 TRIANGULACE	21
3.5.1 <i>Aktivní triangulace.....</i>	<i>21</i>
3.5.2 <i>Pasivní triangulace</i>	<i>21</i>
3.6 3D BEZKONTAKTNÍ SKENERY	22
3.6.1 <i>Laserové skenery.....</i>	<i>22</i>
3.6.2 <i>Triangulační skenery.....</i>	<i>23</i>
3.7 3D SKENER ATOS	23

3.8	DALŠÍ VYUŽITÍ OPTICKÉHO MĚŘENÍ A SKENOVÁNÍ	26
3.8.1	<i>Reverzní inženýrství</i>	26
3.8.2	<i>Rychlá výroba</i>	26
4	APLIKACE INOVATIVNÍHO MĚŘENÍ VE ŠKODA AUTO.....	28
4.1	VYUŽÍVANÉ SOFTWARE	28
4.1.1	<i>GOM Inspect Profesion</i>	28
4.1.2	<i>CATIA V5 R18</i>	28
4.1.3	<i>Tebis</i>	28
4.2	POSTUP KONSTRUKCE A VÝROBY ZAŘÍZENÍ.....	29
5	ZHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ MĚŘENÍ CMM A SKENOVÁNÍM.....	32
5.1	MĚŘENÍ CMM	32
5.2	MĚŘENÍ OPTIKOU.....	33
5.3	ŘEŠENÍ PROBLÉMU TRANSPARENTNOSTI A LESKLOSTI MATERIÁLU	34
5.4	EKONOMICKÉ HLEDISKO	34
5.5	ČASOVÉ HLEDISKO	35
	ZÁVĚR	36
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ	37
	SEZNAM OBRÁZKŮ	40
	SEZNAM PŘÍLOH.....	41

Seznam symbolů, zkratek a termínů

CAD model: počítačový 3D model vytvořený v CAD softwaru

CCD čip: Charge coupled device, elektronická součástka pro snímání obrazové informace, nachází se ve fotoaparátech, skenerech, apod.

CMM – Control Measuring Machine

MKP (FEM) – Metoda Konečných Prvků (Finite Element Method): způsob zjednodušeného analytického výpočtu, např. zatížení, deformací, rozložení objektu modelu na malé jednoduché části

STL – Standard Triangulation Language: standardizovaný typ souboru pro uložení 3D modelu reprezentovaného polygonální sítí

CT – Computer Tomography: multisenzorový souřadnicový stroj se senzorem pro počítačovou tomografii, umožňuje nedestruktivní defektoskopii uvnitř součásti

Al - hliník

ToF – Time of Flight: technologie laserových skenerů, kdy se pro výpočet využívá doba letu paprsku

SW: software

CNC (Computer Numeric Control): počítačem číslicově řízený stroj

IT: toleranční stupeň, existuje 19 stupňů přesnosti

€ – euro: symbol měny eurozóny

Úvod

Měření rozměrů v průmyslu je jistým předpokladem pro docílení funkčnosti prakticky všeho, co se snažíme vyrobit. Tedy veškerých součástek, dílů nebo komponent. Měření rozměrů, řízení jakosti a kontrola kvality, je jeden z nástrojů, jak dodržovat, řídit a splňovat podmínky a kritéria pro požadovanou a deterministickou výrobu a konkurenceschopnost.

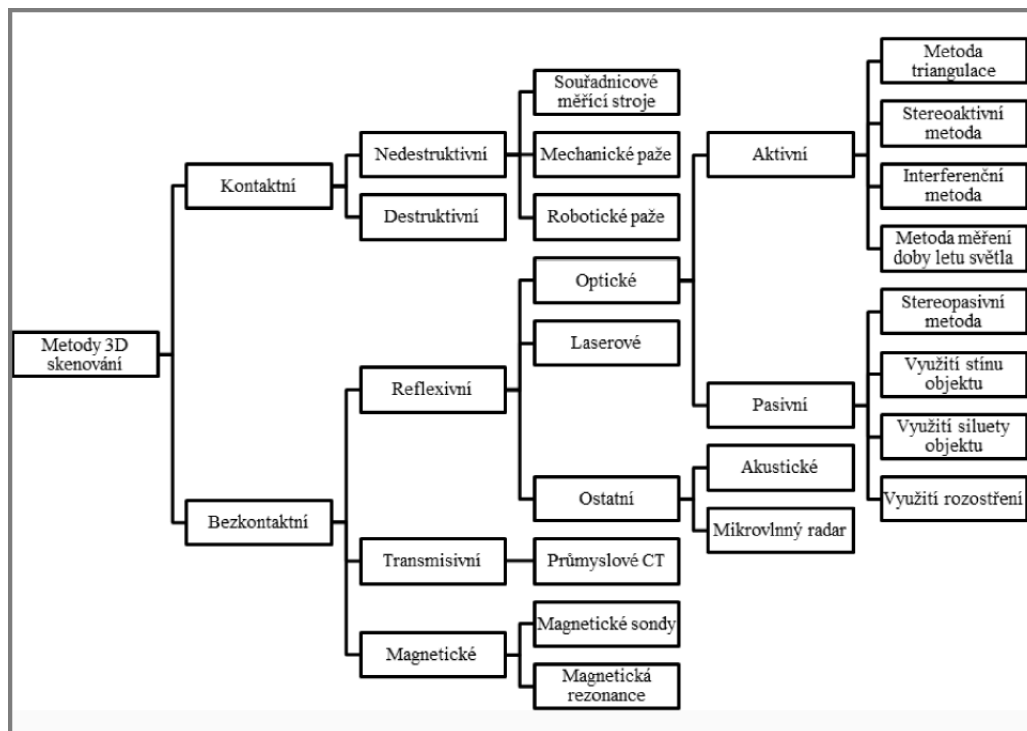
Měření geometrických vlastností je možno provádět několika způsoby. Kontaktní metody, kdy se měřidlo dotýká zkoumaného povrchu objektu, jsou realizovány již od starověku. S čím dál vyspělejší současností je jednoznačně spjata poptávka po rostoucí kvalitě s klesajícím časovým prostorem na plánování, přípravu i výrobu. Před přibližně dvěma dekádami bychom výhradně mluvili o Souřadnicových Měřicích Strojích (SMS). Dnes je již ale měření čím dál častěji realizováno pomocí optických, tedy bezkontaktních měřicích přístrojů prostřednictvím 3D skenování. Díky vědám a jejich hlubšímu porozumění až do dnešní podoby, jako je například matematika, fyzika nebo chemie, jsme získali možnost pro měření geometrických vlastností předmětů prostřednictvím metod, kdy měřicí přístroje mohou být vzdáleny od zkoumaných objektů od jednotek několika milimetrů až po stovky metrů. Ve strojírenství, pro přesnost a rozsah měření, se tyto metody uplatňují „jen“ do pár desítek metrů. V závislosti na těchto vzdálenostech, okolních podmínkách a povrchových vlastnostech zkoumaných objektů se vybere metoda taková, která zaručí nejrychlejší, nejpreciznější a největší množství informací o geometrickém povrchu. Výběr může být do jisté míry volen také podle následné složitosti práce s daty a jejich vyhodnocování. Snad největší roli vždy hraje čas celého procesu. Následkem je nejen úspora času a energie, ale také finančních prostředků.

Jednou z předních firem na světě zabývajících se tímto optickým měřením je Německá společnost GOM (Gesellschaft für Optische Messtechnik). V České republice nepůsobí přímo. Má zde ale silného partnera, tou je firma MCAE Systems (Mechanical Computer Aided Engineering), jejichž přístroje ve Škoda Auto byly pořízeny především za účelem inovativního přístupu ve výrobě konstrukcí a přípravků (vytavitelných modelů) pro (odlévání) tváření plechů částí automobilových karoserií.

Vývoj CMM i optických měřicích systémů souvisí se zpřesňováním a zrychlováním výrobního procesu, se kterým musí měřicí technika držet krok. Průměrně každých 10 až 15 let se přesnost výroby zvyšuje o jeden stupeň (IT).

1 Způsoby měření rozměrů a skenování

Zjišťování rozměrů těles, měření geometrických vlastností, je vždy možné dvěma způsoby, a to buď kontaktně nebo bezkontaktně. V případě, kdy se rozměry nezjišťují prostřednictvím dotyku zkoumaného povrchu a přístroje pro měření, může toto měření sloužit také pro digitalizaci objektů a tím získávání 3D dat, v podobě virtuálního modelu těchto objektů. Skenování objektů je možné provádět pomocí několika technologií. Například pomocí fotogrammetrie, laserového paprsku, triangulace, CT nebo interference. Tato skutečnost nachází široké uplatnění například v reverzním inženýrství, 3D inspekci, aditivní výrobě (3D tisku/Rapid prototyping), v architektuře nebo při geodetických mapování, například fotogrammetrii.



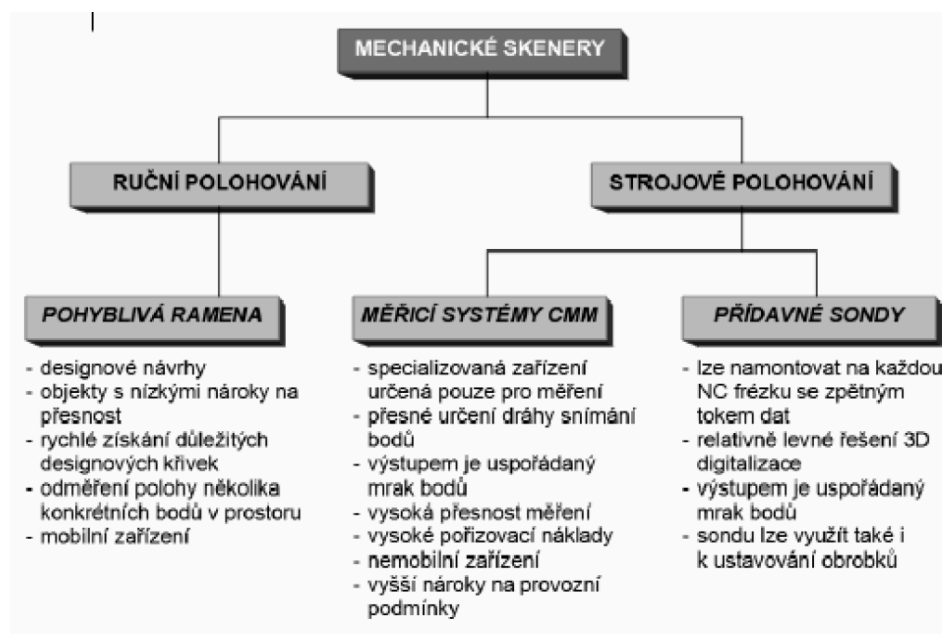
Obr. 1 Rozdělení metod 3D skenování [1]

1.1 Měření kontaktními metodami

Principem kontaktních metod měření geometrických vlastností předmětů je fyzický kontakt senzoru skeneru a povrchu skenovaného objektu. Tyto metody lze dále dělit na destruktivní, kdy dochází ke zničení měřeného předmětu prostřednictvím postupným odfrézováním jednotlivých tenkých vrstev v řádu tisícín milimetru a nedestruktivní. [1, 2]

1.1.1 Přístroje pro dotykové měření

Nejčastějším a nejběžnějším strojem pro takové zkoumání geometrických charakteristik povrchu předmětů je CMM. Nejčastěji je takové měření realizováno CMM, skenery s mechanickou nebo robotickou paží pomocí speciálních sond. Měření a digitalizace velkých předmětů je tedy z principu časově náročná. Výhodou ale je vykreslení i neprůchozích děr nebo dutin. Více o něm bude pojednáno v kapitole 2. [1, 2]

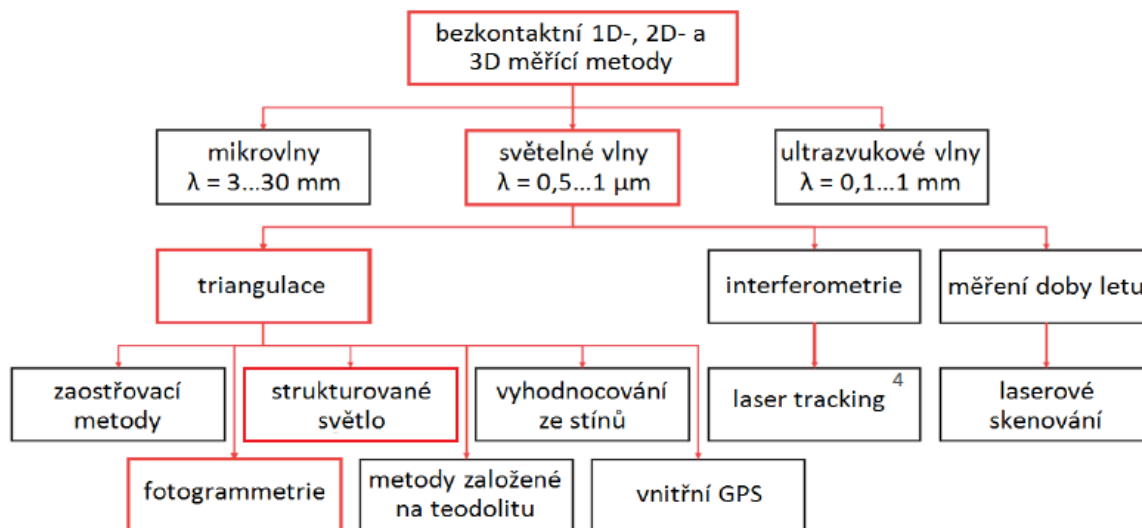


Obr. 2 Mechanické skenery [3]

1.2 Měření bezkontaktními metodami

Měření tímto způsobem probíhá prostřednictvím naskenování, resp. digitalizace, případně fotogrammetrie, fyzického tělesa a následného porovnávání s CAD modelem vymodelovaného klasickým způsobem prostřednictvím CAD softwaru, v případě fotogrammetrie pouze vyfotografováním předmětu, na kterém jsou nalepeny referenční značky.

Rozdělení 3D rekonstrukce reálných objektů lze interpretovat několika způsoby. Nejobecnější dělení je do skupiny aktivní a pasivní. [4] Díky jednoduchosti, přesnosti a rychlosti skenování jsou dnes nejrozšířenější variantou 3D skenerů na trhu. Mohou se dělit na magnetické, transmisivní a reflexivní. [7]



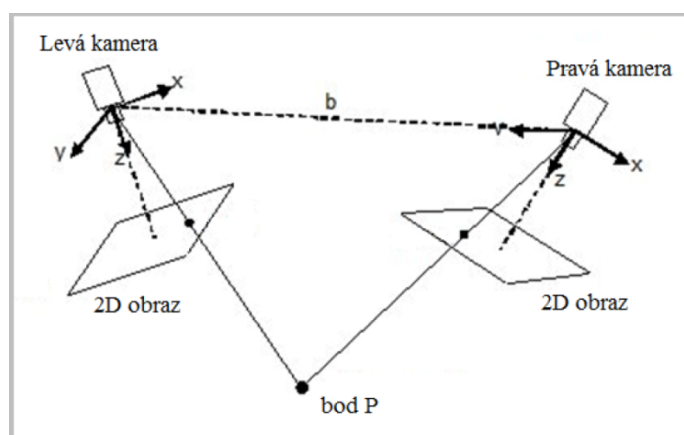
Obr. 3 Rozdělení bezkontaktních optických metod měření dle vyhodnocované délky [6]

1.2.1 Pasivní metody

V geometrickém uspořádání měřicího systému se nenachází zdroj osvětlení. Energie se zde pouze přijímá, ale neemituje. Základní podstatou je pořízení alespoň dvou snímků kamerou při změnách pohledů nebo scény. Často se využívá více kamer najednou se známou orientací. [7]

Mezi pasivní metody patří měření geometrických vlastností např. pomocí:

- stereovidění
- analýzy pohybu
- stínování
- změny ohniska [8]



Obr. 4 Typický stereovizní systém [9]

1.2.2 Aktivní metody

Aktivní metody řeší korespondenční problém pasivních metod tím, že emitují danou formu energie na povrch měřeného objektu nebo s ním napřímo interagují. Široké uplatnění mají především optické metody, které se v praxi stále více uplatňují v mnoha průmyslových odvětvích. Mezi tyto metody patří např. triangulační metody, konkrétně fringe projection. [7]

U aktivních triangulačních metod se k označení povrchů používá:

- světelný paprsek (1D triangulace)
- světelný pruh (2D triangulace)
- strukturované světlo (3D triangulace)

Mezi aktivní metody patří:

- triangulace
- aktivní stereovidění
- interferenční
- měření doby letu světla (ToF – Time of Flight) [10]

2 Měření pomocí CMM

Měření pomocí Control Measuring Machine patří do skupiny kontaktního, nedestruktivního měření. Měřený objekt je pevně upevněn k referenční podložce a následně prostřednictvím polohovacího ramene, na kterém je sonda s kuličkou připevněna, bodově snímá 3D data z objektu pro následnou digitalizaci. Kuličky jsou nejčastěji vyráběny ze syntetického rubínu.



Obr. 5 Portálový CCM Zeiss Accura [5]

2.1 Historie

Počátky vývoje těchto strojů sahá do 50. let 20. století, za účelem komplexního měření součásti, tedy jejího rozměru, tvaru a vzájemné polohy geometrických prvků na součásti. Nasazení prvních CMM se omezovalo na metrologickou laboratoř. Poměrně rychle se však začaly prosazovat také v dílenském prostředí, kde se rychle uplatňovaly jejich přednosti proti tehdy konvenční měřicí technice. Výrobci CMM museli řešit s tímto přechodem řadu nových problémů, zejména jak se vypořádat s nepříznivými dílenskými podmínkami, jako je kolísání okolní teploty, chvění a otřesy způsobené výrobním zařízením či nepříznivý vliv chladicích tekutin.

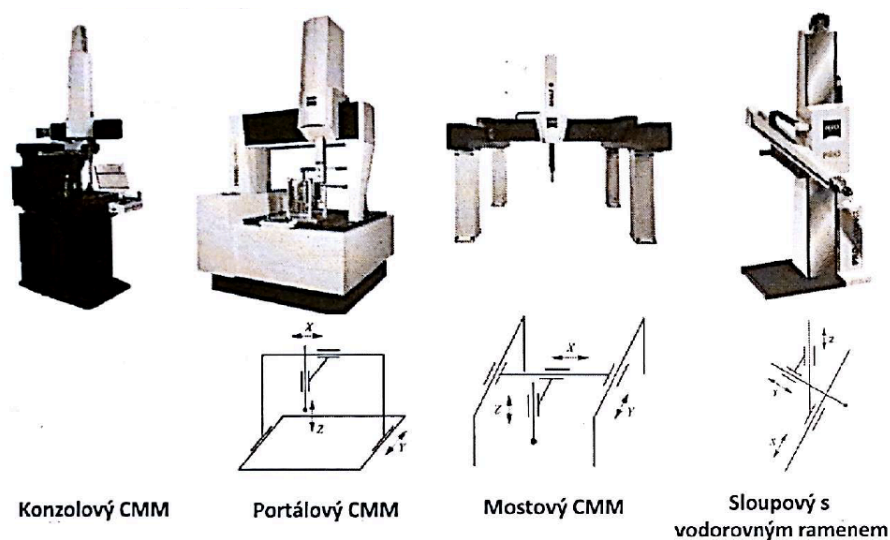
Dnes hlavně využívána možnost metrologického zachycení obecných tvarových ploch definovaných CAD modelem.

2.2 Technologie a princip

Princip souřadnicového měření spočívá v tom, že stanovíme základní bod v prostoru a polohy dalších bodů na měřené součásti měříme formou souřadnicových rozměrů v osách X, Y, Z. CMM jsou odvozeny z hlediska metrologie od měřicích mikroskopů, z hlediska konstrukce (technologicky) od NC frézek. [17]

2.3 Konstrukce CMM

Z pohledu konstrukce se tyto stroje dají rozdělit dle klasického typu na mostové, portálové, konzolové nebo portálové a podle speciálních typů například na stroje pro měření ozubených kol.



Obr. 6 Některé typy CMM [12]

Vlastní konstrukce umožňuje pohyb sondy ve třech základních směrech (vodorovně, příčně, svisle). Každý stroj má svá délková měřidla. Většinou se používají skleněná nebo keramická pravítka, kde jsou laserově vypáleny jednotlivé dílky (po 0,1 μm) a bývají ve všech třech osách. Materiál je volen takový, aby byla co nejmenší tepelná roztažnost.

2.4 Spínací měřicí sondy

Jsou to elektromechanické sondy, jejichž funkce je založena na změně magnetické indukce, odporu nebo optickém principu, kdy při kontaktu dojde k vychýlení světelného nebo laserového paprsku v soustavě zrcadel, které zaznamenává optické čidlo. [16]



Obr. 7 Kuličková dotyková sonda [11]

2.5 Materiály používané pro konstrukci CMM

2.5.1 Kompozitní materiály

Pozitiva:

- + vysoká pevnost
- + velmi nízká hmotnost
- + teplotně stabilní materiál

Negativa:

- cena

2.5.2 Keramika

Pozitiva:

- + vysoká pevnost
- + nízká hmotnost
- + teplotně stabilní materiál

Negativa:

- cena

2.5.3 Ocel

Pozitiva:

+ nejdostupnější konstrukční materiál

Negativa:

- velká hmotnost
- teplotní roztažnost

2.5.4 Granit

Pozitiva:

- + otěruvzdornost
- + dobře pohlcuje vibrace
- + teplotně stabilní materiál

Negativa:

- menší pevnost než keramika
- vyšší hmotnost konstrukce

2.5.5 Al a jeho slitiny

Pozitiva:

+ nízká hmotnost

Pozitivní i negativní vlastnosti:

- ± nízká teplotní roztažnost
- ± velká teplotní vodivost [12]

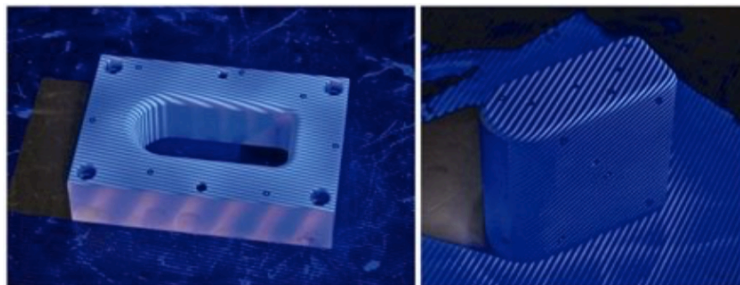
2.6 Postup kontroly součásti na CMM

1. Analýza výkresové dokumentace
2. Definování upnutí
3. Konfigurace a kalibrace snímacího systému
4. Vyrovnání součásti
5. Extrakce bodů a definování geometrických prvků
6. Výpočet charakteristik – rozměrové a tvarové specifikace (metoda výpočtu, filtrace, ...)
7. Vyhodnocení charakteristik a tvorba protokolů [12]

3 3D optické měření a skenování

Strukturované světlo je dnes jedním z nejčastějších způsobů, jak bezkontaktně zjistit rychle a efektivně požadované informace o povrchu tělesa. Měřicí proces je realizován profilometrickým systémem, který obsahuje jednotku pro zpracování a analýzu (PC), projekční jednotku (projektor) a vizuální jednotku (CCD kamera). Proces digitalizace začíná projekcí nadefinovaného vzoru na objekt (fringe projection). Vzniklé deformace vzoru vlivem geometrie objektu jsou zaznamenány jednou nebo více kamerami. Modulovaný vzor počítač porovná se vzorem promítaným a použitím vhodného algoritmu vytvoří body orientované v prostoru. Výstupními daty pro následné měření a porovnávání s konstruktérem vytvořeným CAD modelem v SW je mračno bodů a následně polygonová síť.

Strmá křivka trendu prodeje naznačuje, že do budoucna bude zájem rapidně stoupat. Vývoj pohání dopředu také požadavky současných uživatelů, kterými jsou nejen celosvětově známé firmy jako Volkswagen, BMW, General Motors, Škoda Auto, Daimler, Tesla, Rolls-Royce, Bosch, Honeywell, Canon, HP, Lego, Samsung, Alstom, ale i desítky dalších firem. [13]



Obr. 8 Aplikace fringe projection na tažnici a tažník [13]

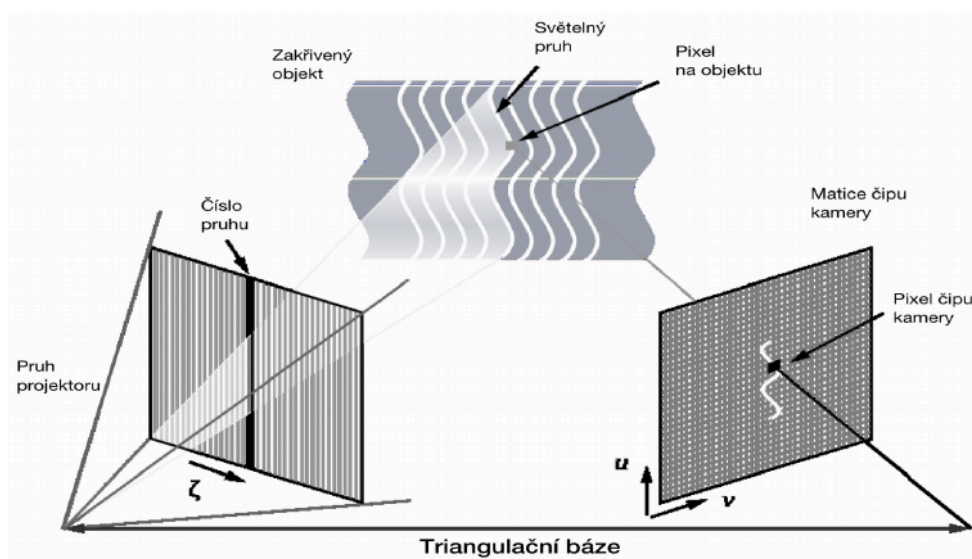
3.1 CCD čip

Charge Coupled Device je základním prvkem fotogrammetrických a skenovacích systémů, jedná se o obrazový snímač. Je to senzor, skládající se z mnoha těsně sesazených mikroskopických polovodičových fotodiod, které nejčastěji obsahují křemík citlivý na světlo [14]. Rozlišení je pak dáno celkovým počtem těchto buněk. Její schopnost převádět dopadající světlo na velikost náboje umožnila vznik snímače obrazu. Vývoj CCD čipu, společně se zdokonalováním počítačů, elektrooptických komponent, laseru a dalších

optických zdrojů umožnil úspěšné zavedení optických metod měření a vyhodnocování v mnoha vědních oborech. [15]

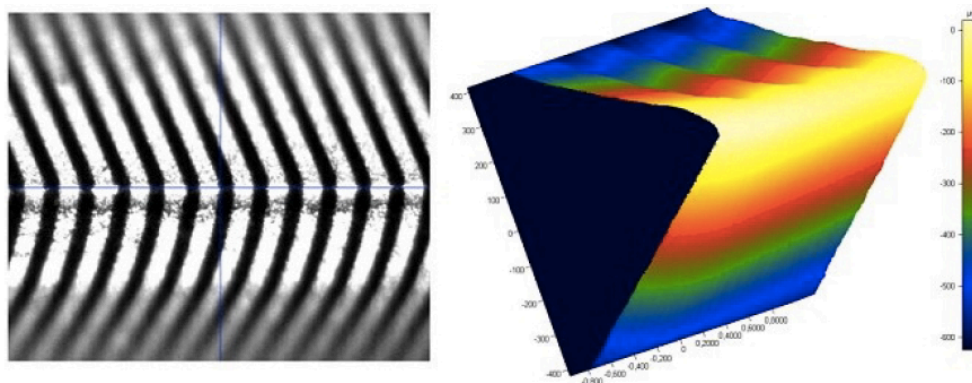
3.2 Fringe projection

Pro optické měření 3D rozměrů je projekce strukturovaného světla klíčovou procesem. Promítání úzkých pásů světla na trojrozměrně tvarovaný povrch vytváří linie osvětlení, které jsou zkreslené pod úhlem mezi projektorem a kamerou. Na základě toho vzniká přesná geometrická rekonstrukce tvaru povrchu měřeného, skenovaného předmětu.



Obr. 9 Princip triangulace systému se strukturovaným světlem [16]

Modulovaný vzor je porovnáván v počítači se vzorem promítaným, jinými slovy se porovnává odpovídající pixel projektoru a snímací CCD kamery. Výsledkem tohoto algoritmu získáváme mračno bodů. [16]



Obr. 10 Převedení ze zakřivení pruhů strukturovaného světla na 3D model [16]

3.3 STL soubor

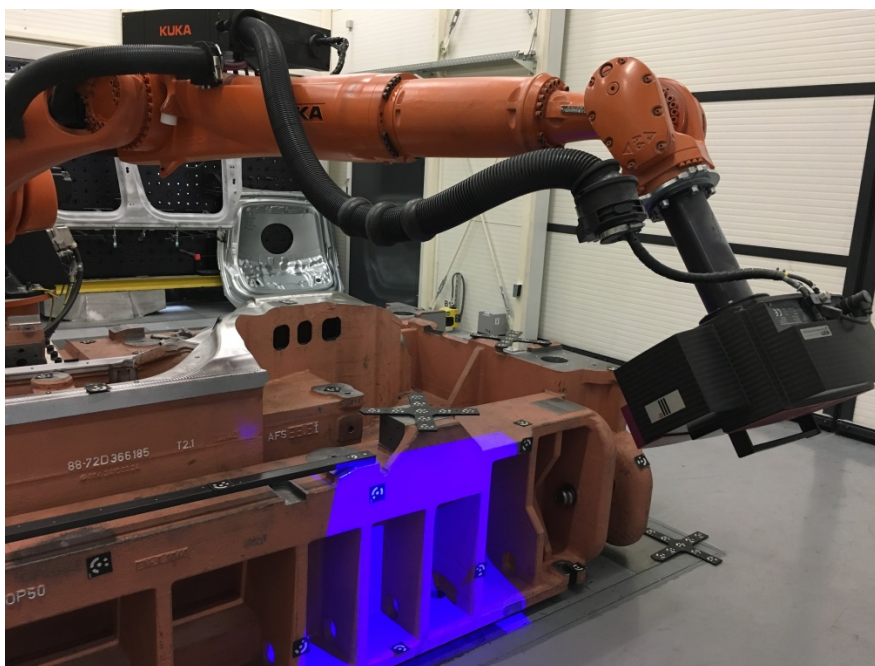
Jednotlivé body mračna bodů jsou spojovány do trojúhelníků. Tento proces je založen na principu tzv. Delaunayovy triangulace [2]. Následně vzniká polygonální síť, která se ukládá ve formátu *.stl. Čím vyšší rozlišení CCD snímač má, tím vyšší bude velikost souboru, jelikož bude nasnímáno více bodů, trojúhelníky budou tedy menší a následkem toho vznikne hladší povrch modelu. Za to ale bude delší čas jeho výpočtu.

3.4 Fotogrammetrie

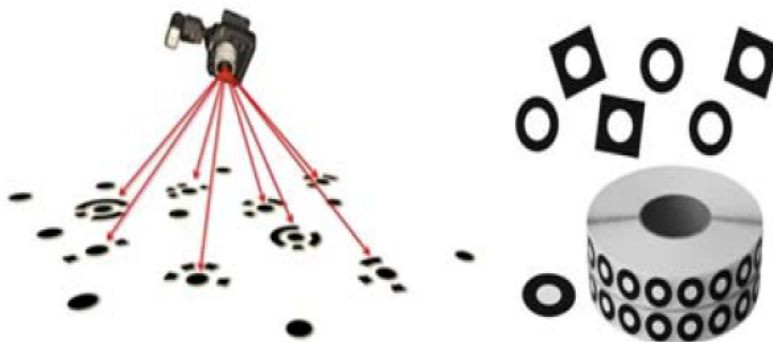
Pro průmyslové měření se zpravidla využívá digitální blízká fotogrammetrie. Za blízkou fotogrammetrii je považováno měření objektů do vzdálenosti cca 300 m.

Fotogrammetrie je metoda optického měření, určování 3D polohy diskrétních bodů a rekonstrukci tvarů objektu, která je založena na zpracování a vyhodnocování informací z fotografických snímků. Zařízení se stává z digitálního fotoaparátu, notebooku, kalibrační tyče a samolepících kódovaných referenčních značek. [18]

Nejběžnější aplikací aktivní průmyslové fotogrammetrie je měření ploch, tedy měření tvaru objektů ve 3D. V současné době umožňují 3D skenery získat kompletní informace o povrchu trojrozměrného povrchu ve formě mračna bodů s přesností na desetiny až setiny milimetrů. Rozsah měřených objektů je od několika centimetrů až metrů dle typu zařízení. [15]



Obr. 11 Měření pomocí fotogrammetrie



Obr. 12 Referenční značky [19]

Vlevo: fotogrammetrické měření pomocí tzv. kódovaných značek. Vpravo: Nekódované referenční značky pro optické skenování.

Největšími prodejci průmyslových fotogrammetrických systémů jsou firmy GOM, Renishaw, Metronor, AICON nebo Nikon Metrology.

3.5 Triangulace

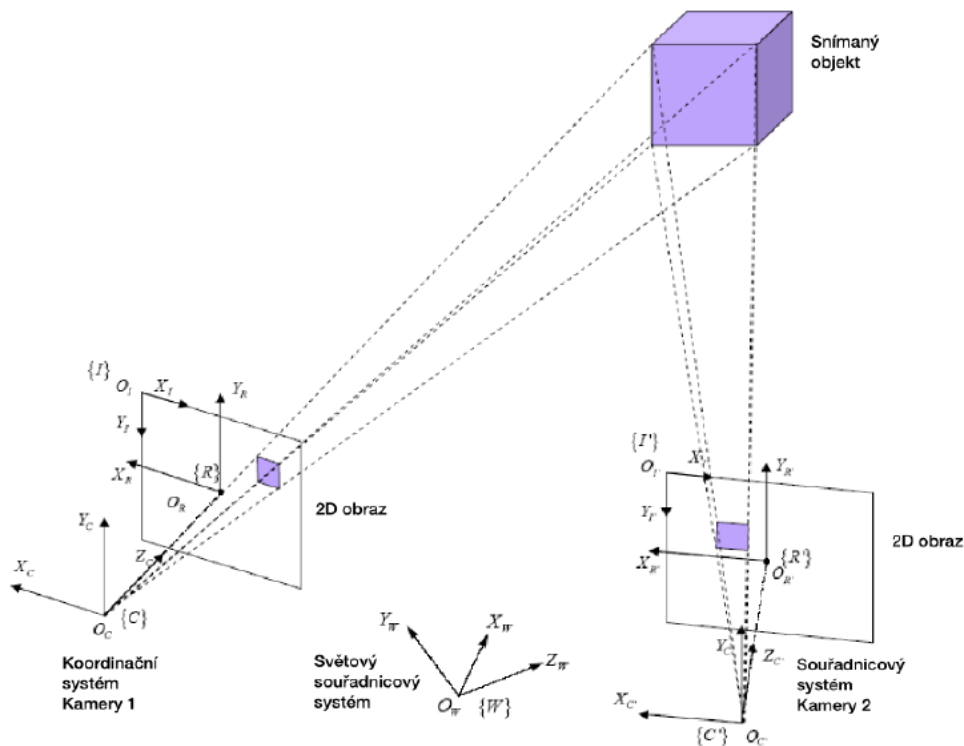
V dnešní době nejvíce využívající triangulaci jsou techniky laserové a optické. Výpočet vzdálenosti metodou triangulace vyžaduje znalost tří bodů v prostoru, které tvoří pomyslný trojúhelník. Triangulace se dělí na aktivní a pasivní.

3.5.1 Aktivní triangulace

Jeden z bodů trojúhelníku je vždy měřeným bodem, jehož vzdálenost od obrazové roviny snímače hledáme. Další dva body mohou být tvořeny buď průmětem tohoto bodu do dvou obrazových rovin, nebo průmětem bodu do jedné obrazové roviny a zdrojem světla (projektorem). Pokud je uvažován světelný zdroj, metoda je označována jako aktivní triangulace [15].

3.5.2 Pasivní triangulace

Tato metoda postrádá vlastní zdroj záření. Třetí rozměr, tedy vzdálenost objektu od středu obou snímačů se získá pomocí dvojice CCD snímačů. Ty mají od sebe konstantní, předem známou vzdálenost. Díky ní se získají dva stereoskopické snímky představující perspektivní obrazy. Pomocí úhlu, který svírají sdružené paprsky (tzv. úhlová paralaxa), se jednoduchým přepočtem určí třetí potřebná souřadnice bodu. [20]



Obr. 13 Stereovizní systém, příklad pasivní triangulace [21]

3.6 3D bezkontaktní skenery

Obecně 3D skenování zahrnuje několik základních typů zařízení, pracujících na různých principech a lišících se i využitím, které je dáno přesností, rychlostí a dosahem. Technologie přímého určování 3D souřadnic upoutala pozornost zejména pro svou rychlost snímání a ohromné množství přímo měřených prostorových bodů. S dosahem je spjata základní dělení podle technologického principu:

- laserové skenery pracující na základě měření doby letu vyslaného paprsku
- triangulační 3D skenery pracující na základě měření ze známé základny [14]

3.6.1 Laserové skenery

Základem přístroje je jednotka, která umožňuje změřit velmi rychle vzdálenost k objektu, na základě laserového zařízení. Zařízení je doplněno o skenující jednotku, obvykle rotující zrcátko či hranol, který odklání měřicí paprsek vždy o určitý úhel ve vertikálním směru a dále o motorickou jednotku, která zařízením otáčí ve zvoleném kroku horizontálně. Obecně jsou tedy podrobné body zaměřeny polární metodou. [14]

3.6.2 Triangulační skenery

Pro získání 3D tvaru předmětů slouží zařízení, které využívá kombinaci několika CCD kamer, laserového ukazovátka nebo dalších pomocných zařízení. V zásadě lze tato zařízení rozdělit do dvou skupin:

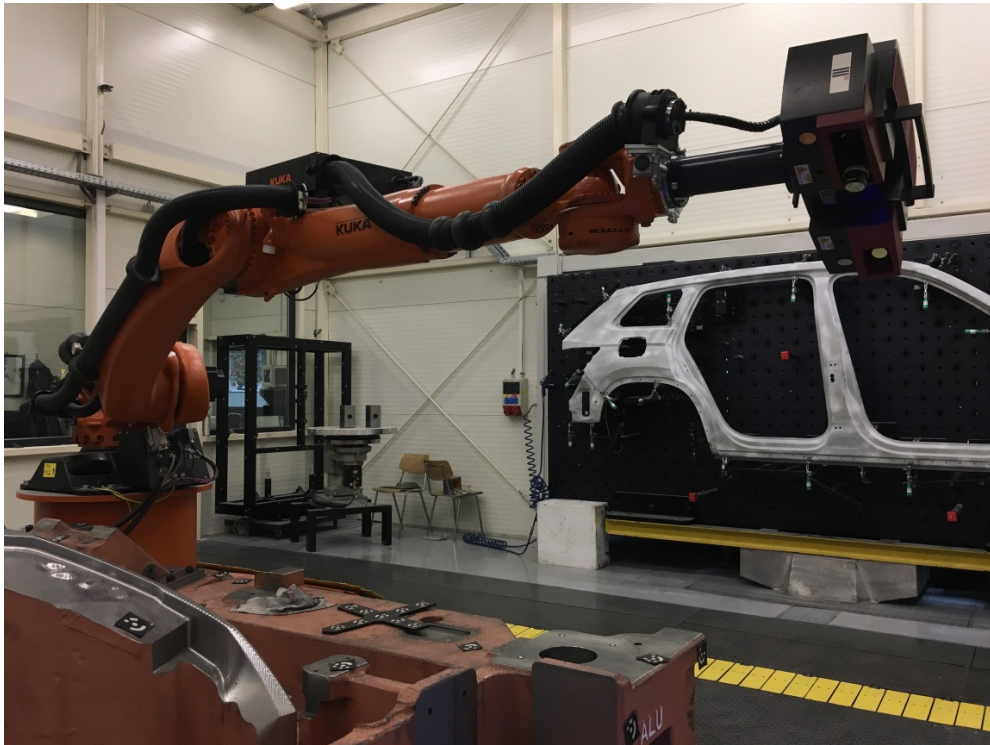
- pro získání 3D tvaru se otáčí předmětem a ten je snímán kombinací výše uvedených zařízení
- předmět je nehybný a otáčí se zařízení nebo se přemisťuje na další stanovisko [14]

Součástí zařízení prvního druhu je motorizovaná točna, jejíž pohyb je řízen a odečítán inkrementálním čidlem, kdy se na točnu umístí měřený předmět. Princip zařízení druhého typu je snímání stop (světelných proužků) laserového nebo jiného světelného zářiče dvěma konvergentními CCD kamerami z pevné základny, které se pohybuje nebo ručně umísťuje okolo objektu. Stopy zářiče jsou automaticky počítačem vyhodnocovány a na principu triangulace pak lze vypočítat 3D souřadnice vhodných bodů.

Zástupcem tohoto zařízení je 3D skener ATOS společnosti GOM, v České republice a i v jiných zemích zastoupené Kuřimskou firmou MCAE Systems. [14]

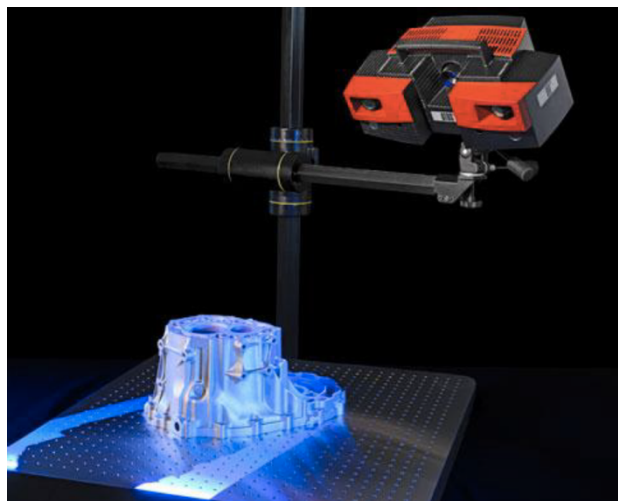
3.7 3D skener ATOS

Atos (Advanced Topometric Sensor) je mobilní bezdotykový optický 3D skener firmy GOM určený pro nejrůznější aplikace. Jeho vysoká výkonnost, velké rozlišení a široká flexibilita měřících rozměrů umožňující přesnou a efektivní kontrolu kvality výroby (Quality Control), ukládání optimalizovaných dat z designových aplikací, skenování například poškozených tvarových vložek a celých sestav lisovacích nástrojů a vstřikovacích forem. Nejširší využití má systém ATOS v oblastech CAD, CAM a FEM, kde je vyžadováno měření reálných objektů a jejich následní srovnání s teoretickým modelem. Proces měření je založen na principech optické triangulace, fotogrammetrii a metodě fringe projection. Firma GOM nabízí také SW GOM Inspect, pomocí kterého se může naskenovaná polygonální síť nahrát a následně s ní lze provádět různé úpravy, jako například rekonstrukce této sítě měřeného povrchu a poté ji nebo její část importovat do simulačního programu AutoForm. Všechny systémy ATOS je možné rozšířit o počítačem řízený stůl nebo o robotické rameno, které se využije v případě plné automatizace měření, jako je tomu například ve Škoda Auto.



Obr. 14 Měření ve Škoda Auto

Systém ATOS III Triple Scan disponuje dvěma vysokorychlostními kamerami, každá z nich má rozlišení CCD čipu 8 000 000 bodů. Technologie Triple Scan znamená kombinaci tří 3 perspektiv pohledu v jednom záběru skeneru, což výrazně snižuje počet potřebných snímků a tím urychluje proces měření celého dílu. Tímto zařízením lze měřit plochy 39 x 29 až 2 000 x 1 500 mm s hustotou bodů 0,01 - 0,16 mm. Měřitelné objemy jsou tedy v řádech od milimetrů až po metry. Zařízení disponuje technologií modrého světla a laserovým odměřováním vzdálenosti. [22]



Obr. 15 ATOS III Triple Scan [22]

Nejpokročilejším systémem společnosti GOM je ATOS 16M. Rozlišení jeho CCD čipů je 2 x 16 000 000 bodů a maximální měřitelný objem je 2 000 x 2 000 mm.

Při měření velkých dílů je vhodné použít fotogrammetrii. Docílí se tím zvýšení přesnosti měření. O fotogrammetrii lze jednoduše rozšířit každé měření skenerem ATOS. Na 3D skener se jednoduše připevní další zařízení, modul ATOS Plus. Podle aplikace se vybírá optimální varianta 12M nebo 29M, přičemž číslo udává rozlišení CCD kamery. [13]

V nabídce firmy GOM jinak najdeme také samostatný systém určený přímo pro fotogrammetrii. Jedná se o systém TROTOP. Jeho součásti a metody měření odpovídají popisu v kapitole 3.4.



Obr.16 Použití fotogrammetrie pomocí modulu ATOS Plus [13]

V případě nabídky optických systémů měření 3D deformace je jednou z výhod komplexní měření deformace na celém povrchu měřeného dílu. Výsledkem je barevná mapa deformací měřené oblasti. Toto je vhodná metoda pro posouzení různých tvarových koncentrací a rovněž vhodná metoda pro studium nových materiálů jako jsou např. kompozity. Výstup z měření se velmi podobá výstupům z výpočtových analýz MKP. Často se proto tato metoda používá k verifikaci výpočtových analýz. Do softwaru je proto možné načítat výstupy z výpočtových analýz a graficky je vyhodnotit vůči hodnotám z měření.

Zde nachází uplatnění systém Aramis, a to v několika konfiguracích dle rychlosti a rozlišení kamer, a systém Argus, který se specializuje na vyhodnocení deformace při lisování plechu. Pokud se posuzuje deformace při rázovém nebo dynamickém namáhání v diskrétních bodech, nabízí se využití systému Pontos, který dokáže vyhodnotit polohu optických referencí na objektu v časové závislosti. Příprava měření je ve srovnání s klasickým měřením se

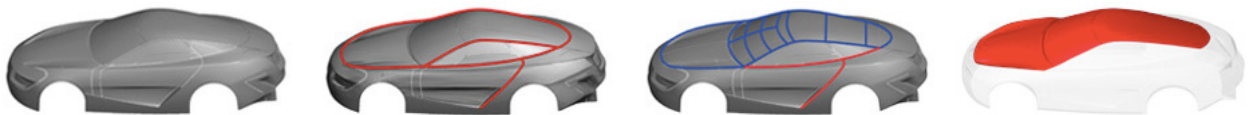
snímači velmi snadná a krátká. Navíc každý referenční bod se chová jako snímač polohy, takže měření není nijak finančně náročné a počet referenčních značek v měřeném rozsahu není omezen. [23]

3.8 Další využití optického měření a skenování

3.8.1 Reverzní inženýrství

Reverzní inženýrství (též zpětné inženýrství nebo zpětná vazba, RE) je označení pro proces, jehož cílem je odkrýt princip zkoumaného předmětu, většinou za účelem sestrojení stejně či podobně fungujícího předmětu. ATOS Core měří milióny bodů s nejjemnějšími detaily. Aby bylo možné zjistit, jestli CAD povrchy odpovídají skenovaným datům, lze tato nově vytvořená povrchová data importovat do softwaru ATOS. Poté lze odchylky obou datových typů vypočítat a zobrazit je na výkresech pomocí barevné mapy.

Reverzní inženýrství se využívá zejména ve vývoji a konstrukci produktů a k digitalizaci manuálně vytvořených modelů, jako jsou například prototypy automobilů. Slouží také k přenášení manuálně vytvořených změn do CAD modelů. Zejména při vývoji produktů pak měřená data zdokonalují simulační výpočty, jelikož zajišťují, že tvar skutečného modelu odpovídá tvaru počítačového modelu, který je použit při simulaci. [24]



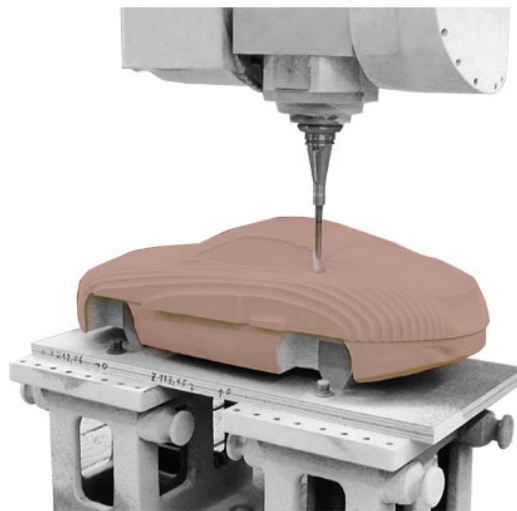
Obr. 17 Postup aplikování RE [24]

Reverzní inženýrství se využívá i v další důležité oblasti, a to při konstrukci strojů. Zde lze CAD data nejenom vytvářet, například pro starší nástroje nebo duplikáty, ale také přenášet manuální změny, provedené na nástrojích během testování nebo oprav, zpět do CAD modelu. [24]

3.8.2 Rychlá výroba

Procesy jako 3D tisk a další aditivní výrobní procesy (SLM, SLS, FDM, DMLS apod.) umožňují konstruovat a realizovat geometrie součástí pomocí prostředků, které v minulosti s

využitím běžných výrobních metod nebyly k dispozici. Největší pozornost je věnována organickým konstrukcím s nepravidelnými povrchy. ATOS Core nabízí rychlé získání 3D dat z jakéhokoliv předmětu pro 3D tisk. Takto vytvořená 3D data ve formátu STL lze bez dalšího zpracování poslat do 3D tiskárny a reprodukovat. Metody jako 3D tisk a další aditivní výrobní procesy umožňují konstruovat a vyrábět tvary součástek, které v minulosti s využitím běžných výrobních postupů nebyly možné. Tyto tvary zpravidla sestávají z organických konstrukcí a volných ploch. ATOS Core umožňuje rychle naskenovat kompletní povrch libovolné součástky. Výsledná 3D data (STL) lze bez dalšího zpracování bezprostředně zkopírovat a duplikovat pomocí 3D tiskárny. Pomocí této technologie jsou předměty vyráběné na míru zhotovovány stejným způsobem jako hromadně vyráběné předměty, například ve stomatologii nebo v oblasti sluchových pomůcek. Jestliže geometrie součástky obsahuje komplexní volné plochy, její tvar a přesnost lze verifikovat pouze s optickým měřicím systémem jako je ATOS Core. Zejména u prototypů a výroby v malých sériích hraje kontrola geometrie a funkce zásadní roli. V této oblasti se ATOS Core používá při kontrole forem a vložek do forem, které byly vyrobeny aditivními výrobními procesy. [24]



Obr. 18 Rychlá výroba [24]

4 Aplikace inovativního měření ve Škoda Auto

Inovace měření spočívá v možnosti změřit celý odlitek přípravku na lemování během pár desítek minut a poté ihned pomocí STL dat v SW CAD/CAM Tebis vytvořit program na odebrání přídavků materiálu a dosažení kvality daných povrchů prostřednictvím frézování. Díky přesnému zmapování tvaru polotovaru se šetří čas při hrubování. Při velkých rozměrech se jedná o značnou časovou úsporu. Zejména z důvodů další práce s naměřenými daty bylo měření pomocí CMM nahrazeno bezkontaktní měřicí technikou 3D skenerem ATOS III Triple Scan a fotogrammetrií prostřednictvím kombinace tohoto skeneru a modulu ATOS Plus, dodávané firmou MCAE Systems.

Objekt je snímán postupně tak, že se nafotí minimálně tři body z předchozího záznamu, které slouží ke skládání jednotlivých skenů k sobě. Jejich množství je dáno složitostí tvaru snímaného objektu, potřebné množství se však nechá zredukovat při optimálním rozložení referenčních značek.

4.1 Používané softwary

4.1.1 GOM Inspect Profesion

Slouží pro vyhodnocování a zpracování 3D dat a pro rozměrovou analýzu mračna bodů. Může být používán různými typy měřicích systémů, jako jsou laserové skenery, počítačová tomografie (CT), projekční skenery a další.

4.1.2 CATIA V5 R18

Programování CNC ve Škodovce probíhá v Catii. Jedná se o software pro 3D počítačové konstruování a výrobu v oblastech CAD/CAM/CAE technologií. Catia byla vyvinuta francouzskou firmou Dassault Systèmes, zainteresovanou především v leteckém a automobilovém průmyslu. [25]

4.1.3 Tebis

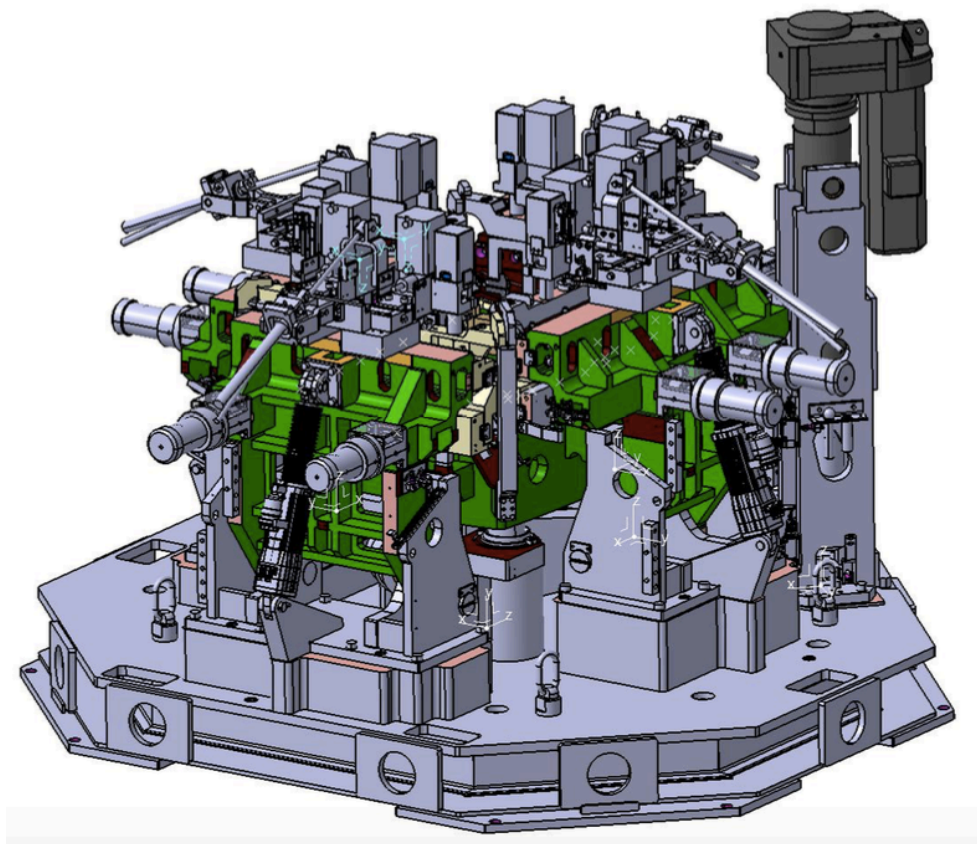
Pomůže naplno využít potenciálních výhod robotů, protože jsou plně integrovány do CAD/CAM prostředí a ve správcí výrobního postupu se dá využít všech jejich možností. Při programování robotů v SW Tebis můžete využít všech informací o obrábění i o reálném

pracovišti – všechny dráhy nástroje jsou vypočteny na základě informací, např. o ustavení, kinematice robota a mezních poloh os. Proto je automaticky ošetřena hrozba singularit.

4.2 Postup konstrukce a výroby zařízení

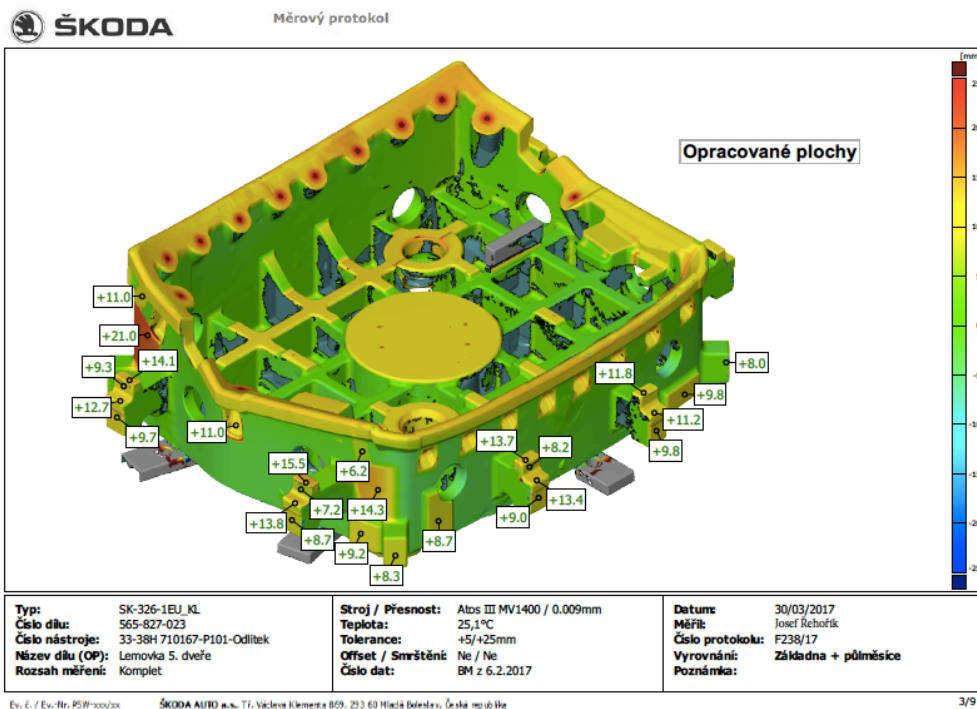
Zde je popsána výroba konkrétního přípravku na lemování plechů 5. dveří vozu Škoda Kodiaq.

1. Konstruktor podle CAD modelu 5. dveří vytvoří CAD model přípravku na lemování



Obr. 19 Přípravek pro lemování plechů 5. dveří karoserie Kodiaqu

2. V modelárně podle CAD dat lemovacího přípravku vytvoří CAD model polystyrénového modelu přípravku na lemování v závislosti na objemových změnách slitiny a požadované kvality jednotlivých povrchů. Na základě těchto dat přichází na řadu výroba polystyrénového modelu, u kterého tedy uvažujeme smršťování odlévané slitiny během chladnutí a přídavky na obrábění.



Obr. 20 Protokol z měření systémem ATOS III

3. Tento polystyrenový model je předán slévárně která vyrobí pískovou formu a odleje přípravek pro lemování plechů metodou vytavitelných modelů.
4. Odlitek je předán měřicímu a kontrolnímu středisku a pomocí fotogrammetrie a skenování je vytvořen STL soubor pomocí triangulační sítě (mračna bodů), přičemž je získán CAD model tohoto odlitku přípravku na lemování.
5. Programátor CAD model zkontroluje pomocí SW od společnosti GOM , GOM Inspect, a místa, kde nebyl odlitek naskenován (vyfotografován) tyto „díry“ dosimuluje tak, aby data byla kompletní a byl tak jednoznačný nárůst množství materiálu, případně jeho nedostatek na celém povrchu odlitku.
6. Programátor pomocí sjednocení osových křížů CAD modelu získaného od konstruktéra (bod 1.) a CAD modelu odlitku získaného prostřednictvím 3D měření, oba modely „prolne“ a na základě této vizualizace jednoznačně zjistí lokalitu a v ní přesné množství přebytečného materiálu. Podle CAD modelu odlitku přípravku na lemování vytvoří program v SW Catia v závislosti na přidavcích materiálu pro

hrubovací obrábění a určí počet vrstev frézovacího cyklu, kdy se daný přebytek materiálu odstraní.

Měření polystyrénového modelu se provádí z důvodu ubezpečení korektnosti výroby odlitků a to prostřednictvím porovnání CAD dat vymodelovaných konstruktérem (bod 1.) a STL sítě získané měřením prototypu.

5 Zhodnocení a porovnání měření CMM a skenováním

Ve Škoda Auto měření prostřednictvím CMM rozhodně není minulostí. Tyto stroje mají své nezastupitelné místo. Tak jako má vše své pro i proti, platí to i zde. Obě měření přispívají k zabezpečení kvality výroby a tím i zvyšování konkurenceschopnosti strojírenských produktů. Tady je krátký výčet měřených předmětů oběma zástupci skenování geometrických charakteristik objektů v této automobilce:

3D sken/fotogrammetrie, bezkontaktní měření se používá u měření:

- u polystyrénového modelů
- u odlitků
- u obrobených odlitků

SMS, kontaktní měření se používá:

- u měření obrobených odlitků
- v případě měření otvorů
- nebo dutin a kapes


5.1 Měření CMM

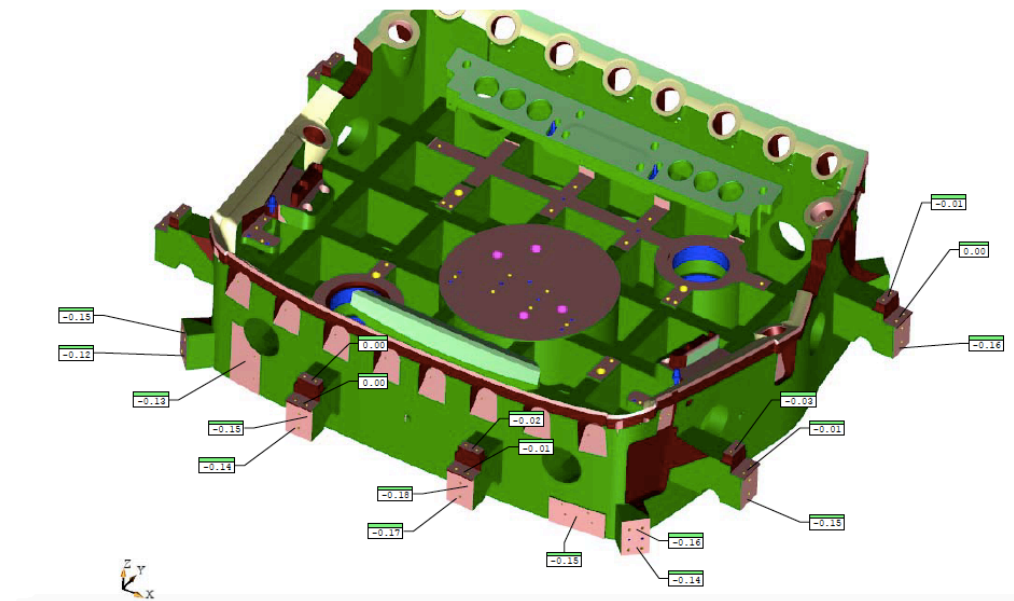
Tuto metodu měření budeme volit v případě, kdy nás budou zajímat diskrétní body zkoumaného tělesa a zároveň je nedostačující měření jen ve dvou bodech, zjišťujeme soustřednost více otvorů, poloha součásti je důležitá vůči ostatním, v případě zjišťování přesné rozteče, pokud se na objektu nacházejí kapsy nebo dutina anebo pokud je povrch příliš lesklý a z důvodu charakteru nemůže být použito zmatňujících sprejů. V takovém případě je výhodné použít měření prostřednictvím souřadnicového měřicího stroje.

Výrazným pozitivem CMM oproti měření technologií fringe projection je jednoznačně nezávislost osvětlení a světelných podmínek prostoru kde měření probíhá.

Naopak minusovými body pro aplikaci měření CMM jsou hned faktory dva. Za prvé prostředí ve kterém měření probíhá musí být čisté a nesmí být prašné. To vyplývá z principu tohoto měření. Přesnost těchto měřidel je v řádu desetin mikronů, tloušťka lidského vlasu je ale přibližně 50 μm . Druhým problémem je teplota tohoto okolí. Materiály konstrukce strojů,

stejně jako každý jiný materiál podléhají fyzikálním zákonům. Důsledkem jednoho z nich je materiálová dilatace.

	Název	LOŽE	Č.výkresu	33-38H-710167	Posice	101	Data	6.2.2017	Datum	27.4.2017		
	Měřil	Josef Řehořík	Teplota	22°C	Smrštění		Offset		Toler.	+0.2		
SMS POLI TCX 3000 MPE _E = 16+(L/200)	Měřeno	OPRACOVANÉ PLOCHY PO OBVODĚ									6PO/0029-17	Tel.14313



Obr. 21 Ukázka měření CMM lemovacího přípravku 5. dveří Kodiaqu

Stroje jsou tedy konstruovány na referenční teplotu 20 ± 1 °C. Proto musí být kontrolní a měřicí střediska vybavena klimatizacemi, což znamená náklady v řádech několika desítek tisíc, někdy až sta tisíce korun navíc.

5.2 Měření optikou

System ATOS díky kombinaci tří úhlů pohledu využíváním stereo kamerového systému, prakticky využívá tři senzory v jednom. Skener umožňuje rychlejší, snadnější a spolehlivější měření a tím je snižena potřebná počet záběrů. To umožňuje jeho vysoká výkonnost, rozlišení CCD čipů (až 66 bodů na 1 mm) a flexibilita měřících objemů. Ta se nabízí pro kontrolu kvality výrobků (Quality Control) díky speciálně vyvinuté optice pro přesné měření. Dalšími výhodami je jeho mobilita, jednoduchost ovládání díky automatickému přepočtu transformací, možnost měření měkkých materiálů. Pozitivem je také možný velký teplotní rozsah měřených objektů, - 40 až + 180 stupňů celsia, aniž by došlo ke zkreslení výsledků. [25]

Pro zpřesnění se na součást lepí speciální referenční štítky a na povrch se v případě výrazné lesklosti nebo transparentnosti povrchu nanáší matnicí prášky. Potom se přesnost měření může pohybovat v rozmezí $\pm 0,05$ mm. [10]

5.3 Řešení problému transparentnosti a lesklosti materiálu

Z důvodu těchto vlastností některých materiálů vznikají chyby jejich měření. Paprsky světla emitované projektorem se na těchto površích mohou odrazit pod úhlem nevhodným pro zachycující zařízení nebo dokonce skrze povrch projít. Základní podmínkou této techniky je, aby objekt měl dostatečnou difúzní odrazivost, jinak dochází k výraznému ovlivnění a zkreslení naměřených dat. Z toho vyplývá, že pozice naměřených bodů se liší od souřadnic skutečných bodů. [10]

Řešením tohoto problému je opatřit měřený povrch nástřikem jemného prášku oxidu titaničitého TiO_2 rozpuštěného v technickém lihu. Vrstva nástřiku je velmi slabá na tolik, že neovlivňuje naměřené rozměry. [22]

5.4 Ekonomické hledisko

Finanční úspory v případě bezkontaktního měření jsou jednoznačné. V případě budování střediska měření s CMM se totiž ne bavíme jen o nákupu samotného souřadnicového měřicího stroje, ale také řadách sond jejichž ceny jsou v řádech desítek tisíc korun. Dále je třeba počítat s klimatizací pro chlazení nebo vytápění místnosti kvůli objemovým změnám částí stroje. Mimo to je časté, když sonda omylem nabourá do měřeného objektu. Následky jsou fatální stejně jako když sonda nebo jen dřík s kuličkou spadnou z výšky a tvrdě dopadnou, zpravidla dochází ke zničení této komponenty a musí se pořídit nová. Zde se bavíme o položce kolem deseti tisíc korun českých.

Dále dosáhneme velkých úspor i díky principu technologie fringe projection. Vzhledem ke znalosti komplexního povrchu odlitků získané z mračna bodů je programátor schopný volit takové řezné podmínky, kdy se v důsledku optimalizovaného programu může životnost jediné frézy prodloužit i na dvojnásobek. V podniku jako je Škoda Auto, kde se obráběcích center nachází několik desítek, bychom fréz dost možná napočítali i tisíc.

Požizovací ceny měřicích strojů mluví jasně. V případě CMM se bavíme o částce kolem 450 000 € (bereme v potaz takový, který by dokázal měřit polotovary o velikostech částí automobilových karoserií, stejně jako ATOS). V případě systému ATOS Triple Scan je

tato cena podstatně nižší, toto zařízení můžeme pořídit za 130 000 € a systém pro měření fotogrammetrií TRITOP za 40 000 €.

5.5 Časové hledisko

Samotné měření snad nemá ani smysl porovnávat. Na jedné straně se bavíme o milionech bodech naměřených během deseti minut, jinými slovy naskenování celého povrchu zkoumaného tělesa, na straně druhé o změřených diskretních bodech, přibližně dvou stovkách, nebo případně pár naskenovaných konkrétních geometrických prvků, za stejný čas.

Závěr

Stejně jako automatizovaná výroba tak i automatizované měření patří budoucnosti. Automatizované měření se díky parametrickým programům a automatickým funkcím vyplatí už od tří dílů. Časové i finanční úspory jsou jednoznačné. Systém optického měření můžeme mít již za přibližně poloviční náklady. Při tom nezískáme jen techniku pro zjišťování geometrických charakteristik, ale také zařízení pro reverzní inženýrství, rapid prototyping, komplexní měření dynamické deformace objektů nebo třeba vývoj a studium vlastností nových materiálů. Po této technologii je velká poptávka a ta se bude postupně zvyšovat, protože vývoj těchto měřicích a digitalizačních prostředků, stejně jako všeho jiného, jde do předu. To znamená zvyšování přesnosti těchto přístrojů a vzhledem k zrychlující se výrobě bude v budoucnu tato technika nepostradatelným prostředkem nejen pro zajišťování kvality a výroby. Tento směr vývoje je do jisté míry předurčen samotným termínem Průmysl 4.0 a jeho významem.

Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] ZEMAN, J. *3D skenování lesklých povrchů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 58 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Koutecký, PhD.
- [2] ŠTRONER, Martin. *3D skenovací systémy*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013. ISBN 978-80-01-05371-3.
- [3] DRÁPELA, Miroslav. *Rapid prototyping (RP) & Revers Engineering (RE)* [online]. [cit. 2017-07-02]. Dostupné z: <<http://www.uk.fime.vutbr.cz/kestazeni/ZRI/RE.pdf>>
- [4] MADA, S.K., M.L. SMITH, L.N. SMITH a P.S. MIDHA. *Overview of passive and active vision techniques for hand-held 3D data acquisition. Opto-Ireland 2002: Optical Metrology, Imaging, and Machine Vision* [online]. 2002, roč. 4877, s. 16-28 [cit. 2017-06-27]. DOI: 10.1117/12.463773. Dostupné z: <http://mesh.brown.edu/3DPGP-2007/pdfs/Kumar2003.pdf>
- [6] LUHMANN, Thomas, et al. *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*. Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK: Whittles Publishing, 2011. Fundamental methods, s. 1-25. ISBN 978-184995-057-2.
- [5] *Portálový CCM Zeiss Accura* [online]. In: . [cit. 2017-07-04]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/bridge-type-cmms/accura.html>
- [7] DOKOUPIL, F. *Stanovení odchylek měření 3D optického skeneru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 71 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Paloušek, Ph.D.
- [8] CHENG, I. Et al. *3D Online Multimedia and Games Processing, Visualization and Transmission* [online]. Singapore: World Scientific, 2008, s. 231-276 [cit. 2017-06-24]. ISBN 978-981-281-125-7. Dostupné z: http://www.inf.ethz.ch/personal/lballan/pdfs/Book_Ch12.pdf

- [9] *3D Imaging with NI LabVIEW. National Instruments* [online]. 2012 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/14103/en>
- [10] ČERMÁK, J. *Metody 3D skenování objektů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 44 s. Vedoucí bakalářská práce Ing. Tomáš Marada, Ph.D.
- [11] *Inspekční kuličková dotyková sonda* [online]. [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/media/img/gen/d4d341fa3018444c8d4a3c02846b7972.jpg>
- [12] BERÁNEK, Libor. *Úvod do metrologie* [slajdy k přednášce]. Prezentováno (zimní semestr akademického roku 2016/2017) v rámci předmětu Strojírenská metrologie.
- [13] NAVRÁTIL, Robert. *ATOS ScanBox - automatizované měření od firmy GOM* [online]. 2016 [cit. 2017-07-02]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/7714-atos-scanbox-automatizovane-mereni-od-firmy-gom.html>
- [14] PAVELKA, Karel a Jindřich HODAČ. *Fotogrammetrie 3: digitální metody a laserové skenování*. Praha: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-03978-6.
- [15] ZATOČILOVÁ, A. *Měření a vyhodnocování přímosti osy rotačních výkovek pomocí fotogrammetrie a analýzy obrazu*. Brno: Vysoké Učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 128 s. Vedoucí disertační práce Doc. Ing. Jan Brandejs CSc.
- [16] SAMADI, Ali. *Structured-light 3D scanner* [online]. 2013 [cit. 2017-06-28]. Dostupné z: https://www.academia.edu/1107159/Structuredlight_3D_scanner_-_Samadi
- [17] DOLÁK, D. *Rešerše souřadnicových měřících strojů CMM a měřících ramen CMMs*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 28 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Opl.

[18] MCAE Systems. TRITOP Configuration - MCAE Systems [online]. 2007 [cit.2017-03-06]. <<http://www.mcae.cz/katalog.php?lang=cs&id=167>>

[19] GOM. GOM: Optical Measurement Techniques [online]. 2011 [cit. 2017-06-28].
Dostupné z: < <http://www.gom.com/>>

[20] TIŠNOVSKÝ, Pavel. *Bezkontaktní digitalizace předmětů pomocí 3D scanneru Minolta Vivid VI-700*. Elektrotechnika, 2003, roč. 2003, č. 13, s. 1-25, ISSN 1213-1539.

[21] Stereovision system. Photobucket.com [online]. 2015 [cit. 2017-06-24]. Dostupné z:
<http://s780.photobucket.com/user/powerlee918/media/cvchina/cameras.png.html>

[22] Skenování činných ploch tažného nástroje. *Mmspektrum.com* [online]. 2013 [cit. 2017-06-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/skenovani-cinnych-ploch-tazneho-nastroje.html>

[23] Unikátní kombinace technologií pro podporu výroby od MCAE Systems. *Prumysl.cz* [online]. 2012 [cit. 2017-07-06]. Dostupné z:
<https://www.prumysl.cz/unikatni-kombinace-technologii-pro-podporu-vyroby-od-mcae-systems/>

[24] Co zákazníci dělají. *Atos-core.com* [online]. 2017 [cit. 2017-07-10]. Dostupné z:
<http://www.atos-core.com/cz/applications.php#3dInspection>

[25] HAVEL, Zbyněk. *Využití reverzního inženýrství ve strojírenské technologii*. Zlín, 2014. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati. Vedoucí práce Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.

Seznam obrázků

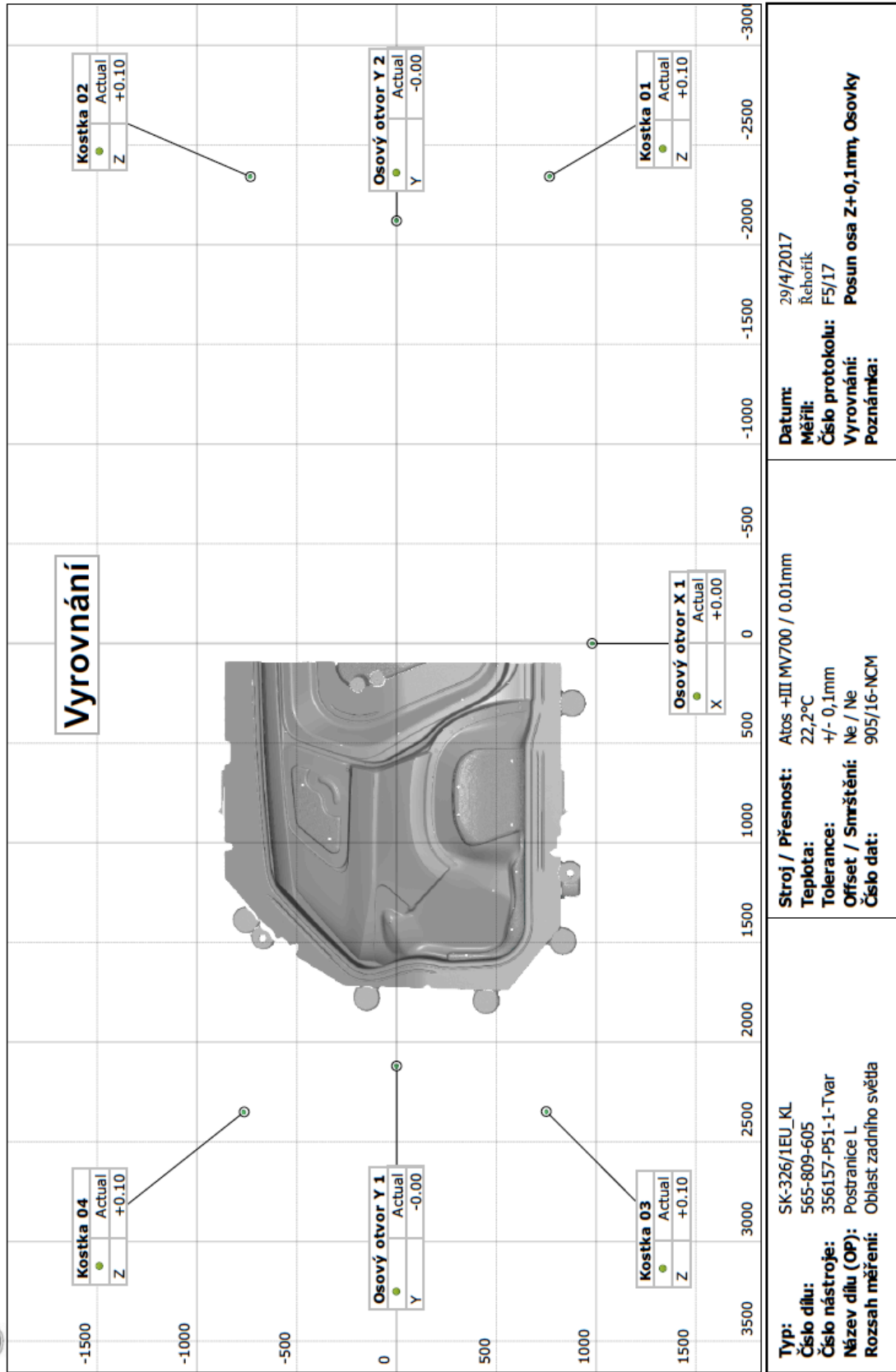
<i>Obr. 1 Rozdělení metod 3D skenování [1]</i>	10
<i>Obr. 2 Mechanické skenery [3]</i>	11
<i>Obr. 3 Rozdělení bezkontaktních optických metod měření dle vyhodnocované délky [6]</i>	12
<i>Obr. 4 Typický stereovizní systém [9]</i>	12
<i>Obr. 5 Portálový CCM Zeiss Accura [5]</i>	14
<i>Obr. 6 Některé typy CMM [12]</i>	15
<i>Obr. 7 Kuličková dotyková sonda [11]</i>	16
<i>Obr. 8 Aplikace fringe projection na tažnici a tažník [13]</i>	18
<i>Obr. 9 Princip triangulace systému se strukturovaným světlem [16]</i>	19
<i>Obr. 10 Převedení ze zakřivení pruhů strukturovaného světla na 3D model [16]</i>	19
<i>Obr. 11 Měření pomocí fotogrammetrie</i>	20
<i>Obr. 12 Referenční značky [19]</i>	21
<i>Obr. 13 Stereovizní systém, příklad pasivní triangulace [21]</i>	22
<i>Obr. 14 Měření ve Škoda Auto</i>	24
<i>Obr. 15 ATOS III Triple Scan [22]</i>	24
<i>Obr.16 Použití fotogrammetrie pomocí modulu ATOS Plus [13]</i>	25
<i>Obr. 17 Postup aplikování RE [24]</i>	26
<i>Obr. 18 Rychlá výroba [24]</i>	27
<i>Obr. 19 Přípravek pro lemování plechů 5. dveří karoserie Kodiaqu</i>	29
<i>Obr. 20 Protokol z měření systémem ATOS III</i>	30
<i>Obr. 21 Ukázka měření CMM lemovacího přípravku 5. dveří Kodiaqu</i>	33

Seznam příloh

Přílohy A (7): Protokoly z měření raznice postranice vozu Škoda Kodiaq pomocí CMM

Přílohy B (3): Protokoly z měření raznice postranice vozu Škoda Kodiaq pomocí systému
ATOS III Triple Scan

Měrový protokol



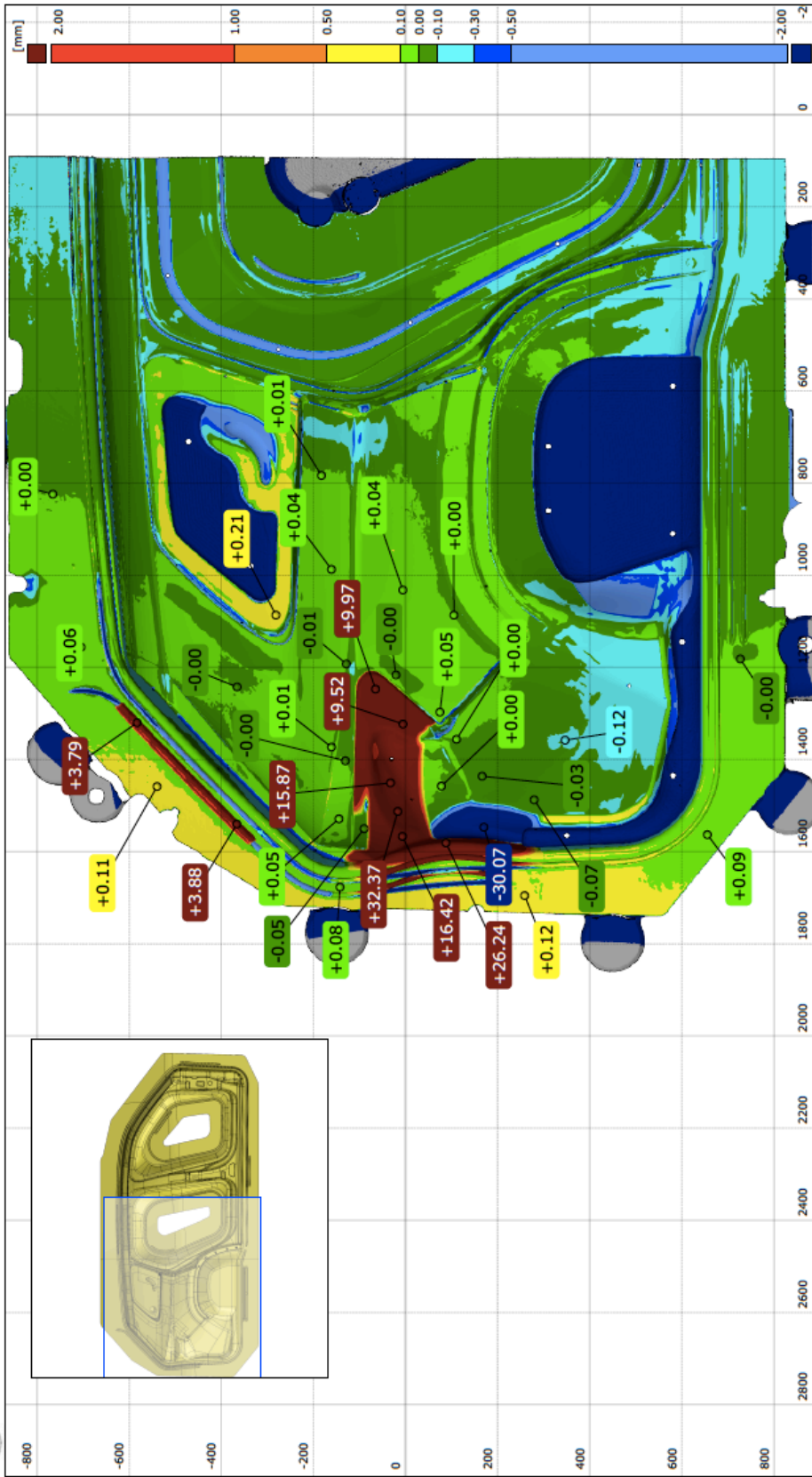
Typ: SK-326/1EU_KL
Číslo dílu: 565-809-605
Číslo nástroje: 356157-P51-1-Tvar
Název dílu (OP): Postranice L
Rozsah měření: Oblast zadního světa

Stroj / Přesnost: Atos +III MV700 / 0.01mm
Teplota: 22,2°C
Tolerance: +/- 0,1mm
Offset / Smrštění: Ne / Ne
Číslo dat: 905/16-NCM

Datum: 29/4/2017
Měřil: Řehořík
Číslo protokolu: F5/17
Vyrovnání: Posun osa Z+0,1mm, Osovky
Poznámka:



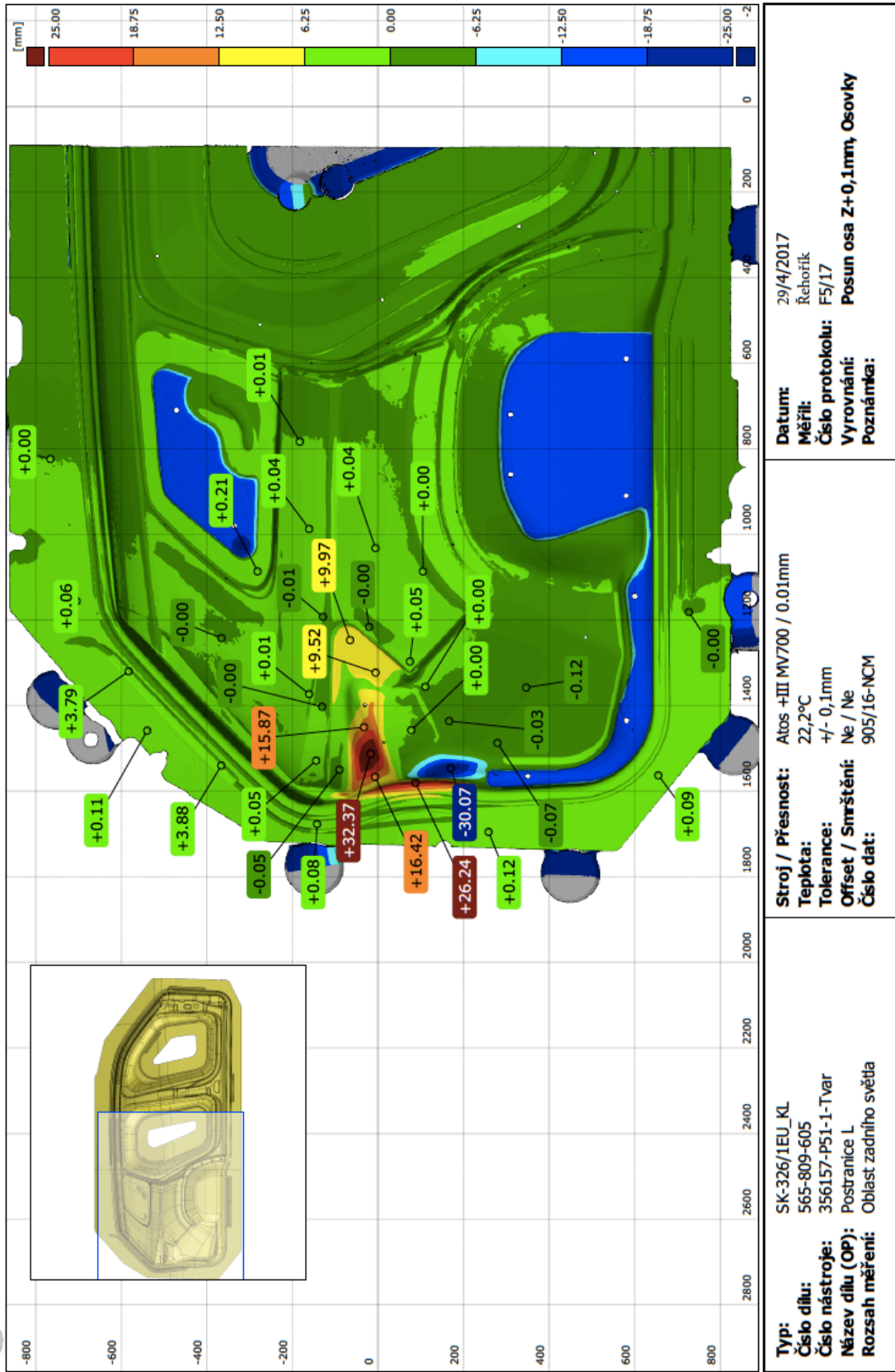
Měrový protokol



Typ: SK-326/1EU_KL	Stroj / Přesnost: Atos +III MV700 / 0.01mm	Datum: 29/4/2017
Číslo dílu: 565-809-605	Teplota: 22,2°C	Měřil: Řehořík
Číslo nástroje: 356157-P51-1-Tvar	Tolerance: +/- 0,1mm	Číslo protokolu: F5/17
Název dílu (OP): Postranice L	Offset / Smrštění: Ne / Ne	Vyrovnání: Posun osa Z+0,1mm, Osovky
Rozsah měření: Oblast zadního světa	Číslo dat: 905/16-NCM	Poznámka:



Měrový protokol





ŠKODA



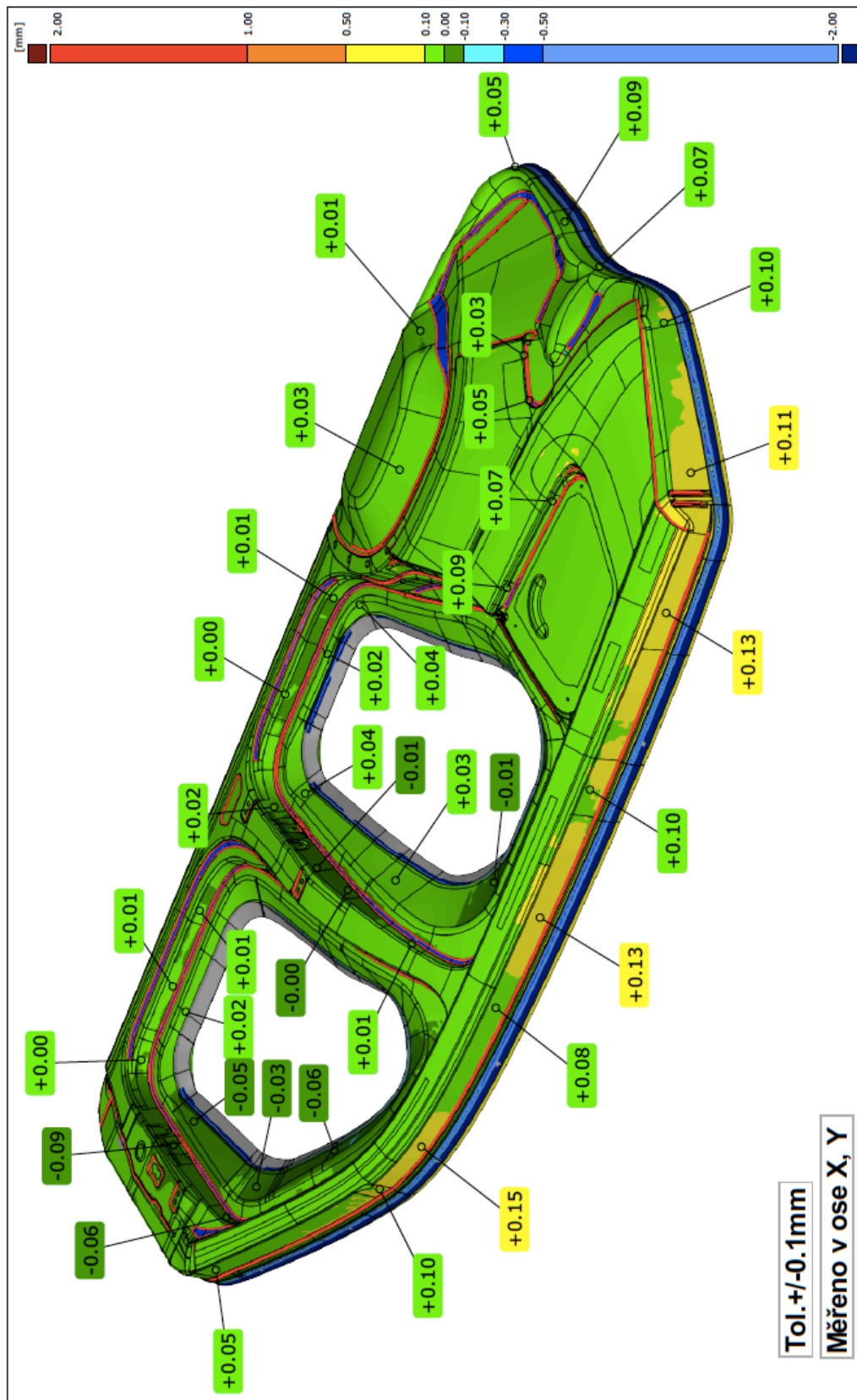
Datum: 26.4.2017	Název dílu: Postranice L SK326/1EU_KL	Smrštění: Offset -0.7mm
Měří: Řehořík	Číslo dílu: 565-809-605	Přesnost: 0.008mm
Vyhodnotil: Sotona	Číslo nástroje: 356157-P1-1-Tvar	System: ATOS III+ Triple Scan MV700
Číslo protokolu: F449/15	Vyrovnání: Osa Z posun -0,07mm	CAD data: 680/15 - NCM



ŠKODA



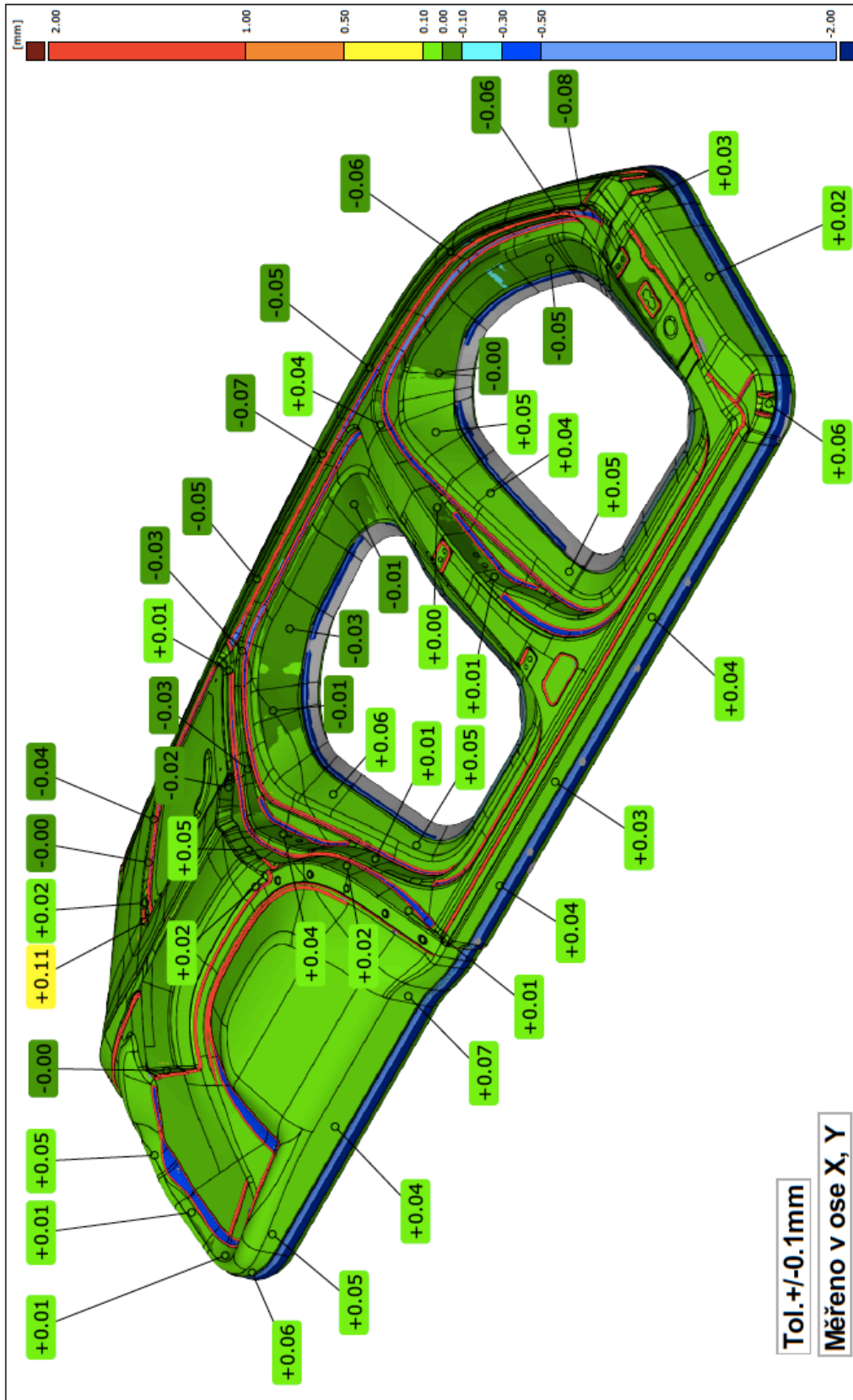
<p>Datum: 26.4.2017 Měřil: Řehořík Vyhodnotil: Sotona Číslo protokolu: F452/15</p>	<p>Název dílu: Postranice P SK328/1EU_KL Číslo dílu: 565-809-606 Číslo nástroje: 356164-P1-1-Tvar Vyrovnání: Základna, osové otvory</p>	<p>Smrštění: Offset -0.7mm Přesnost: 0.011mm System: ATOS III+ Triple Scan MV700 CAD data: 680/15 - NCM</p>
---	--	--



ŠKODA



<p>Datum: 26.4.2017 Měřil: Řehořík Vyhodnotil: Sotona Číslo protokolu: F452/15</p>	<p>Název dílu: Postranice P SK326/1EU_KL Číslo dílu: 565-809-606 Číslo nástroje: 356164-P1-1-Tvar Vyrovnání: Základna, osové otvory</p>	<p>Smrštění: Offset -0.7mm Přesnost: 0.011mm System: ATOS III+ Triple Scan MV700 CAD data: 680/15 - NCM</p>
---	--	--



Tol. +/-0.1mm
Měřeno v ose X, Y



<p>Datum: 26.4.2017 Měři: Rehořík Vyhodnotil: Sotona Číslo protokolu: F452/15</p>	<p>Název dílu: Postranice P SK326/1EU_KL Číslo dílu: 565-809-606 Číslo nástroje: 356164-P1-1-Tvar Vyrovnání: Základna, osové otvory</p>	<p>Smrštění: Offset -0.7mm Přesnost: 0.011mm System: ATOS III+ Triple Scan MV700 CAD data: 680/15 - NCM</p>
--	--	--

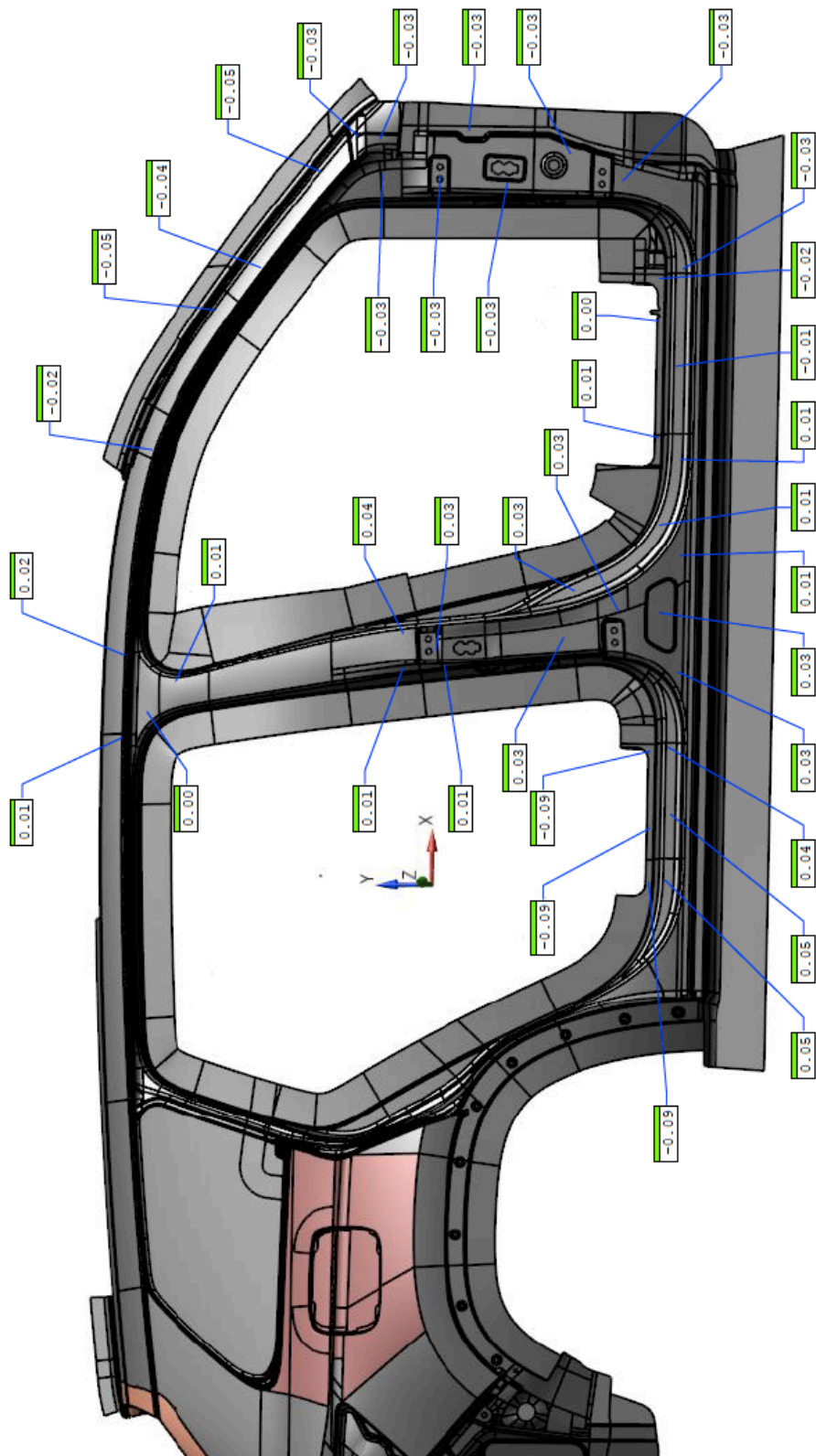
Příloha B1

SMS POLI MPE_E = 20 + (L / 200mm)

1.5.2017 11:06

teplota : 22.2°C

		Název dílu :	Rám dveří P	Číslo dat :	1142-15
Číslo dílu :	565.809.606	operace :	50	Číslo výkresu :	31-72D 356167/P1
Číslo protokolu :	P647-15	smrštění :		Činnost :	tvar - čelo
Typ :	SK-326/1-EU	offset :	-0.70	Tolerance :	-0.10/0.10
Měřil :	Řehořík	Posun v ose :	*****		

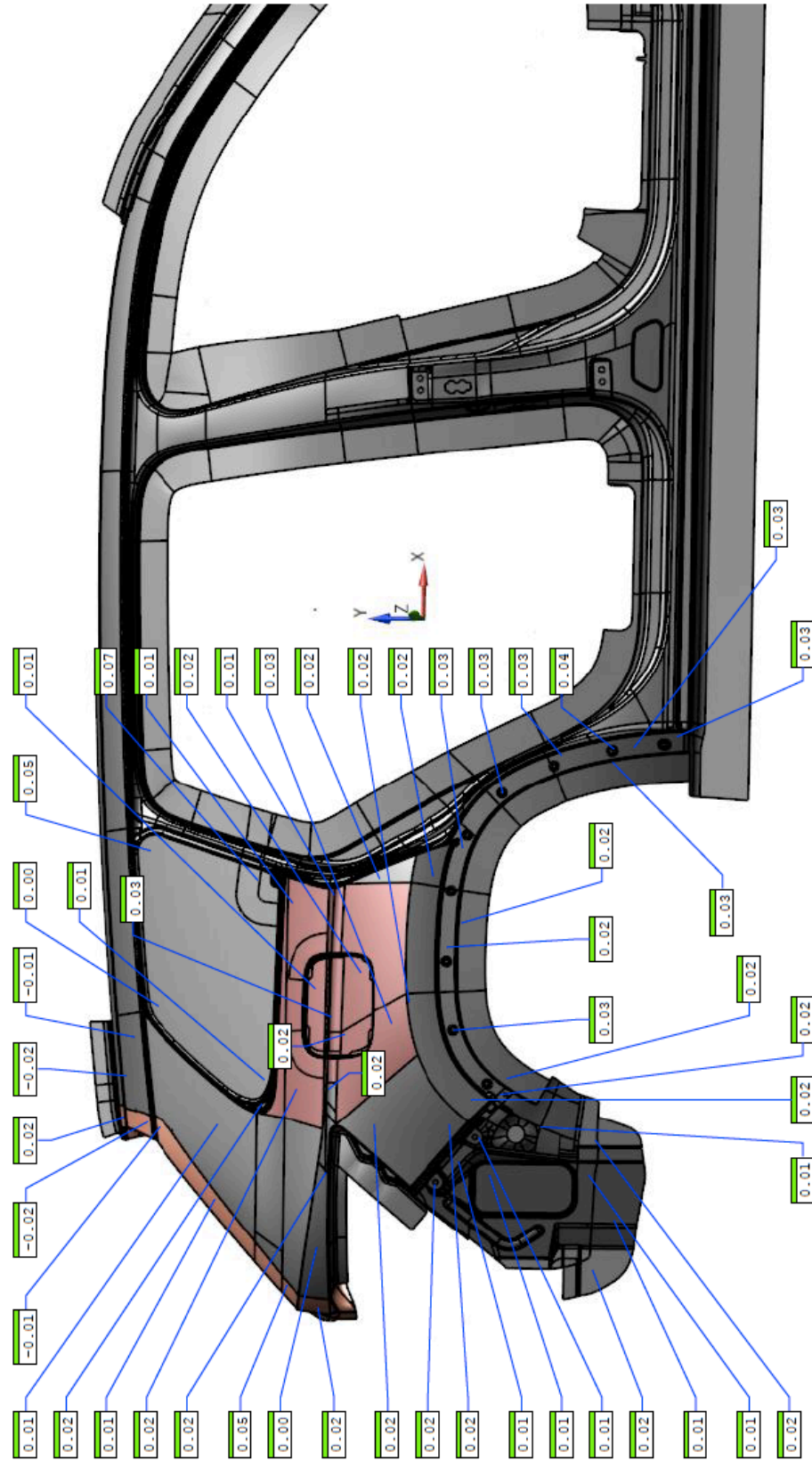


SMS POLI MPE_E = 20 + (L / 200mm)

5.5.2017

teplota : 22.2°C

		Název dílu : Rám dveří P		Číslo dat : 1142-15	
Číslo dílu : 565.809.606		operace : 50		Číslo výkresu : 31-72D 356167/P1	
Číslo protokolu : P647-15		smrštění :		tvar - čelo	
Typ : SK-326/1-EU		offset : -0.70		Tolerance : -0.10;0.10	
Měřil : Řehořík		Posun v ose : *****			



SMS POLI MPE_E = 20 + (L / 200mm)

5.5.2017

teplota : 23,1°C

	Název dílu :	Rám dveří P	Číslo dat :	0465-16 NCM
	Číslo dílu :	565.809.606	operace :	40
	Číslo protokolu :	P521-16	smrštění :	úprava tvaru
	Typ :	SK-326-1	offset :	-0.10 ; 0.10
Měřil :	Řehořík	Posun v ose : *****		

