

# **ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta strojní – Ústav technologie obrábění, projektování  
a metrologie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

## **Virtuální upínání dílů v rámci kontroly kvality s využitím CMM**

Virtual clamping of parts in quality inspection using CMM

Autor:

Bc. Jan Drška

Vedoucí práce:

Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Rok:

2023

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Drška** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **482437**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Virtuální upínání dílů v rámci kontroly kvality s využitím CMM**

Název diplomové práce anglicky:

**Virtual clamping of parts in quality inspection using CMM**

Pokyny pro vypracování:

Rozměrová kontrola kvality tenkostěnných plechových dílů.  
Využívané technologie a snímací systémy.  
Problematika upínání dílů a typy přípravků.  
Virtuální upínání dílů pro redukci nákladů na přípravky.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **31.03.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2023**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

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

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

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

# Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci „Virtuální upínání dílů v rámci kontroly kvality s využitím CMM“ vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

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

V Praze dne .....

.....

Bc. Jan Drška

## Poděkování

Především bych chtěl velmi poděkovat panu Ing. Liborovi Beránkovi, Ph.D. za odborné vedení této práce. Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům společnosti Škoda Auto a.s. za plnou podporu při zpracování této práce, nejvíce pak panu Markovi Krčmaříkovi za zprostředkování stáže a panu Bc. Ladislavovi Procházkovi za cennou spolupráci. Také bych chtěl poděkovat pánům Ing. Jindřichovi Kubákovi a Bc. Miloši Zahradníkovi ze společnosti TechSoft Engineering, spol. s r.o. za konzultaci a cenné rady ohledně softwaru Ansys. Za konzultace problematiky metody konečných prvků bych chtěl poděkovat panu Ing. Jiřímu Kuželkovi, Ph.D. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mé rodině a všem, kteří mě podporovali během celého studia.

# Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá metodou virtuálního upínání v rámci rozměrové kontroly kvality tenkostěnných plechových dílů. Teoretická část této práce je zaměřena na upínací systémy a postupy, technologie a zařízení pro kontrolu kvality využívaná v současnosti. Její součástí je také rešerše metody virtuálního upínání, jejích postupů a možných aplikací v oblasti rozměrové kontroly. V praktické části je rekonstruován proces získání dat pro metodu virtuálního upínání a následně provedena simulace této metody v softwaru Ansys. Simulace je provedena na zkušebním dílu blatníku z výrobního portfolia společnosti Škoda Auto a.s. Výsledky simulace jsou poté vyhodnoceny porovnáním s referenčními daty pomocí barevných map a kvantitativních parametrů.

## Klíčová slova

Virtuální upínání, CMM, upínací přípravky, RPS

## Abstract

This masters thesis deals with the method of virtual clamping within the dimensional quality control of thin-walled sheet metal parts. The theoretical part of this thesis focuses on clamping systems and procedures, technologies and quality control equipment used today. It also includes a survey of the virtual clamping method, its procedures and possible applications in dimensional inspection. In the practical part, the process of data acquisition for the virtual clamping method is reconstructed and then the simulation of this method is performed in Ansys software. The simulation is performed on a test part of a fender from the production portfolio of Škoda Auto a.s. The simulation results are then evaluated by comparison with reference data using colour maps and quantitative parameters.

## Keywords

Virtual clamping, CMM, Clamping fixtures, RPS

# Obsah

Obsah .....	13
Seznam použitých zkratek a symbolů .....	9
Úvod.....	10
1   Kontrola kvality tenkostěnných plechových dílů.....	11
2   Systémy pro kontrolu karoserie .....	12
2.1   CMM .....	12
2.1.1   Kartézské CMM .....	13
2.1.2   Nekartézské CMM .....	16
2.2   Snímací systémy .....	19
2.3   Kontaktní snímání.....	19
2.4   Bezkontaktní snímání.....	20
2.4.1   Triangulace .....	21
2.4.2   Laserové skenery .....	22
2.4.3   Pruhová projekce.....	24
3   Systémy upínání dílů.....	25
3.1   Mechanické upínání .....	25
3.1.1   Rámové přípravky .....	26
3.1.2   Upínací desky.....	27
3.2   Modulární upínací systémy.....	28
3.2.1   DEA Five U-nique .....	28
3.2.2   Alufix.....	29
3.2.2.1   Rayco fixtures .....	30
3.2.2.2   Zeiss Carfit .....	31
3.2.3   Specializované upínací systémy pro metodu virtuálního upínání .....	31
3.3   Systémy vyrovnání .....	31
3.3.1   Standardní metoda vyrovnání.....	32

3.3.2	RPS .....	33
3.3.3	3D připasování.....	34
4	Náhrada upínacího systému virtuálním upínáním.....	35
4.1	Princip virtuálního upínání.....	35
4.2	Metoda konečných prvků .....	39
4.3	Software.....	39
4.3.1	Ansys .....	40
5	Rekonstrukce procesu vytvoření dat pro virtuální upínání .....	41
5.1	Díl pro ověření metody virtuálního upínání .....	41
5.2	Dotykové měření dílu ve standardním přípravku.....	42
5.3	Přípravek pro snímání dílu v horizontální poloze .....	43
5.4	Digitalizace dílu.....	46
5.5	Zpracování dat.....	49
6	Virtuální upínání v SW Ansys .....	53
6.1	Použitá data.....	54
6.2	Discovery .....	55
6.3	Workbench.....	55
6.4	ICEM CFD .....	57
6.5	Mechanical .....	57
6.5.1	Definice okrajových podmínek .....	58
6.5.2	Tíhové zrychlení .....	59
6.5.3	APDL skript.....	59
6.5.4	Posunutí RPS .....	60
6.6	Výstupy simulace.....	60
6.7	Iterace.....	61
6.8	Vyhodnocení výsledků .....	61
6.8.1	Výsledky první iterace.....	62
6.8.2	Výsledky druhé iterace .....	64

6.8.3	Výsledky třetí iterace.....	65
	Závěr.....	67
	Reference .....	69
	Seznam obrázků .....	73
	Seznam Tabulek.....	75



# Seznam použitých zkratek

CAE	Computer aided engineering	Počítačem podporované inženýrství
CAD	Computer aided design	Počítačem podporované konstruování
CCD	Charge-coupled device	Zařízení s vázanými náboji
CMM	Coordinate measuring machine	Souřadnicový měřicí stroj
MKP		Metoda konečných prvků
RPS	Referenz punkt systematik	System referenčního bodu
SS		Souřadnicový systém
SSP		Sken ve standardním přípravku
STL		Stereolitografie
SW		software
VC	Virtual clamping	Virtuální upínání

# Úvod

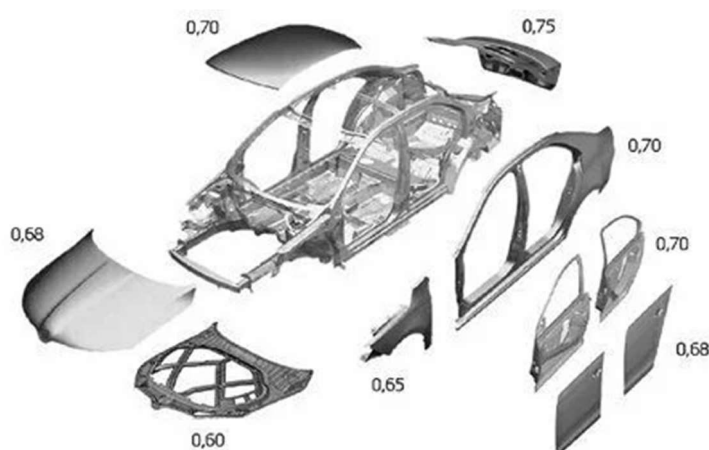
V současnosti jsou v automobilovém průmyslu kladeny vysoké požadavky na snížení spotřeby paliva a emisí automobilů, kterého je dosahováno snížením hmotnosti a zvýšením aerodynamických vlastností. Snížení hmotnosti je dosaženo optimalizací designu a využitím lehčích a pevnějších materiálů.

Z toho důvodu jsou pro výrobu dílů karoserie využívány tenkostěnné plechy z ocelí s vysokou pevností a tažností. To s sebou však přináší problémy při kontrole rozměrů těchto dílů. Díly přestávají být dostatečně tuhé a můžou projevat výrazné geometrické změny ve volném stavu kvůli působení gravitace a zbytkového napětí po tváření. Tyto faktory navíc nelze kompletně a přesně kvantifikovat.

Aby byly sníženy tyto vlivy, jsou při rozměrové kontrole dílů karoserií využívány komplexní upínací systémy, které jsou ale drahé a náročné na údržbu. I z toho důvodu vznikla metoda virtuálního upínání, která nahrazuje tyto upínací systémy matematickou simulací.

# 1 Kontrola kvality tenkostěnných plechových dílů

V automobilovém průmyslu jsou plechové díly výsledkem tvářecích operací jako například stříhání, ohýbání, děrování a lisování v zápustce. Většinou se tyto operace provádí za studena, kdy se změnou tvaru dochází k částečnému zpevnění výkovku. Často pak bývají jednotlivé díly svařovány do větších montážních celků. Za tenkostěnné se obecně považují díly s tloušťkou stěny do 3 mm, ale s vývojem tvářecích procesů a používaných materiálů se tato hranice snižuje. V současnosti je snaha snižovat hmotnost karoserie s cílem snížit vyprodukované emise a spotřebu paliva. Jedním ze způsobů naplnění zmíněných cílů je právě snižování tloušťky použitých plechů, a v dílech karoserie se proto setkáváme výhradně s plechy o tloušťkách pod 1 mm. Příklady tlouštěk plechů použitých na díly karoserie vozu Škoda Octavia 3. generace jsou k vidění na Obrázek 1.



Obrázek 1 - tl. Plechů automobilu Škoda Octavia III [1]

Vzhledem k vlastnostem plechů používaných při výrobě vnějších dílů karoserie jako je právě nízká tloušťka a vysoká tažnost, jsou na upínání takových dílů kladeny vyšší požadavky. Je to především z toho důvodu, aby se při měření plechový díl co nejméně dále deformoval.

## 2 Systémy pro kontrolu karoserie

Kontrola rozměrových tolerancí plechových dílů je z pohledu metrologie běžnou operací, která postupuje dle měrového plánu a předpisů, a zároveň probíhá na běžných souřadnicových měřicích strojích. V případě plechových dílů karoserie se lze setkat s výlisky a svařenci v širokém spektru velikostí od dílů pro kotvení náprav, přes blatníky až po celé postranice, či dokonce okované karoserie, tedy karoserii osazenou dveřmi, kapotou a víkem zavazadlového prostoru. Zejména u tvarově složitějších dílů je dotykové měření využíváno pro rychlou a automatickou kontrolu tolerancí v daných bodech. V případě potřeby vyhodnocení tolerancí celého povrchu dílu je ale měření v podobě diskretních bodů nedostatečné, a proto se přistupuje k optickému měření, u kterého je naměřená data možné porovnat s nominální CAD geometrií a vyhodnotit odchylky celých tvarových ploch. [2]

Následující sekce této kapitoly popisují technologické možnosti a používaná zařízení v oblasti kontroly kvality a metrologie automobilových karoserií. Detailní rozbor je uveden zejména pro postupy, které mají přímou souvislost s praktickou částí této diplomové práce.

### 2.1 CMM

Standardem v metrologických úkonech ve většině průmyslových aplikacích je dnes využití souřadnicových měřicích strojů neboli CMM (z anglického Coordinate measuring machines). Jedná se o stroje a zařízení, která jsou schopná pomocí snímacího systému zaměřit a zpracovat body na povrchu měřené součásti. K jejich rozšíření vedl vývoj výpočetních a výrobních technologií spolu s vyššími nároky na přesnost a produktivitu měření. Rozvoj CAD (z anglického computer aided design, počítačem podporované konstruování) a CAE (z anglického computer aided engineering, počítačem podporované inženýrství) systémů dovolil navrhovat, konstruovat a vyrábět geometricky složitější díly, které však bylo jen stěží možné kontrolovat konvenčními měřidly. CMM je možné na trhu nalézt v široké škále provedení a konfigurací. Volba souřadnicového měřicího stroje a snímacího systému by měla probíhat na základě požadavků konkrétní aplikace.

CMM dělíme dle uspořádání daného jejich konstrukcí na kartézské, tvořené třemi na sebe kolmými osami, a nekartézské, u kterých je polohování snímacího systému realizováno klouby nebo otočnými prvky a rameny. Kartézské měřicí stroje mají pracovní prostor ve tvaru kvádrů a výsledná poloha bodu je dána odečtením souřadnic v jednotlivých osách XYZ. V případě nekartézských se setkáváme s cylindrickými a sférickými měřicími prostory, přičemž je výsledná poloha vypočtena z úhlu natočení otočných prvků a známé, nebo vypočtené délky ramen. Ta poté bývá přepočítána do kartézského souřadnicového systému a výsledkem je opět poloha ve 3 souřadnicích XYZ. [3]

Kartézské bývají zpravidla stacionární měřicí stroje vzhledem k jejich použití, konstrukci a automatickému řízení. Ne kartézská jsou naopak většinou měřicí ramena a další systémy jako například laser trackery nesoucí, respektive sledující optické snímače. Je to především z důvodu vyšší volnosti a rychlosti polohování vyžadované obzvláště u ručně polohovaných ramen.

### **2.1.1 Kartézské CMM**

Za 70 let existence kartézských souřadnicových strojů se významně rozšířila oblast možného nasazení této technologie, což samozřejmě představuje také významný nárůst škály provedení. Zvyšování přesnosti a opakovatelnosti CMM jde ruku v ruce s vývojem odměřování, snímání a materiálů použitých pro jejich konstrukci. I přes zásadní rozvoj komponent se však jádro technologie příliš nezměnilo. Ačkoliv jsou používány progresivnější materiály a komplexnější konstrukce, deska pracovního stolu z granitu je, především pro své výhodné vlastnosti v podobě rozměrové stálosti, využívána dodnes. Další vývoj přišel spolu s rozvojem výpočetních technologií. Počítačové řízení znamenalo zpřesnění měření a umožnilo interpolovat dráhy sond i po složitějších křivkách, než byly přímé pohyby paralelní s osami stroje. Rovněž bylo umožněno měřit mimo snímáním diskretních bodů i takzvaným skenováním, včetně snímání a vyhodnocování kruhovitosti a podobně. V současnosti jsou řídicí systémy schopny zpřesňovat měření pokročilou korekcí dotyku. [3]

Laboratorní stacionární CMM dosahují přesností v řádech mikrometrů. I z toho důvodu bývají kvůli maximálnímu využití jejich přesnosti používány především s dotykovými snímacími systémy, které oproti optickým systémům vnášejí minimální chyby do procesu měření.

### 2.1.1.1 Konfigurace kartézských CMM

Nejčastější konfigurace kartézských CMM nalezneme v normě ISO 10360 [4]. Každá konfigurace má své charakteristiky a při výběru stroje je volena dle konkrétní aplikace. Mimo přesnosti a dalších parametrů daných použitou technologií je výchozím kritériem měřicí objem stroje. Ten udává, jak velké předměty bude možné do stroje umístit a měřit.

Výčet konfigurací dle ISO 10360-1 s českým překladem a originálním anglickým označením:

- Výložníkový CMM s pevným stolem (Fixed table cantilever CMM)
- CMM s pohyblivým portálem (Moving bridge CMM)
- Mostový CMM (Gantry CMM)
- CMM s portálem (mostem) ve tvaru L (L-shaped bridge CMM)
- CMM s pevným portálem (Fixed bridge CMM)
- Výložníkový CMM s pohyblivým stolem (Moving table cantilever CMM)
- Stojanový CMM (Column CMM)
- CMM s pohyblivým sloupem a pohyblivým vodorovným ramenem (Moving ram horizontal-arm CMM)
- CMM s pevným stolem a vodorovným ramenem (Fixed table horizontal-arm CMM)
- CMM s pohyblivým stolem a vodorovným ramenem (Moving table horizontal-arm CMM)

V následujících podkapitolách jsou blíže popsány dvě konfigurace kartézských CMM, které byly použity v praktické části této práce.

### 2.1.1.2 CMM s pohyblivým portálem

Konstrukce tohoto typu stacionárního CMM je tvořena nepohyblivým stolem tvořícím základnu stroje, na kterém je na dvou nohách umístěna konstrukce portálu, která se vůči základně pohybuje horizontálně v ose Y. Pinola se pohybuje v ose X po vedení uloženém v portále a zároveň je jejím vertikálním posuvem vzhledem

k základně stroje realizováno polohování snímacího systému v ose Z. Dle konkrétního výrobce může dojít k prohození os X a Y, konstrukce však zůstává stejná. [4]

Příkladem stroje tohoto typu je UPMC 850 Carat od výrobce Carl Zeiss spol. s r.o., který byl použit pro měření poloh opěrných bodů přípravku v kapitole 5.3. Měřicí rozsah je v jednotlivých osách:  $x = 850 \text{ mm}$ ,  $y = 1200 \text{ mm}$ ,  $z = 600 \text{ mm}$ . Nejnižší udávané mezní hodnoty pro chybu měření délky jsou v jedné ose  $u_1 = (0,40 + 1,11 L) \text{ } \mu\text{m}$  a v prostoru  $u_3 = (0,70 + 1,67 L) \text{ } \mu\text{m}$ , kde L je měřená délka v metrech. Mezi prvky zajišťující vysokou přesnost stroje můžeme zařadit aerostatické vzduchové uložení pohyblivých částí, nebo využití materiálu Zerodur s velmi nízkou teplotní roztažností v konstrukci optických odměřování poloh os. [5]



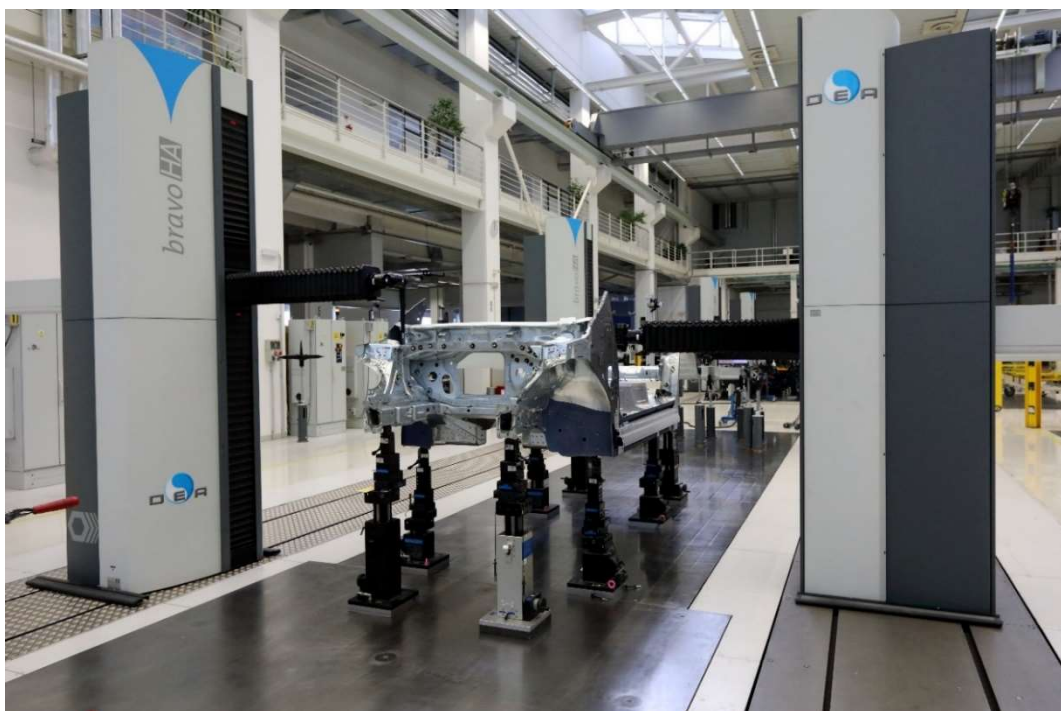
Obrázek 2 - CMM Zeiss UPMC 850 Carat [6]

### 2.1.1.3 CMM s pohyblivým sloupem a pohyblivým vodorovným ramenem

Hlavním konstrukčním prvkem tohoto typu CMM je sloup, který ukrývá vedení pro horizontální rameno, na jehož konci se nachází snímací systém. Celý sloup se posouvá v ose X podél vedení uloženého v základně stroje. Pohyb snímacího systému je realizován v ose Z posuvem ramene podél uložení ve sloupu a v ose Y horizontálním výsuvem ramene. [4] Jelikož se CMM tohoto typu řadí mezi stroje s relativně velkým měřicím objemem, bývají často zabudovány přímo do podlahy pro usnadnění manipulace s dílem a zvýšení nosnosti základny stroje. Omezený rozsah

osy Y daný maximálním výsuvem ramene je v praxi řešen umístěním druhého sloupu se zrcadlově orientovaným ramenem vůči prvnímu. V takové konfiguraci lze měřit symetrické objekty, jako například karoserii automobilu, z obou stran najednou. Pro maximální využití stroje jsou této konfiguraci přizpůsobeny i přípravky umožňující upnout díly karoserie, například blatníky z levé i pravé strany vozu

Příkladem CMM tohoto typu je DEA Bravo HA, který je dostupný ve čtyřech kombinacích rozsahu ramene a výšky sloupu. Pro největší konfiguraci s měřicím rozsahem v osách  $y = 1600$  mm a  $z = 2400$  mm je uváděná maximální chyba měření délky  $MPE_E = (15 + 10 L/1000)$   $\mu\text{m}$ , kde L je měřená délka v mm. [7]



Obrázek 3 - CMM DEA Bravo HA [8]

## 2.1.2 Nekartézské CMM

Nekartézské CMM byly vyvinuty jako alternativa ke stacionárním kartézským strojům. Hlavní předností nekartézských CMM je mobilita, daná kompaktností těchto zařízení. Nekartézské CMM nejčastěji získávají souřadnice polohy měřených bodů ve sférickém souřadném systému daném jejich konstrukcí. Tato poloha ale bývá z důvodu snazšího zpracování dat automaticky přepočítávána do polohy v kartézském souřadném systému. [3]



### 2.1.2.1 Měřicí ramena

Často využívaným druhem nekartézských CMM z důvodu jejich vysoké mobility a jednoduché obsluhy jsou měřicí ramena. Konstrukce ramene, která je umístována na univerzální upínací systém, se skládá z rotačních kloubů, které obsahují úhlový odměřovací enkodér, a samotných ramen vyráběných z lehkých materiálů s nízkou teplotní roztažností. Za posledním kloubem je umístěn držák snímacího systému s rukojetí. Na většinu typů ramen je možno uchytit jak dotykovou sondu, tak bezkontaktní snímací systém, jako například laser scanner. Měřicí ramena jsou polohována manuálně a pro usnadnění manipulace disponují vyvažovacím zařízením. Dosahované přesnosti ramen jsou přibližně o dva řády horší v porovnání se stacionárními CMM. Ramena se dělí dle počtu kloubů na šestiosá a sedmiosá. Sedmiosá ramena jsou obecně méně přesná než šestiosá, protože každý kloub vnáší do systému další nepřesnost. I přes to jsou častou volbou pro bezkontaktní snímání z důvodu vyšší volnosti pohybu dané právě kloubem navíc. [9]



Obrázek 4 - Sedmiosé měřicí rameno Nikon MCAx S s multisenzorovým snímacím zařízením [10]

### 2.1.2.2 Laser tracker

K měření velkých dílů a celků jsou používány laserové trackery. Jejich základem je optická hlava, která v sobě ukrývá laserový interferometr, úhlové odměřovací zařízení a polohovací ústrojí. Měření laserovým trackerem je založeno na sledování sondy s koutovým odražečem polohováním optické hlavy. Ze způsobu odrazu laserového paprsku v koutovém odražeči sondy je získávána informace o jejím pohybu. Tyto informace jsou vyhodnoceny v řídicí jednotce, která podle nich provádí polohování optické hlavy. Při sejmutí bodu je její úhel natočení od vertikální i horizontální osy zaznamenán rotačními enkodéry a vzdálenost sondy od zařízení změřena laserovým interferometrem. [3]



Obrázek 5 - Laser tracker Leica Absolute Tracker AT960 [11]

Inovativním řešením od společnosti Hexagon AB je využití laserového trackeru pro sledování polohy laserového skeneru. Oproti často využívané kombinaci měřicího ramene a snímacího zařízení laser scanner poskytuje toto řešení vyšší přesnost, mobilitu a větší měřicí prostor. Tomuto účelu je upraveno i zařízení laser scanner integrací referenčních bodů do konstrukce těla. [11]

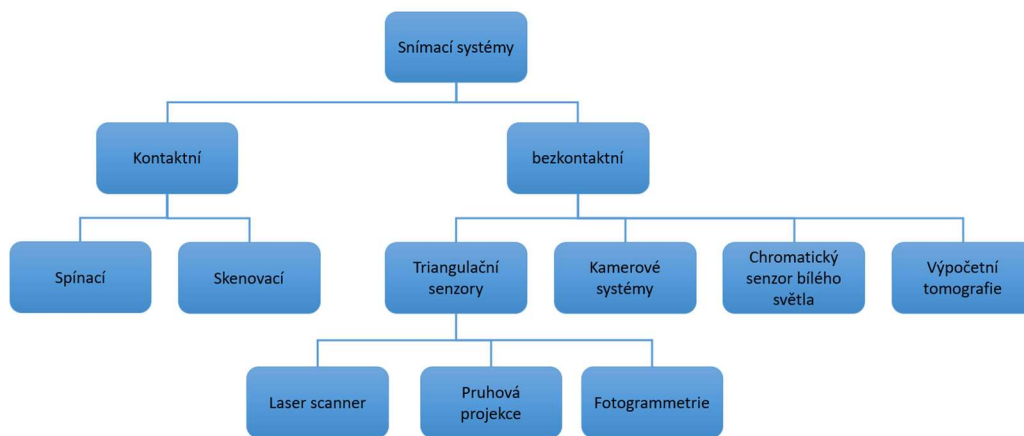
### 2.1.2.3 Využití průmyslových robotů

S rozšířením průmyslových robotů došlo k jejich implementaci i do metrologických aplikací. Přesnost jejich polohování však není pro tyto aplikace dostatečná. Z toho důvodu jsou průmyslové roboty používány pouze k nesení

a polohování snímacího systém, jehož poloha je snímána laser trackerem. Průmyslové roboty jsou dnes jádrem automatizovaných měřicích buněk. [12] [13]

## 2.2 Snímací systémy

Snímání bodů při měření na CMM realizuje elektromechanický snímací systém. Za základní kritérium dělení snímacích systémů pro CMM považujeme mechanismus získávání dat při měření. Kontaktní využívá mechanický dotyk části snímacího systému k tomu určené s povrchem dílu a výsledkem jsou souřadnice diskrétního bodu. Naproti tomu bezkontaktní snímací systémy využívají k získání dat paprsky světla nebo jiného záření, jehož interakce se snímaným předmětem je zaznamenána snímačem osazeným odpovídající technologií.



Obrázek 6 - Rozdělení snímacích systémů

## 2.3 Kontaktní snímání

Tyto snímací systémy zaznamenávají body na základě mechanického kontaktu s povrchem měřené součásti, který je realizován částí systému nazvané měřicí dotyk a většinou má podobu kuličky spojené se snímacím modulem pomocí dřívku. Při kontaktu je dotyk vychýlen ze své základní polohy, čímž dojde k sepnutí kontaktu v modulu snímacího systému a zaznamenání bodu. K detekci vychýlení měřicího dotyku jsou ve snímacích modulech využívány různé elektromechanické nebo optické principy. Kuličky i dřívky jsou vyráběny z různých materiálů a jsou voleny dle konkrétní aplikace. Jelikož přichází kuličky do kontaktu s měřenou součástí a při měření metodou skenování dokonce přejíždí po jejím povrchu, je nejvyšší požadavek kladen na jejich otěruvzdornost. Nejčastěji používaným materiálem je proto syntetický rubín ( $Al_2O_3$ ), disponující pro tyto aplikace vhodnými vlastnostmi. Jeho nedostatkem je pouze hrozící adhezivní opotřebení při měření dílů z hliníku a jeho slitin. Konfiguraci

snímacích dotyků je nutné sestavit před samotným měřením po pečlivé analýze dílu tak, aby bylo po její kvalifikaci možné zaznamenat všechny cílové body dotyku. [3]

Přednostmi kontaktních snímacích systémů je přesnost a nezávislosti měření na čistotě a optických vlastnostech povrchu. Kvůli nutnému kontaktu s povrchem však není vhodné snímat díly z měkkých materiálů, například pryže, nebo díly, u kterých by mohlo vlivem dotyku dojít ke změně geometrie. [14]

## 2.4 Bezkontaktní snímání

Bezkontaktní snímací systémy nevyžadují oproti kontaktním metodám pro získání dat z měřeného povrchu mechanický dotyk. Ten je nahrazen využitím různými druhy záření. Podle něj můžeme bezkontaktní systémy dělit na optické, využívající světlo z viditelného spektra, laserové, získávající údaje o měřené součásti interakcí laserového paprsku s jejím povrchem, nebo počítačovou tomografií, která data získává zachycením rentgenového záření proniklého skrz díl na detektoru. Za další skupiny bezkontaktního snímání můžeme považovat systémy využívající ultrazvukové a jiné vlny, které jsou však, spíše než v metrologii, využívány v defektoskopii. Přesnost bezkontaktních snímacích systémů silně závisí na stavu a vlastnostech snímaného povrchu. Snímání lesklých a průsvitných povrchů je velmi problematické, v některých případech i nemožné. Naproti tomu tyto systémy vynahrazují nedostatky kontaktních systémů možností snímání dílů z měkkých materiálů, dílů o vysokých teplotách a podobně. Výhodou je také vysoká rychlost snímání. Zatímco výstupem kontaktních metod jsou souřadnice diskrétních bodů, výstupem bezkontaktních snímacích metod je většinou takzvané mračno bodů tvořené všemi body nasnímanými v průběhu měření. Tento velký objem dat klade vyšší požadavky na výpočetní techniku a aby bylo mračno bodů použitelné pro účely kontroly rozměrových tolerancí, je nutné jeho další zpracování. Po něm je však možné provádět vyhodnocení i geometricky složitých ploch. Proces bezkontaktního snímání objektu za účelem vytvoření jeho parametrického modelu se nazývá digitalizace. [14]

Při kontrole rozměrových tolerancí dílů karoserie jsou používány především optické a laserové bezkontaktní snímací systémy, a z toho důvodu jsou popsány detailněji v následujících podkapitolách.

## 2.4.1 Triangulace

Zatímco při získávání dat dotykem je poloha bodu vypočtena ze známých hodnot jako jsou polohy os, délky a natočení ramen a dalších částí měřicího systému, funguje většina bezkontaktních snímacích systémů na principu triangulace. Ta spočívá ve vytvoření imaginárního trojúhelníku mezi triangulačními prvky, kterými jsou zájmový bod, snímač a zdroj záření. Zdroj záření a snímač mezi sebou tvoří triangulační bázi (základnu trojúhelníku), jejíž délka je dána konstrukcí systému. Úhel mezi bází a zdrojem záření je konstantní, zatímco úhel mezi snímačem a triangulační bází je dán úhlem dopadu záření odraženého od snímaného objektu do snímače a mění se dle tvaru povrchu na kterém k odražení došlo. U měření bezkontaktním snímacím systémem je triangulací získávána především vzdálenost snímaného povrchu od zařízení, jelikož ostatní souřadnice jsou odečteny z polohy stroje, nebo sledovacího zařízení.

Schéma triangulačního systému bodového laser scanneru je zobrazeno na obrázku 4. Kde  $H$  značí délku triangulační báze,  $\alpha$  je úhel projekce a  $\beta$  je úhel detekce, který je vypočten ze vzdálenosti detektoru od čočky  $d$  a pozice na detektoru  $p$ . Bod  $[X,Z]^T$  je vypočten z báze  $H$  a úhlů  $\alpha$  a  $\beta$ .

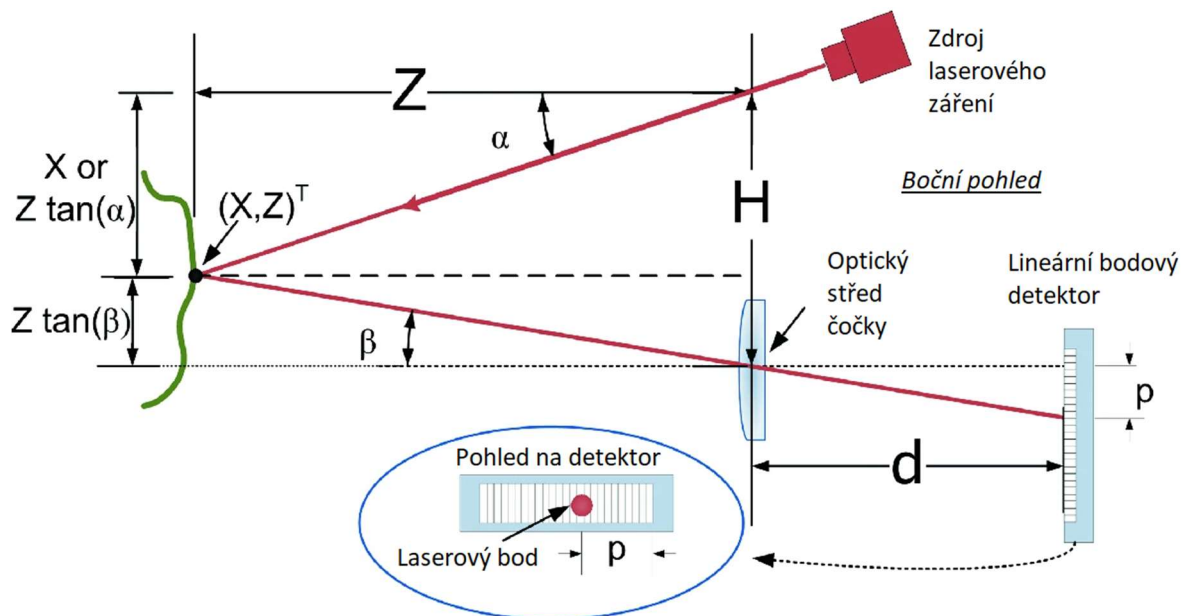
$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{p}{d}\right) \quad (1)$$

$$Z = \frac{H}{\tan \alpha + \tan \beta} \quad (2)$$

$$X = Z \tan \alpha \quad (3)$$

Po dosazení rovnice (1) do rovnice (2) dostaneme vztah:

$$Z = \frac{H d}{p + d \tan \alpha} \quad (4)$$



Obrázek 7 - Schéma triangulačního principu laserového skeneru [15]

## 2.4.2 Laserové skenery

Hlavním představitelem bezkontaktních snímacích metod využívajících laserové záření je zařízení laser scanner (česky laserový skener), pracující na principu aktivní triangulace, u kterého jsou triangulačními prvky zdroj laserového záření a optický detektor. Laserové skenery se dělí dle rozsahu snímání na 1D, 2D a 3D. 1D laserový skener promítá a snímá pouze samostatný bod, 2D je často označován jako liniový, jelikož na povrch snímání součásti promítána linie. 3D laser scanner promítá na povrch součásti rastr, jehož snímáním jsou získána data z celé plochy osvětlené tímto rastrem. V některých zařízeních je k výpočtu vzdálenosti objektu snímáním

doby letu laserového paprsku. Pro dosažení dostatečné přesnosti tohoto systému ve vzdálenostech, ve kterých standardně probíhá měření dílů, jsou ale kladeny vysoké požadavky na zdroj laserového zařízení i senzor. [14]

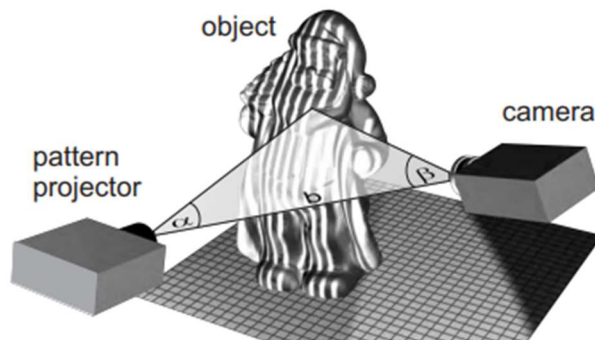


*Obrázek 8 - Laserový skener Leica T-scan 5 upnutý na průmyslovém robotu [8]*

Nejčastěji využívaným typem laserových skenerů v metrologických aplikacích jsou 2D liniové skenery. Ze zdroje je vysíláno laserové záření přes pohyblivé zrcadlo, které tak na povrchu součásti tvoří linii. To se poté odráží zpět do snímače, kde je vyhodnoceno. Zakřivení snímaného povrchu způsobí odraz paprsků záření pod různými úhly. Tyto rozdíly jsou zaznamenány ve snímači, kterým je maticová kamera. Tím jsou získány informace o poloze bodů v promítané linii. Pro získání dat celého zájmového povrchu je potřeba skenerem pohybovat tak, aby linie prošla všemi jeho body. Důležité je udržovat skener přibližně kolmo k povrchu, a zároveň v dané vzdálenosti proto, aby co nejvíce odražených paprsků směřovalo zpět do snímače. Z toho důvodu jsou laserové skenery opatřeny promítáním pomocného laserového bodu, jehož překrytí s promítanou linií značí ideální polohu zařízení vůči povrchu. [15]

### 2.4.3 Pruhová projekce

Další metodou bezkontaktního snímání na principu triangulace je pruhová projekce. Při tomto druhu snímání je na povrch součásti promítán rastr paralelních pruhů, které se zdeformují podle jeho geometrie. Takto zdeformované pruhy jsou snímány jednou nebo dvěma kamerami s CCD čipem a pomocí triangulace jsou vypočteny a zaznamenány polohy bodů na povrchu součásti. V jednom snímání dojde k zachycení všech osvětlených bodů v zorném poli kamery. Pruhy jsou promítány různými typy projektorů (LCD, LDP, LED a podobně), většinou však v modré barvě pro snížení vlivu okolního osvětlení. Zařízení využívající tuto metodu snímání bývají často využívány v metrologii a reverzním inženýrství pro svou rychlost a přesnost sběru dat, robustnost a možnost snadné implementace do automatizovaného měření. [16]



Obrázek 9 – Princip a konfigurace triangulačních prvků pruhové projekce, převzato a upraveno z [17]

V porovnání s laserovými skenery je pruhová projekce přesnější, jelikož se jedná o samostatný systém nevyžadující pro své polohování CMM, které by mohlo vnést do polohy bodů další nepřesnosti. Přesnost pruhové projekce je však závislá na vzdálenosti od snímaného povrchu a klesá přibližně od 2/3 měřicího rozsahu. Výrazný rozdíl je také v rychlosti získávání dat z povrchu součásti, které při pruhové projekci probíhá v celém zorném poli snímače najednou, zatímco většina laserových skenerů vyžaduje pohyb zařízení podél povrchu součásti. Naproti tomu jsou laserové skenery mobilnější a dynamičtější. Obsluha může navíc ovlivnit objem snímaných dat a více se zaměřit na kritická místa, případně sběr dat z těchto míst jednoduše zopakovat.



## 3 Systémy upínání dílů

Díly jsou upínány z důvodu zajištění jejich pozice v průběhu měření tak, aby byla udržena návaznost mezi jednotlivými měřenými body. U automatizovaného měření na CMM upnutím zajišťujeme opakovatelnost polohování dílu, která je pro automatizaci měření velmi důležitá. Upínací přípravky nám navíc dovolují změřit místa, která by jinak byla, pokud by byl díl v prostoru stroje jen volně položen, nepřístupná.

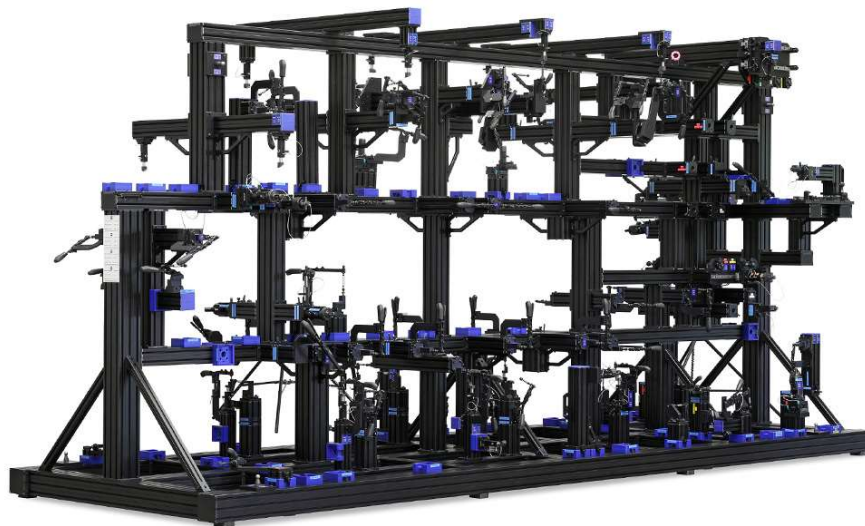
Oproti tuhým dílům, které jsou upínány z výše zmíněných důvodů, jsou na upínání pružných dílů kladeny vyšší požadavky. Je to z důvodu vzniku deformací dílů při jejich zatížení pouze gravitační silou. Upínací systémy musí veškeré takto vzniklé deformace korigovat, aby nemohly významně ovlivnit geometrii dílu při měření. Iz toho důvodu jsou plechové díly karoserie měřeny zásadně v orientaci shodné s jejich orientací v zástavbě. Vzniká tak paradox, kdy lze výrobně drahé díly, jako například blok motoru, upínat jednoduchými upínkami, ale díly relativně levné na výrobu, jako jsou například blatníky, je nutné upínat drahými a konstrukčně složitými přípravky.

### 3.1 Mechanické upínání

V současné době se pro upínání dílů karoserií využívají specializované upínací přípravky s pevnou a tuhou konstrukcí a přesně umístěnými opěrnými body, ve kterých je pozice dílu fixována mechanicky pákovými upínkami. S rozvojem pružné výroby však tato řešení přestávají být vhodná, jelikož nedovolují dostatečnou adaptaci na zmíněnou flexibilitu procesu. Hlavní důvod používání specializovaných přípravků je nutnost měření dílů v poloze shodné s jejich polohou na automobilu a přesné polohy RPS ploch.

### 3.1.1 Rámové přípravky

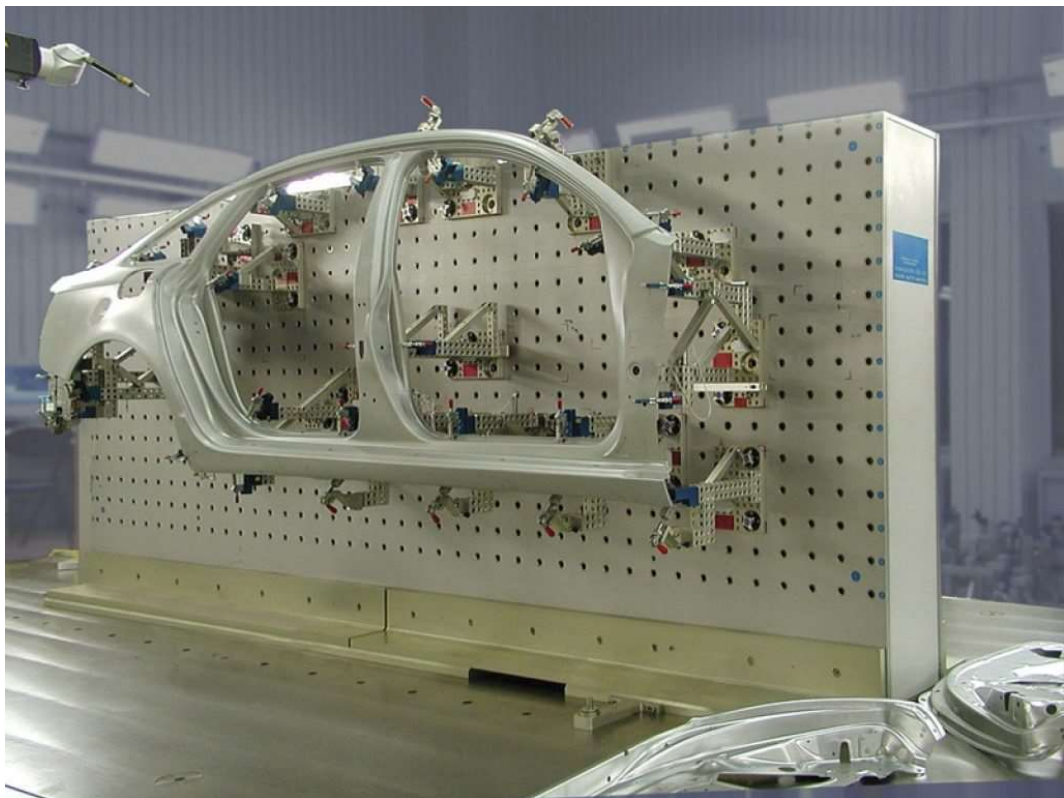
Pro upínání menších a středně velkých dílů jsou v současnosti využívány specializované rámové přípravky vyráběné na zakázku u externího dodavatele. Skládají se z komplexní rámové konstrukce a opěrných a přidržovacích prvků. Polohy opěrných prvků se nachází v úzkých tolerancích, aby byla zaručena spolehlivá kontrola upínaných dílů. Fakt, že je každý přípravek určen pouze pro daný díl, v kombinaci s jejich relativně velkými rozměry představuje problém z pohledu skladování těchto přípravků. Vysoké požadavky na přesnost výroby se projevují v jejich ceně, a kvůli přesným prvkům a složité konstrukci je obtížná a nákladná také jejich údržba, která může být nutná z důvodu opotřebení vlivem používání.



Obrázek 10 - Rámový upínací přípravek [18]

### 3.1.2 Upínací desky

Přípravky ve formě upínacích desek se používají k upínání rozměrných dílů, jako jsou postranice a kapoty. Existují ve vertikálním i horizontálním provedení, přičemž častější jsou vertikální kvůli aplikaci principu měření dílu v pozici, v jaké se bude nacházet v hotovém automobilu. K upínacím deskám jsou dále připojovány rámové části s upínacími a opěrnými prvky. Manipulace s deskami je realizována připojením vedení tlakového vzduchu. Pod deskou vzniknou vzduchové polštáře a poté je možné s nimi pohybovat lidskou silou. Problematika skladování je obdobná jako u rámových přípravků. Samotné přípravky mají délku i 5 m a výšku kolem 2 m. Pomocné rámové a upínací prvky však znemožňují jejich uložení těsně vedle sebe. Výhodou je jejich modularita a tím pádem možnost opětovného používání.



Obrázek 11 – Upínací deska s modulárními upínkami [19]

## 3.2 Modulární upínací systémy

Kvůli požadavkům na moderní upínací systémy, jako je například jednoduchost a rychlost sestavení, rozsah možných aplikací a v neposlední řadě také skladovatelnost upínacího systému, byly vyvinuty různé způsoby řešení této problematiky od složitějších systémů vyžadujících pro sestavení průmyslového robota, až po jednoduché stavebnicové systémy s možností výběru z rozsáhlé palety příslušenství, díky kterému pokryje takový systém většinu možných aplikací.

### 3.2.1 DEA Five U-nique

Inovativní řešení na poli systémů upínání vyvinula společnost DEA patřící v současnosti pod společnost Hexagon metrology. Jedná se o samostatné sloupce, jejichž upínací body jsou přesně napolohovány měřicím strojem do pozic vypočítaných řídicím SW. Operátor pak sloupce přemístí a seřídí dle měřicího stroje, a nakonec zafixuje jejich výšku. Proti pohybu do stran jsou přípravky opatřeny silným magnetem, který je přitahuje k základně měřicího prostoru. Jelikož se finální přípravek skládá z jednotlivých na sobě nezávislých prvků, vyniká tento systém v mobilitě a možnostech skladování, které je možné řešit i různými skladovacími systémy, jako je tomu například ve Škoda Auto, kde jsou k tomuto účelu využívány skladovací věže. Polohování za pomoci stroje pak zajišťuje přesnost a vysokou opakovatelnost polohy upínacích bodů. [20]



Obrázek 12 - Systém DEA Five U-nique [20]

Právě kvůli způsobu polohování a sestavování je ale tento proces časově náročnější. Například pro díl jako je kapota automobilu se pohybuje okolo 15 minut, zatímco přesun rámového přípravku jeřábem do měřicího prostoru stroje trvá maximálně 5 minut. Důležité je také brát v úvahu maximální nosnost jednotlivých sloupů, která je u Five U-nique 250 kg [20]. Pro porovnání má obdobný systém od společnosti Witte nosnost jednoho sloupu kolem 1000 kg [21]. Dalším omezením vycházejícím z konstrukce tohoto systému je obtížnost jeho využití pro díly měřené ve vertikálních polohách. Proto je využíván především na ustavení karoserií, kapot a dílů střeš, nebo na díly, u kterých položení do horizontální polohy nezpůsobí významnou odchylku měření, jako je například vnitřní konstrukce dveří, kde takovou odchylku nepředpokládáme, nebo není pro vyhodnocení konkrétních prvků relevantní.

### **3.2.2 Alufix**

Společnost Witte Barskamp KG byla založena roku 1969 jako výrobní partner vysoce přesných dílů pro letecký průmysl. I kvůli poptávce trhu po metrologických modulárních upínacích systémech došlo k její transformaci a dnes je brána jako lídr tohoto odvětví. Společnost vyvinula svůj vlastní metrologický upínací systém s názvem Alufix. Ten se skládá z děrovaných profilů a desek a řady dalšího upínacího příslušenství, které zajišťuje pokrytí širokého rozsahu aplikací. Jedná se o stavebnicový systém s rozměrově přesnými díly, jejichž otvory jsou rozmístěny a vyrobeny přesně dle daného rastru s úzkou polohovou a rozměrovou tolerancí. Mimo zajištění opakovatelnosti sestavení to také umožňuje využití děr jako referenčních geometrií. Systém Alufix je vyráběn ve čtyřech velikostech, které je možné mezi sebou jednoduše kombinovat. [21]



Obrázek 13 - Přípravek sestavený z upínacího systému Alufix [21]

Hlavní komponenty jsou vyráběny z vysoce pevnostní hliníkové slitiny, mimo levnější varianty ECO, která je vyráběna ze slitiny s nižší pevností. Používaný materiál skýtá výhodu nízké hmotnosti, snadné obrobitelnosti a mechanické odolnosti. Díly jsou povrchově upravovány eloxováním, čímž je zvýšena jejich korozní odolnost a otěruvzdornost. Systém je k dostání ve dvou barevných provedeních: stříbrné „natural“ a černé. V roce 2022 zavedla firma eloxování do černé barvy jako výchozí povrchovou úpravu svých výrobků. Stalo se tak především z důvodu rozšíření optického měření, pro které má černá barva vhodnější optické vlastnosti, a dle společnosti harmoničtějšího zasazení přípravků do pracovního prostředí. Pro usnadnění návrhu konstrukce ze systému Alufix je na internetu volně dostupná knihovna CAD modelů všech dílů ke stažení. [21]

### 3.2.2.1 Rayco fixtures

Americká společnost Rayco, obdobně jako Renishaw, Hexagon a další firmy, přišla na trh s vlastním modulárním systémem po vzoru společnosti Witte. V tomto případě je spojování místo průchozích děr a spojovacích prvků realizováno dírami se závity, do kterých se šroubují jednotlivé konstrukční a upínací prvky, případně je možné pro spojování prvků využít normalizované šrouby. Systémy toho výrobce jsou dodávány v provedeních s palcovými i metrickými závity a v nabídce najdeme také širokou škálu příslušenství. [22]

### 3.2.2.2 Zeiss Carfit

Obdobný systém spojování upínacích prvků pomocí závitů, který v sobě kombinuje výhody na míru vyráběných přípravků s modulární a normalizovanou konstrukcí, přinesl výrobce Junker & Partner Carl Zeiss. Řešení upínání od tohoto výrobce zahrnuje několik systémů se společným názvem Carfit doplněným o označení konkrétní řady jako například CMB, CMK, CMX a podobně. Každý systém se vyznačuje jinými vlastnostmi a je zaměřen na jinou oblast použití. Detailněji je tento systém popsán v práci [23], kde je možné nalézt i porovnání se systémem Alufix.

### 3.2.3 Specializované upínací systémy pro metodu virtuálního upínání

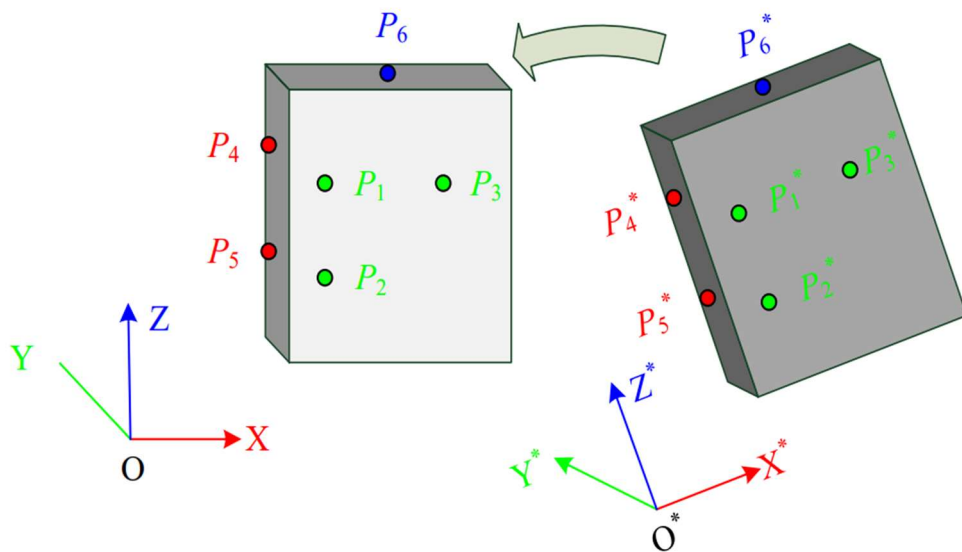
S vývojem metody virtuálního upínání začaly vznikat i řešení upínání konkrétně pro tuto metodu. Příkladem může být Poly Robot Automated Fixture System (česky více robotový automatizovaný upínací systém, zkráceně PRAFS), který vyvinula společnost Protos 3D. Jedná se o automatizovanou buňku, kde je pro upínání, nebo spíše podpírání dílů využíváno 6 průmyslových robotů. Změna systému pro měření jiné součástky se tak pohybuje v řádu sekund a není k ní potřeba žádný konstrukční zásah. Snímání dílu probíhá automaticky včetně vyhodnocení virtuálního upnutí díky specializovanému softwaru. Výhodou je možnost integrace tohoto systému do buněk Zeiss ScanBox. Omezené jsou pouze rozměry snímaného dílu dané velikostí buňky a rozsahem robotů. [24]

## 3.3 Systémy vyrovnání

Vyrovnání dílu v souřadném systému se provádí ze dvou důvodů. Prvním je vytvoření lokálního souřadného systému dílu v souřadném systému stroje, které je důležité pro správné vyhodnocení nasnímaných bodů. Vyrovnání je také klíčové při automatizovaném měření na stacionárních CMM, kdy stroj zkrátka potřebuje mít informace o tom, kde se měřený díl nachází, a tudíž kde je bezpečnostní kvádr a kde má naprogramované body snímat. Druhým důvodem je odebrání všech šest stupňů volnosti, čímž je zajištěna poloha dílu v souřadném systému. Při vyhodnocování přesnosti složitější geometrie porovnáním naměřených dat s referenčními CAD daty, které je nazýváno lokalizace nebo registrace, dochází k transformaci souřadnic dílu tak, aby odpovídaly souřadnicím referenčních dat. [25]

### 3.3.1 Standardní metoda vyrovnání

Základní metodou vyrovnání dílu odebráním 6 stupňů volnosti, která je využívána především při dotykovém způsobu měření, je pravidlo 3-2-1. To je prováděno definicí plochy, přímky a bodu na povrchu součásti, čímž je jednoznačně určen počátek souřadnicového systému a orientace součásti v něm. Prvním prvkem je plocha, která odebere 3 stupně volnosti: dvě rotace a jednu translaci. Přímka odebere jednu rotaci a translaci, tudíž 2 stupně volnosti. Nakonec bod odebere poslední stupeň, kterým je translace. Z tohoto pravidla vychází i další způsoby vyrovnání, jako například RPS. [25]

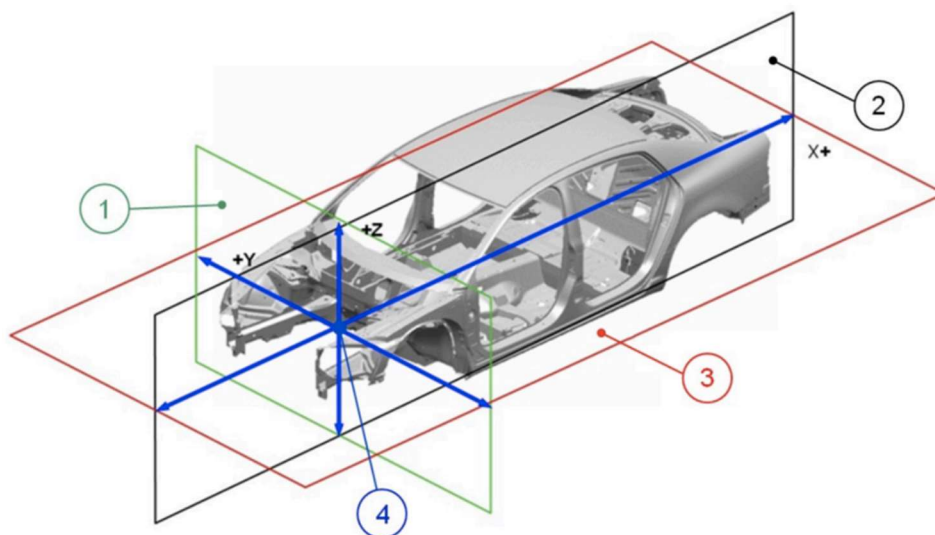


Obrázek 14 - Vyrovnání metodou 3-2-1 [26]



### 3.3.2 RPS

Systém referenčních bodů RPS (z německého Referenz-Punkt-Systematik) je používán především v koncernu Volkswagen, kde byl také zaveden normou VW 01055. Spočívá ve vytvoření souřadného systému pro celý automobil s počátkem ve středu přední osy vozidla. Systém používá běžné kartézské osy X, Y a Z, přičemž osa Z míří vzhůru a osa X od přední nápravy vzad. Souřadnice prvků na všech dílech vozu jsou vztaženy ke zmíněnému počátečnímu bodu. Ve výkresové dokumentaci je možné kótovat běžně, avšak takový výkres musí být doplněn tabulkou obsahující souřadnice polohy daných RPS bodů v globálním systému. RPS body na jednotlivých dílech slouží k odebrání všech stupňů volnosti dílu a jde o body, plochy, nebo prvky, kterými je díl polohován a ustavován v průběhu celého výrobního procesu včetně kontroly. Z toho důvodu jsou hlavní RPS body voleny tak, aby nebyla jejich poloha ovlivněna možnou vůlí a zároveň je kladen důraz na to, aby se neměnila v průběhu výrobního procesu dílu. Pro dosažení spolehlivosti procesu musí být změřena deformace poddajných dílů a stanovena její tolerance. Proto jsou využívány vedlejší RPS body korigující polohy tvarově labilních zón dílů, a tím minimalizující procesně relevantní deformace převážně ve fázi kontroly. [27]



Obrázek 15 - Globální souřadnicový systém automobilu, 1) vertikální rovina yz, 2) podélná střední rovina xz, 3) Vodorovná podélná rovina xy, 4) počátek SS [27]

RPS pozice jsou značeny číslem a dále písmeny. Jednou číslicí (1–6) jsou značeny takzvané hlavní RPS body a čísla od 101 výš, vedlejší. Číslo RPS bodů udává i postup ustavení a fixace dílu s ohledem na jeho výrobní postup a rozměrové tolerance. Velká písmena značí typ prvku a malá osu uchycení. H značí díru (z anglického hole) a F plochu (z německého Fläche). Směry fixace jsou pak dány souřadným systémem a značeny standardně x, y a z. [27]

### **3.3.3 3D připasování**

U složitějších geometrií, kde je potřeba vyhodnocení odchylek v celé ploše a využití pravidla 3-2-1 není vhodné, jsou využívány jiné způsoby vyrovnání. Nejrozšířenější metodou 3d vyrovnání je využití algoritmu iteračního výpočtu nejbližšího bodu ICP (z anglického iterative closest point), která je často nazývána best-fit. Původně tento algoritmus vypočítával iteračními procesy translace a rotace nejmenší vzdálenost mezi dvěma mraky bodů. Postupem času byly vyvinuty modifikace, které pracují i s CAD daty, nebo parametrickými sítěmi. Zarovnání na nominální model metodou nejmenších čtverců. V principu je nasnímaný povrch součásti co nejlépe zarovnán k referenční geometrii tak, aby byly celkové rozdíly povrchů minimální. [25]

## 4 Náhrada upínacího systému virtuálním upínáním

Jak již bylo zmíněno, pevné přípravky pro měření tenkostěnných plechových dílů jsou konstrukčně komplexní, náročné na výrobu, a tudíž i drahé. Navíc se z pohledu přidané hodnoty výrobku jedná o zbytečný náklad. Každý typ dílu vyžaduje přípravek vlastní. To představuje velkou překážku pro flexibilní výrobní systémy a znemožňuje nasazení takových přípravků do in-line měření. Otázkou rovněž zůstává shodnost chování dílu v přípravku s chováním dílu v zástavbě. [28]

Úpravy takových přípravků jsou velmi náročné z důvodu dodržení předepsaných přesností opěrných prvků. I přes to občas nastane situace, kdy je úprava nutná. Děje se tak především v předprodukční fázi, kdy může dojít ke změně geometrie dílu, či způsobu měření. V případě nutné úpravy přípravku v produkční fázi navíc vznikají náklady kvůli zastavení výroby. Obdobné komplikace nastávají v případě potřebné opravy přípravku, spočívající většinou ve výměně opotřebovaných částí. [29]

Jelikož jsou pevné přípravky konstruovány konkrétně pro daný díl, po skončení výrobního cyklu tohoto dílu vyvstává další problém. Dosud totiž neexistuje efektivní systém pro jejich recyklaci a jsou tak volena jakákoliv možná řešení. Přípravky nelze prodat kvůli omezení zneužití, a tak jsou buďto darovány jinému oddělení, především vývojovému, nebo zřídka kdy rozmontovány na díly.

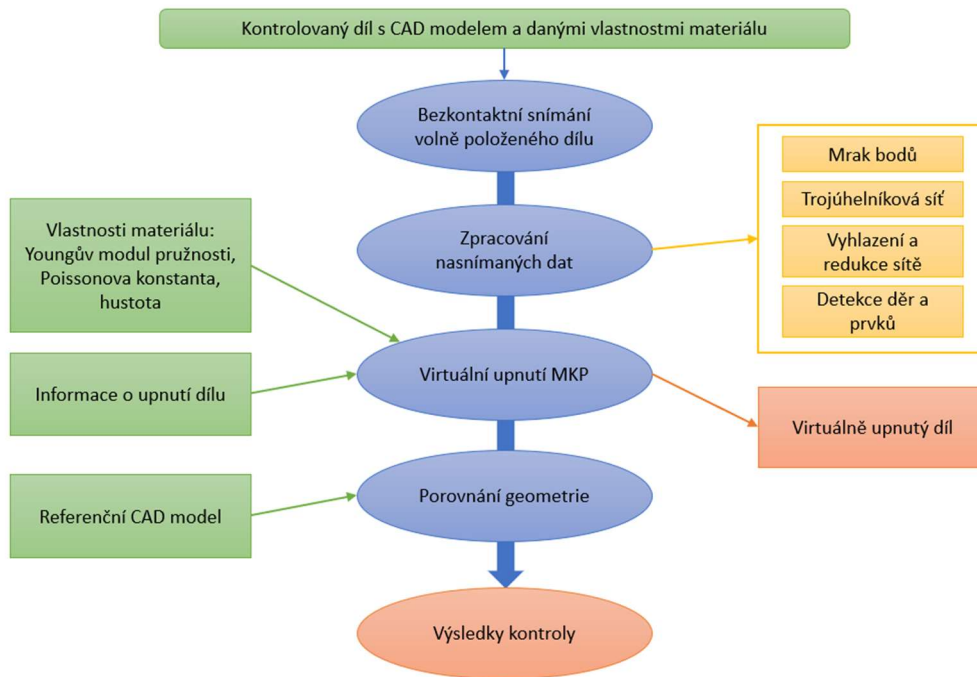
Z výše zmíněných důvodů bylo žádoucí najít alternativu k pevným přípravkům. Vývoj bezkontaktních měřicích systémů a výpočetních technologií přispěl k rozvoji postupů nahrazení mechanického upínání dílů simulací metodou konečných prvků.

### 4.1 Princip virtuálního upínání

Metoda virtuálního upínání nám umožňuje simulací metodou konečných prvků předpokládat, v jakých geometrických tolerancích se bude měřený díl nacházet po upnutí (sestavení sestavy) bez nutnosti fyzického upínání, čímž snižuje význam využití složitých přípravků v rozměrové kontrole dílů.

První komplexní využití MKP v rozměrové kontrole plechových dílů bylo představeno v literatuře [30], kde je formulována základní myšlenka VC: Nahrazení pracného upínání dílu jednoduchým položením součásti do zorného pole optického snímacího zařízení. Tato práce rovněž využívá ke snímání plechového dílu pruhovou

projekci a poukazuje na její výhody v těchto aplikacích. Navazující práce [31] tuto myšlenku dále rozvádí, ale především popisuje kompletní proces metody virtuálního upínání od sběru dat, přes jejich zpracování a samotné virtuální upínání, až po vyhodnocení výsledků porovnání deformované sítě z nasnímaných dat s referenčním CAD modelem. Uvedený postup je dodnes základem metody virtuálního upínání.



Obrázek 16 - Schéma procesu virtuálního upínání. Převzato a upraveno z [31]

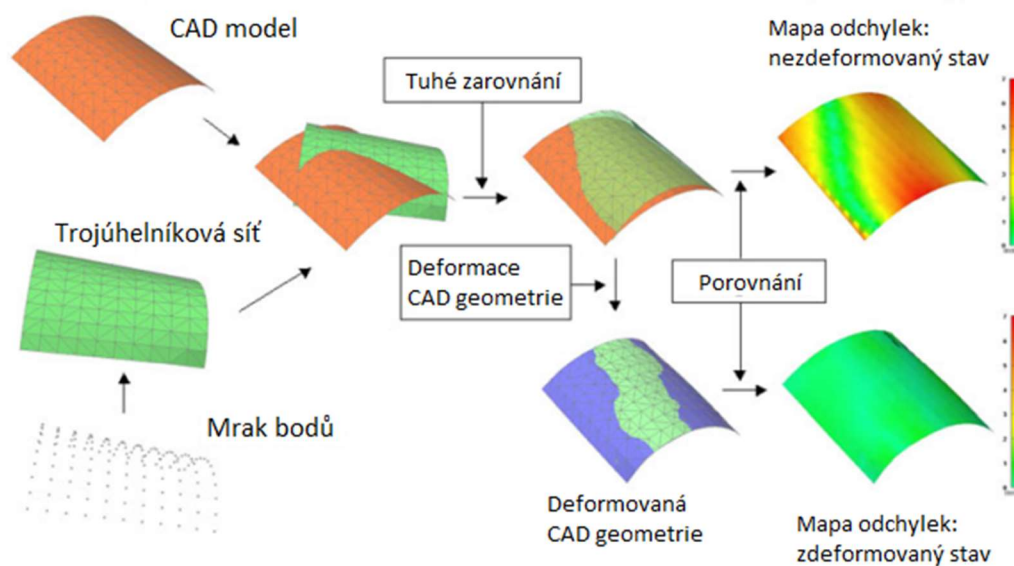
V případě rozměrové kontroly tenkostěnných plechových dílů bylo vzhledem k jejich zmíněné tvarové labilitě nutné do metody VC zahrnout gravitační působení a postup této skutečnosti přizpůsobit. Simulace virtuálního upínání je tak rozšířena o krok odlehčení nasnímaných dat od tíhového zrychlení a aplikace působení tohoto zrychlení v poloze měření ve standardním přípravku (zástavbové poloze), viz Obrázek 17.



Obrázek 17 - Postup simulace virtuálního upínání, převzato a upraveno z [32]

Práce [31] poukazuje i na možnost aplikace virtuálního upínání jako in-line kontroly, jelikož výpočet a vyhodnocení je prováděno počítačem a fyzický díl je tak nezbytný pouze po dobu snímání, která závisí na složitosti dílu a použité metodě bezkontaktního získání dat. Na tuto možnost se zaměřuje práce [33], která představuje vhodnější postup metody VC pro její efektivnější nasazení do in-line kontroly spočívající v rozdílné práci se vstupními daty.

Namísto simulace upínání nasnímaných dat, jak tomu bylo u předchozího postupu, je jako vstup do MKP simulace použita trojúhelníková síť vytvořená z geometrie nominálního CAD modelu dílu. Metodou konečných prvků není provedena simulace upínání jako takového, ale simulace volného položení dílu aplikací gravitačního zatížení. Tím je získán výstup v podobě deformované sítě jmenovité geometrie, kterou je možné porovnat s nasnímanými daty a vyhodnotit rozměrové tolerance. Přednosti tohoto postupu vychází z minimální práce s mrakem bodů, který je nutné zpracovat pouze takovým způsobem, aby mohlo dojít k jeho porovnání výstupem simulace. Využití CAD modelu jako vstupu do simulace poskytuje jednodušší práci s daty, umožňuje tvorbu sítě s libovolnými parametry, a naopak eliminuje nutnost oprav sítě a dalších kroků, které jsou potřebné v předchozím přístupu k VC. Mimo snížení nutných úkonů při zpracování dat je rapidně snížen i jejich objem. Simulaci je v tomto případě možné provést pouze jednou a její výstup poté použít pro vyhodnocení libovolného množství kusů.



Obrázek 18 – Alternativní postup VC, převzato a upraveno z [33]

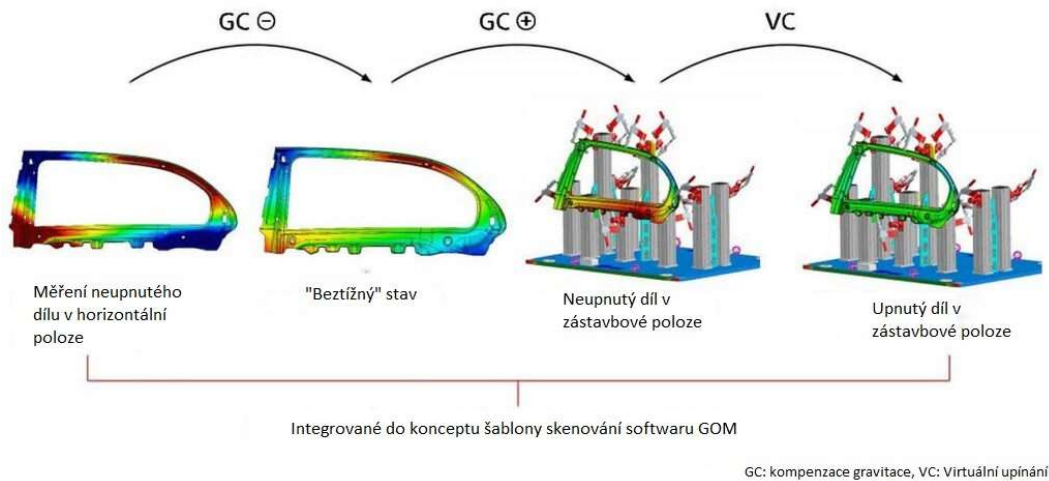
## 4.2 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP, anglicky Finite element method, zkráceně FEM) je numerická metoda používaná k řešení úloh z řady oborů, jako například mechanika tuhých těles, mechanika tekutin a fyzika, spočívající v diskretizaci spojitého kontinua do určitého počtu jednoduchých prvků a následné aproximace výsledků pro celé kontinuum na základě výpočtu úlohy pro jednotlivé elementy. Rozdělením kontinua na elementy dojde ke vzniku uzlů neboli bodů, ve kterých se setkávají vrcholy jednotlivých elementů. Výpočet poté probíhá na základě natočení a posunu uzlů. Na přesnost výsledků MKP simulací má významný vliv velikost elementů, jelikož může ovlivnit schopnost modelu správně reprodukovat reálné chování kontinua. V praxi je volba velikosti elementu ovlivněna povahou problému, typem analyzované struktury, dostupnými výpočetními prostředky a požadovanou přesností výsledku. [34]

V případě virtuálního upínání se jedná o úlohu statického namáhání, kontinuem je celý díl a elementy jsou trojúhelníkové plošky sítě STL. Z výše zmíněného vlivu velikosti plošek na přesnost simulace je věnována zvláštní pozornost tvorbě a zpracování sítě z nasnímaného mraku bodů.

## 4.3 Software

V roce 2019 představila společnost GOM funkci Virtual Clamping ve svém SW GOM Inspect. Použití této funkce a SW podrobně popisuje práce [8], ve které je také ověřena přesnost této metody. Funkce je však součástí placeného SW a její využití je podmíněno vytvořením deformačního modelu firmou GOM za poplatek 1500 euro. Přesný postup tvorby virtuálního upínání v GOM Inspect je střežené know-how, je ale známo, že pro simulaci využívá metodu konečných prvků. Proto lze obecně říct, že pro simulaci virtuálního upínání je možné využít libovolný SW zaměřený na MKP, jako například Ansys, MSC Nastran, COMSOL Multiphysics nebo Abaqus.



Obrázek 19 - Princip kompenzace gravitace a virtuálního upínání v SW GOM Inspect, převzato a upraveno z [35]

### 4.3.1 Ansys

Ansys využívá pro řešení úloh kombinaci programů, mění se podle konkrétního typu úlohy. Základem je Ansys Workbench sloužící ke tvorbě projektu a strukturování úlohy do jednotlivých kroků, který funguje na bázi schéma projektu. Projekt je pak tvořen jednotlivými dlaždicemi úloh a dalších vstupů a výstupů, které je možné mezi sebou v určité míře spojovat za účelem ovlivnění pracovního postupu projektu. Při výběru typu úlohy ze šablon dostupných v okně sady nástrojů *Toolbox* je dlaždice této úlohy, s odpovídajícími kolonkami vstupů a výstupů, vytvořena ve schématu projektu. Úkolem uživatele je poté postupné zadání vstupních dat, respektive nastavení formy výstupu, které obvykle probíhá v jiných dedikovaných programech z balíčku. Nutno dodat, že většinu těchto programů lze použít i samostatně, jelikož se jedná o plnohodnotné CAE SW.



## 5 Rekonstrukce procesu vytvoření dat pro virtuální upínání

V první praktické části této diplomové práce byl kompletně rekonstruován postup tvorby vstupních dat pro metodu virtuálního upínání. Ten spočíval v získání dat ze standardního měření v zástavbové poloze, návrh vhodného přípravku pro bezpečné uložení dílu do horizontální polohy, získání souřadnic podepření dílu v horizontální poloze dotykovým měřením přípravku, sken dílu v horizontální poloze pro vytvoření modelu jeho povrchu a následné zpracování takto získaných dat, aby mohla být použita pro MKP simulaci metody virtuálního upínání.

### 5.1 Díl pro ověření metody virtuálního upínání

Pro ověření metody virtuálního upínání byl vybrán zkušební díl reprezentující levý blatník. Tento díl byl vybrán společností Škoda Auto a.s. jako ideální představitel tenkostěnného plechového dílu, jelikož má vhodnou velikost pro manipulaci a jeho součástí jsou jak větší plochy, tak i menší prvky pro montáž a podobně. Díky tomu bylo možné ověřit metodu virtuálního upínání u ploch i složitějších geometrií zároveň.



Obrázek 20 - Zkušební díl upnutý ve standardním rámovém přípravku

## 5.2 Dotykové měření dílu ve standardním přípravku

Pro detailní zmapování problematiky standardních přípravků byl díl nejprve změřen přímo ve Škoda Auto dle současného postupu. Měření probíhalo na CMM DEA Bravo HA v měrovém středisku C14. Hned v úvodu měření se projeví nedostatky pevných přípravků. Ukázala se například obtížnost vkládání dílu do tohoto přípravku, při kterém nesmí dojít k poškození nebo deformaci dílu, a je tak vyžadována vyšší zručnost operátora. Občas se navíc stává, že jsou pákové upínky opotřebené vlivem používání a operátor musí jejich požadovaný přítlak dodatečně mechanicky nastavit. Před samotným měřením je přípravek ustaven do souřadnicového systému stroje dotykovým snímáním tří referenčních koulí podobných kalibračním koulím pro CMM. Následně je provedeno vyrovnání RPS. Hlavní RPS jsou snímány pro kontrolu správného upnutí dílu do přípravku. Vedlejší RPS slouží, jak již bylo zmíněno v kapitole 3.3.2, ke korekci tvarově labilních zón a jejich poloha je tolerována na  $\pm 0,2$  mm. V praxi to znamená, že je v těchto místech přípravek opatřen stavitelným prvkem s fixací. Stroj sejme polohu vedlejšího RPS a zobrazí jeho odchylku v daném směru. Operátor poté, pokud je to nutné a odchylka přesáhne toleranci, upraví posunutí stavitelného prvku tak, aby se při dalším zaměření vedlejšího RPS bodu pohybovala odchylka v předepsané toleranci. Reálně je snaha přiblížit odchylku co nejvíce k nulové hodnotě, což však může být časově náročné.

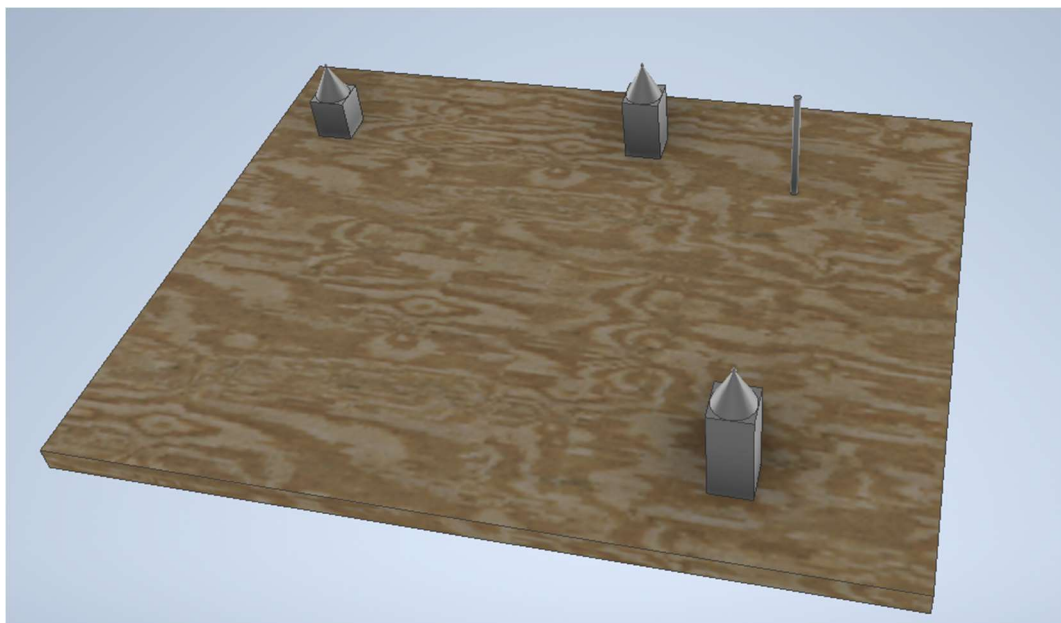


Obrázek 21 - Hala měrového střediska C14 v závodu Škoda Auto Mladá Boleslav [8]

Po provedení zmíněných úvodních kroků následuje samotné měření dílu. To probíhá automaticky dle vytvořeného plánu měření. Celkem zabralo dotykové měření okolo 40 minut i s počátečním vyrovnáním přípravku a korekcí vedlejších RPS. V průběhu se stroj jednou zastavil z důvodu lokální deviace geometrie dílu, kterou stroj vyhodnotil jako kolizi. Operátor tento problém odstranil s využitím manuálního posuvu. Výstupem měření byl protokol dle interního standardu s vyhodnocenými odchylkami v měřených bodech.

### 5.3 Přípravek pro snímání dílu v horizontální poloze

Metoda virtuálního upínání z principu nahrazuje standardní způsob upínání co nejjednoduššími přípravky, na kterých je díl volně položen bez další fixace. Takový přípravek musel být navržen i pro tuto diplomovou práci. Navrhl jsem přípravek viz Obrázek 22, který měl být následně sestaven z komponent vyrobených pomocí technologií dostupných na Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie Fakulty strojní ČVUT. Mnou navržený přípravek se skládal ze tří podpěrných bodů a jedné opěrné tyčky. Jejich poloha respektuje souřadnice hlavních RPS bodů daného dílu. Při zpracovávání měření jsem však narazil na několik nedostatků mnou navrženého přípravku. Jedná se především o nedostačující počet opěrných tyček, které musí být minimálně 3, abychom byli schopni co nejpřesněji zajistit požadovanou polohu dílu.



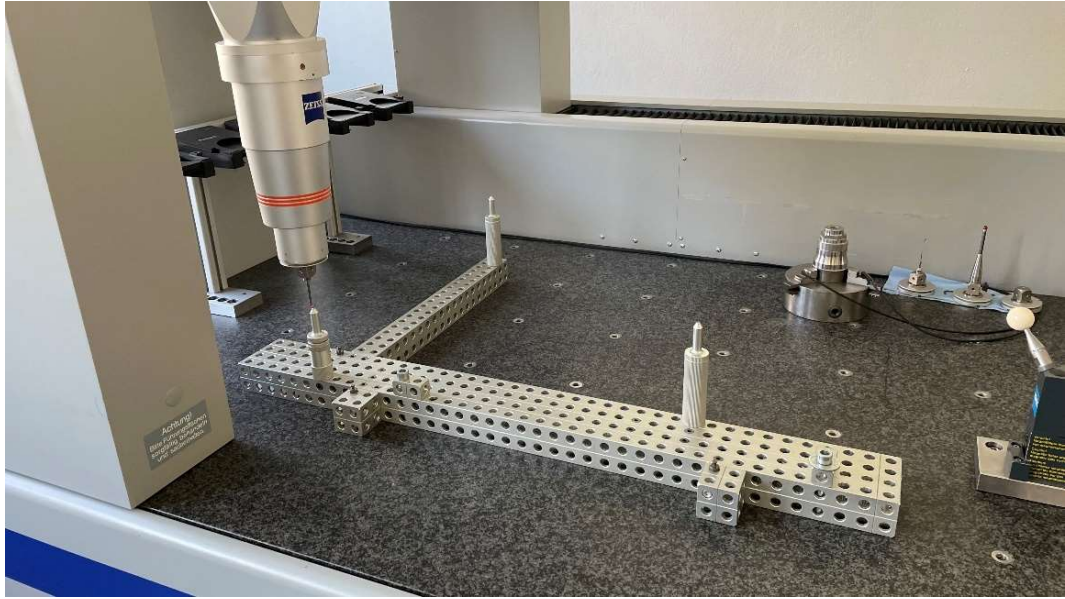
Obrázek 22 – Návrh přípravku

Z toho důvodu a dalších překážek, které se při konstrukci přípravku objevily, bylo v rámci projektu VC rozhodnuto o hledání alternativního řešení. Díky plné podpoře společnosti Škoda Auto a.s. byl zapůjčen přípravek složený z modulárního upínacího systému Alufix (viz kapitola 3.2.2), který je vyfocen na Obrázek 23. Tento přípravek je ve společnosti Škoda Auto a.s. používán na obdobné aplikace. Přípravek je složen z podstavy tvořené standardními profily systému Alufix AF 25, tří podpěrných sloupků zakončených kulovým vrchlíkem o průměru 6 mm a tří opěrných tyček o průměru 5,9 mm.

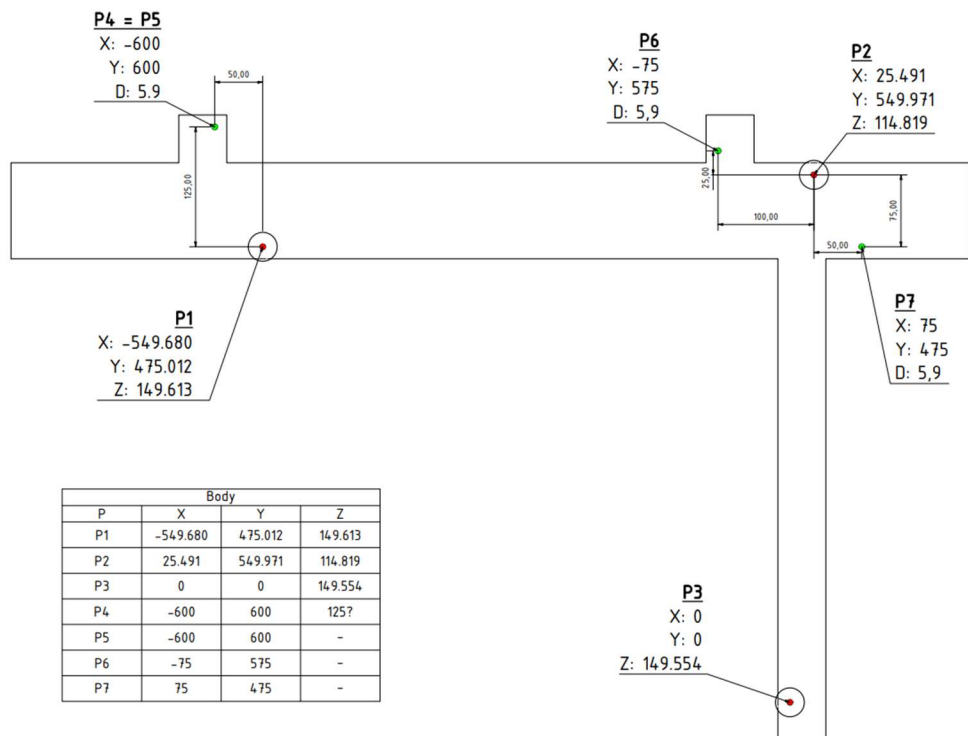


*Obrázek 23 - Přípravek složený ze systému Alufix*

Před samotným skenem dílu jsem změřil přípravek na CMM Zeiss Carat UPMC 850, abych získal přesnou polohu podpěrných bodů pro pozdější nastavení vstupních podmínek simulace. Přípravek byl při měření připevněn šrouby do závitových vložek v granitové desce stolu stroje a vyrovnán metodou 3-2-1 s využitím jeho podstavy. Jako nulový bod jsem v osách X a Y zvolil jeden z podpěrných bodů a v ose Z horní plochu podstavy přípravku. Pro vyšší přehlednost naměřených souřadnic jsem získané hodnoty zanesl do výkresu (viz Obrázek 25) vytvořeného v programu Autodesk Inventor. Poloha opěrných tyček nebyla součástí dotykového měření z důvodu udávané přesnosti a opakovatelnosti systému Alufix, která je dostačující pro můj případ a případná obsluhou vnesená nepřesnost polohování při uložení dílu je mnohem větší, než je udávaná přesnost stavebnicového systému.



Obrázek 24 – Měření přípravku



Obrázek 25 – Výkres přípravku s naměřenými souřadnicemi podpěrných bodů

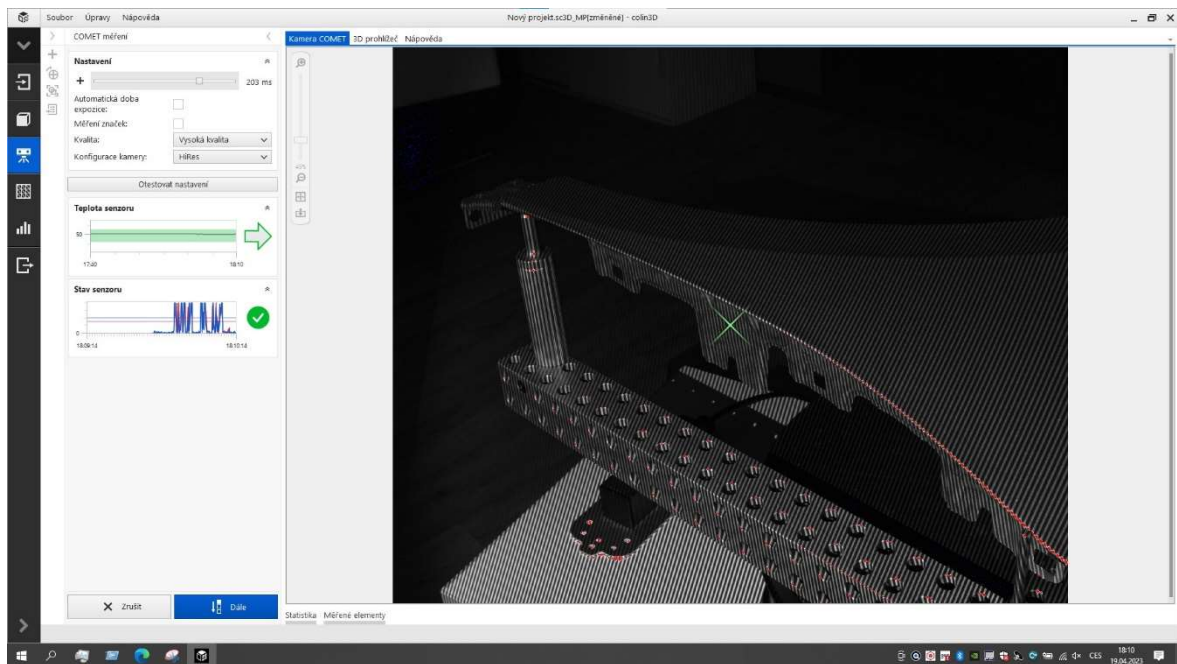
## 5.4 Digitalizace dílu

Díl byl na Alufix přípravku digitalizován zařízením Zeiss Comet L3D 2 5M osazeným objektivem 5M 500, který disponuje největším zorným polem ze sady dodávaných objektivů. V této konfiguraci měla sestava parametry uvedené v následující tabulce.

*Tabulka 1 - Parametry použité konfigurace zařízení Zeiss Comet L3D 2*

Parametr	hodnota	jednotky
Rozlišení	2448x2050	px
Měřicí objem	481x404x250	mm
3D vzdálenost měřených bodů	196	μm
Pracovní vzdálenost	760	mm

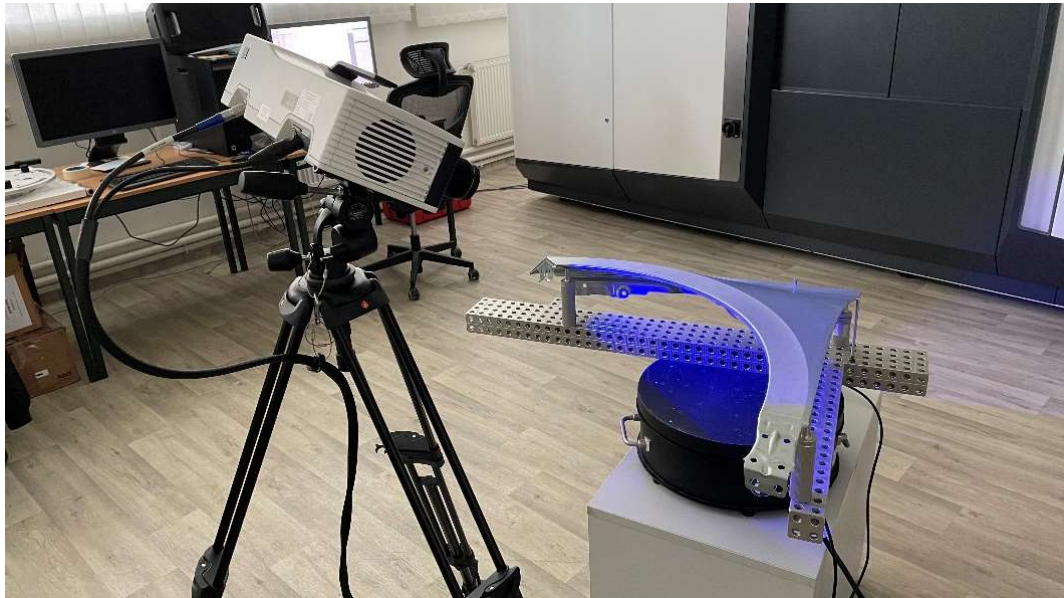
Před samotným měřením bylo nutné provést kvalifikaci konfigurace projektoru a snímače, která je prováděna automaticky s pomocí referenčních bodů na otočném stole. Tuto konfiguraci není možné v průběhu měření měnit. Po kvalifikaci snímače jsem přípravek umístil na otočný stůl, který je rovněž standardním příslušenstvím zařízení Zeiss Comet. Na přibližně umístěný přípravek jsem uložil díl a zarovnal ho pomocí opěrných tyček. Snímací zařízení jsem poté napolohoval na trojnožce tak, aby projektor při rotaci stolu postupně osvítil celou boční (v horizontální poloze vrchní) plochu blatníku. Při měření je zařízení Zeiss Comet statické a pohyb provádí snímáný objekt rotací otočného stolu. Natočení lze ovládat posuvníkem v řídicím SW, čímž je umožněno ověřit všechny úhly natočení, ve kterých se bude díl nacházet při automatizovaném snímání. Napolohování trojnožky a přípravku na otočném stole bylo obtížnější z důvodu tvaru a rozměru blatníku a tvaru přípravku kopírujícího tvar dílu. Těžiště přípravku s dílem se proto nacházelo mimo tuto sestavu. Některé části navíc výrazně přesahovaly hranu stolu a při jeho natočení se dostaly příliš blízko snímače nebo dokonce mimo jeho zorné pole.



Obrázek 26 - Pohled do prostředí SW Zeiss Colin 3D se záběrem snímaného dílu. Zelený kříž značí střed zorného pole snímače, Červená barva signalizuje přeexponovaná místa

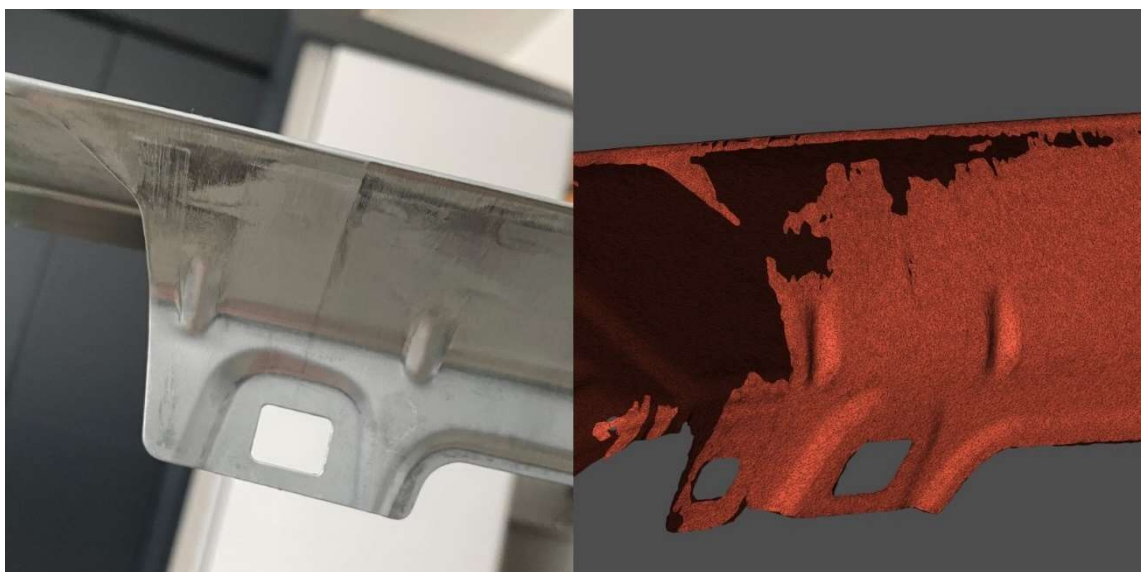
Po několika úpravách výšky a polohy trojnožky se zařízením Comet, polohy přípravku na otočném stole a nastavení doby expozice byl systém připraven k automatickému měření, které probíhá snímáním v krocích. V jednom kroku je stůl pootočen o nastavený počet stupňů a následně proběhne sběr dat všech nasvícených bodů v zorném poli snímače. Takto zařízení pokračuje dalšími kroky, dokud stůl nevykoná jednu kompletní rotaci. V ideálním případě je tímto snímání kompletní a uživatel může přistoupit ke zpracování naměřených dat. V mém případě tomu tak nebylo, jelikož nedošlo k nasnímání celého dílu. Snímání automatickým skenováním jsem totiž zaměřil primárně na největší plochu dílu, kde byla požadována nejvyšší přesnost a kvalita dat, a zároveň bylo možné automaticky nasbírat data z co možná největší části dílu. Proto byla potřeba ohyby a další boční plochy naskenovat dodatečně, přičemž bylo pro každé další snímání nutné systém znovu napolohovat pomocí trojnožky a rotace stolu, někdy i opakovaně. Data z každé další polohy nedokáže řídicí SW automaticky přiřadit k datům z automatického měření, protože o této poloze nemá žádné informace. Propojení mraků bodů proto probíhá ručně. Uživatel zvolí tři libovolné body na datech z předchozích snímání a k nim poté vybere přibližně odpovídající body z mraku bodů z nového snímání. SW poté sám pomocí algoritmů tato data propojí. V případě neúspěšného propojení je nutné vybrat body znovu a pokus opakovat. Stejně tak je tomu v případě, kdy uživatel pohledem vyhodnotí propojení jako nedostatečně přesné. Při výběru bodů je také možné

oříznout část dat, nesouvisejících se snímaným objektem, posuvem roviny, která rozděluje prostor na dvě části. Tato dělicí rovina je vytvářena i při automatizovaném měření a veškeré body ležící pod touto rovinou jsou ignorovány. Tímto způsobem jsem provedl kompletní snímání celého dílu. Celkem zabral sběr dat přibližně 3 hodiny.



Obrázek 27 - Zeiss COMET L3D 2 s otočným stolem

Problematickými se ukázaly být lesklé plochy vzniklé lisováním plechu. Ty se nepodařilo nasnímat při žádné kombinaci orientace snímacího zařízení vůči dílu a doby expozice. Vliv na proces snímání mělo také denní světlo, na kterou je tato metoda citlivá.



Obrázek 28 - Příklad problematického místa s odpovídající vadou nasnímaných dat



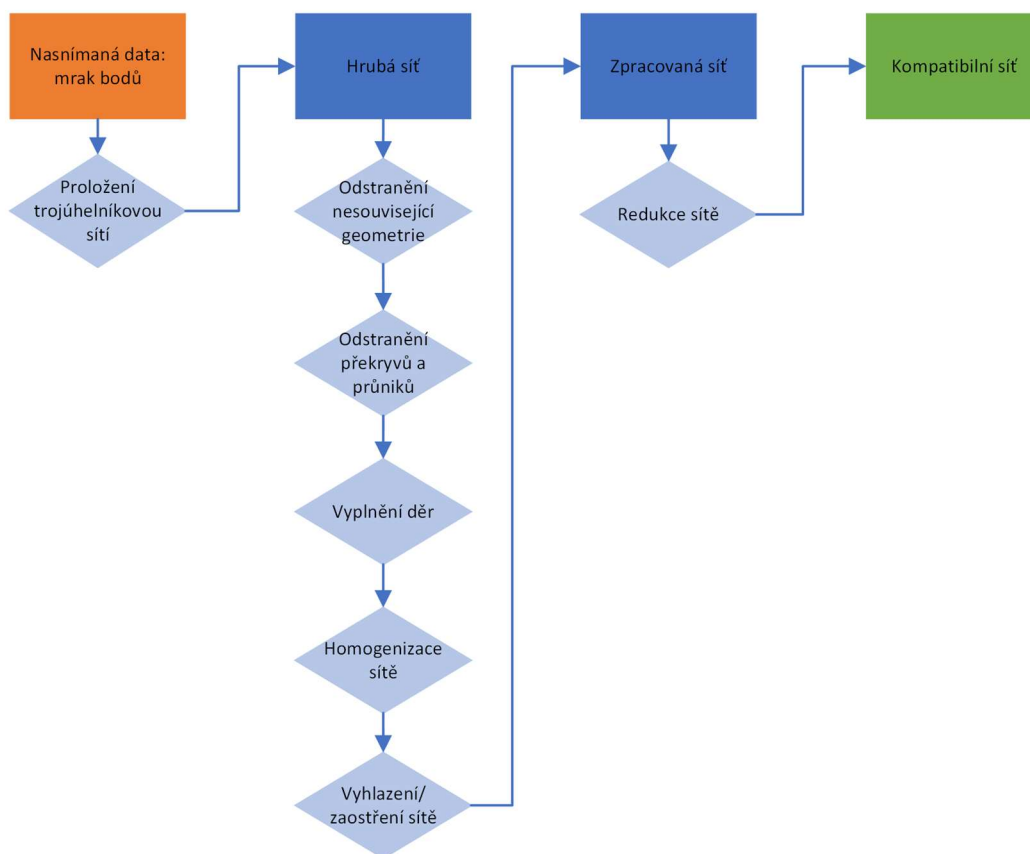
## 5.5 Zpracování dat

Měření a následné zpracování dat proběhlo v SW Zeiss Colin 3D, který je zároveň ovládacím programem pro zařízení Comet. V rozhraní tohoto programu nalezneme nástroje pro řízení a nastavení snímače i otočného stolu, tvorbu a opravu sítě z mraku bodů a vyhodnocení v podobě porovnání s nominálním modelem.



*Obrázek 29 - Mrak bodů nasnímaný zařízením Zeiss COMET L3D 2*

Nasnímaný mrak bodů jsem zpracoval v několika krocích. Schéma postupu zpracování naměřených dat je zobrazeno na obrázku Obrázek 30. Prvním krokem bylo proložení mraku bodů parametrickou sítí. Ta spočívá v propojení jednotlivých bodů trojúhelníkovými ploškami. Vzniklou síť je možné exportovat jako soubor stl, se kterým lze lépe pracovat než s hrubými daty v podobě mraku bodů, a navíc je kompatibilní se širokým spektrem softwarů. V úpravách této sítě jsem pokračoval v rozhraní programu Zeiss Colin 3D.



Obrázek 30 - Schéma postupu zpracování nasnímaných dat

Důležité bylo pečlivé odstranění částí sítě, které nepatřily do geometrie dílu. Jednalo se především o části přípravku, které nebylo možné vynechat pomocí dělicí roviny zmíněné v předchozí kapitole. Hrubé odstranění jsem provedl výběrem celých těles v případě, že je SW správně oddělil od geometrie dílu. Zbývající nežádoucí části sítě jsem odstranil za pomoci takzvaného laso výběru. Při finálním začištění sítě bylo občas nutné vybírat jen samostatné plošky. Obdobný postup jsem provedl i v případě odstraňování duplicitních hodnot s tím rozdílem, že jsem využil filtr pro detekci těchto vad.

K vyplnění děr je v SW Colin k dispozici samostatný nástroj. Mimo nastavení režimu vyplňování a navigátoru mezi jednotlivými detekovanými otvory obsahuje tento nástroj také funkci automatického vyplnění všech detekovaných děr s možností zadání maximálního průměru otvorů k vyplnění.

Homogenizace trojúhelníkové sítě spočívá v jejím opětovném vygenerování tak, aby byla hustota nově vzniklé sítě co nejvíce rovnoměrná. Rovnoměrnější síť neobsahuje zbytečně zhuštěná místa vzniklá již při procesu měření. Takto upravená síť pak při využití v MKP simulaci dosahuje ve všech oblastech stejné přesnosti výpočtu. Z toho důvodu disponují pokročilé MKP programy funkcí pro adaptivní tvorbu sítě, která její hustotu řídí například dle předpokládaných kritických míst, kde jsou obvykle požadovány výsledky přesnější. Jelikož jsou však nástroje v SW Colin 3D určeny hlavně pro snadnou a rychlou tvorbu sítě výchozí pro další zpracování, adaptivní síťování se mezi nimi nenachází.

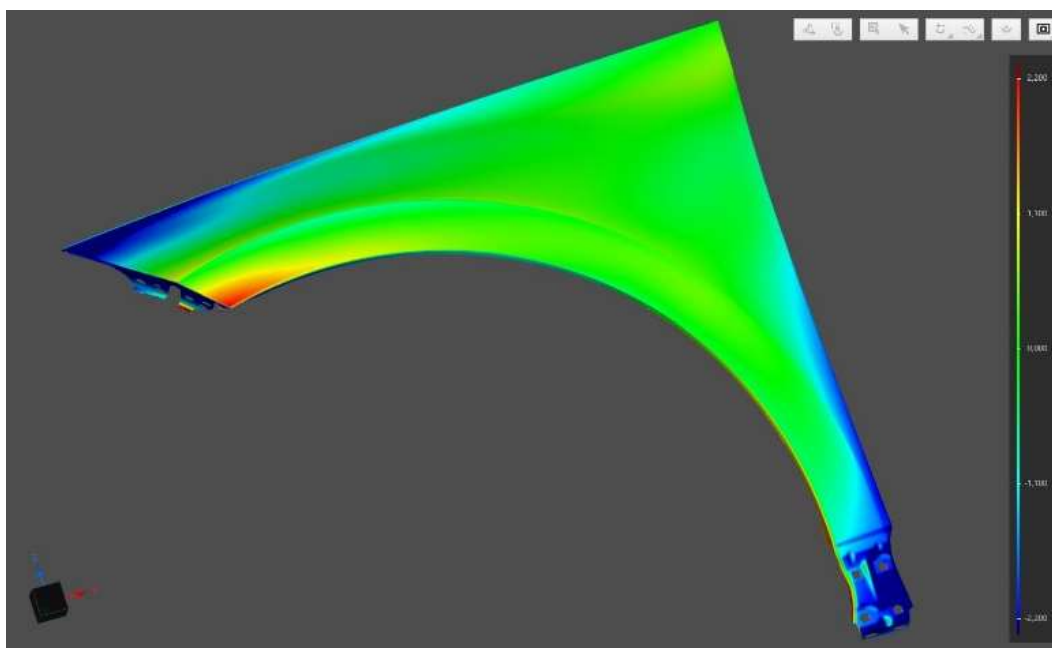
Volitelným krokem při úpravě sítě je její vyhlazení, či zaostření, které je využíváno spíše v případech kdy jsou nasnímaná data součástí procesu reverzního inženýrství a výsledná síť je určena například k výrobě aditivními technologiemi. Jak již z názvu vyplývá, tato funkce zaobluje, respektive zostřuje hrany a přechody mezi plochami.

Výsledkem předešlých kroků je rovnoměrná trojúhelníková síť bez děr a nežádoucích geometrií. Zejména pro využití v MKP simulacích je zásadní další parametr, kterým je objem dat, respektive velikost souboru stl, která je dána především počtem uzlů a plošek tvořících geometrii. Funkce redukce sítě umožňuje dosáhnout na základě vstupních parametrů, jako je maximální chyba, maximální délka hrany trojúhelníků a jejich minimální počet, snížení výsledného objemu dat, a tím i velikosti souboru stl. V následující tabulce jsou pro porovnání uvedeny výsledky jednotlivých redukcí. První redukce byla řízena počtem elementů a byla provedena pouze pro znázornění vlivu redukce na výslednou velikost souboru. Tento parametr totiž není pro MKP příliš relevantní, jelikož nevypovídá o velikosti elementů, která výrazně ovlivňuje přesnost MKP simulace. Druhá redukce byla řízena parametrem maximální chyby, který byl nastaven na 0,1 mm. Byla také nastavena maximální délka hrany na hodnotu 2 mm. Výsledné střední hodnoty byly pro délku hrany 0,527 mm a chyby 0,004 mm. Třetí redukci jsem provedl s cílem co nejmenší velikosti výstupního souboru s hodnotou parametru maximální délky hrany 4 mm, s tím, že pro efektivní využití v simulaci virtuálního upínání je výsledná síť příliš nepřesná.

Tabulka 2 - Porovnání parametrů sítí dle úrovně zpracování

Stav sítě	Počet uzlů [-]	Počet elementů [-]	Velikost souboru stl [MB]
Bez oprav	10 453 323	3 484 441	170
Bez redukce	8 092 785	2 697 595	132
Po první redukci	7 500 000	2 500 000	122
Po druhé redukci	6 602 253	2 200 841	107
S maximální redukcí	260 763	86 921	4

Zpracování dat do stavu použitelného pro MKP simulaci trvalo přibližně 4 hodiny, přičemž nejvíce času zabralo odstraňování nežádoucích elementů. Po zpracování jsem síť porovnal metodou best-fit s nominální CAD geometrií pomocí funkce integrované v programu Zeiss Colin 3D. Výsledek tohoto porovnání je na Obrázek 31. Jak je z výsledků patrné, pouze působení gravitace vneslo do dílu podepřeného ve třech bodech deformaci až  $\pm 2,2$  mm. Přesnost tohoto výsledku je však ovlivněna výrobní nepřesností dílu a její význam je tedy pouze demonstrativní

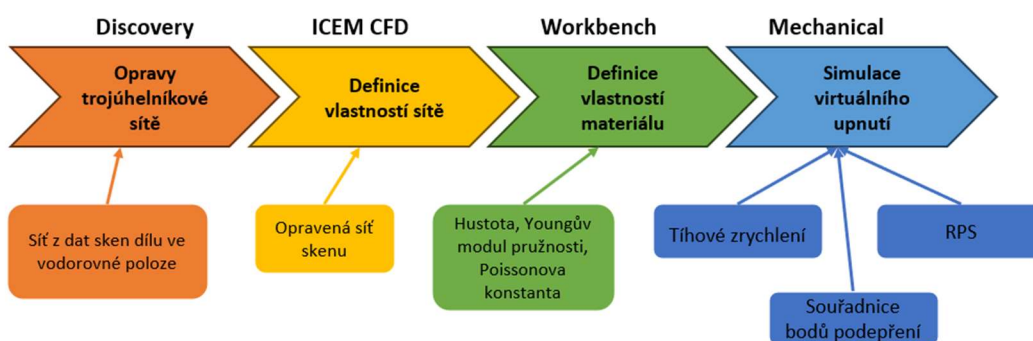


Obrázek 31 – Barevná mapa odchylek best-fit porovnání zpracovaných nasnímaných dat s referenčním modelem dílu

## 6 Virtuální upínání v SW Ansys

Pro studovaný případ zkušební dílu blatníku z výrobního portfolia společnosti Škoda Auto a.s. byla v této části diplomové práce vytvořena simulace virtuálního upínání metodou konečných prvků v SW od společnosti Ansys Inc. V simulaci virtuálního upínání jsem postupoval dle „standardního“ postupu, při kterém je deformována síť vytvořená z dat dílu naskenovaných v horizontální poloze na jednoduchém přípravku bezkontaktními snímacími metodami.

Celkově jsem pro úlohu virtuálního upínání využil 4 programy z balíčku SW. V programu Discovery jsem provedl opravy sítě, Workbench tvořil kostru celého projektu, ICEM CFD jsem použil pro úpravu vlastností sítě a v programu Mechanical jsem provedl samotnou simulaci. Role jednotlivých programů a jejich stručný popis je rozepsán v dalších podkapitolách kapitolách.

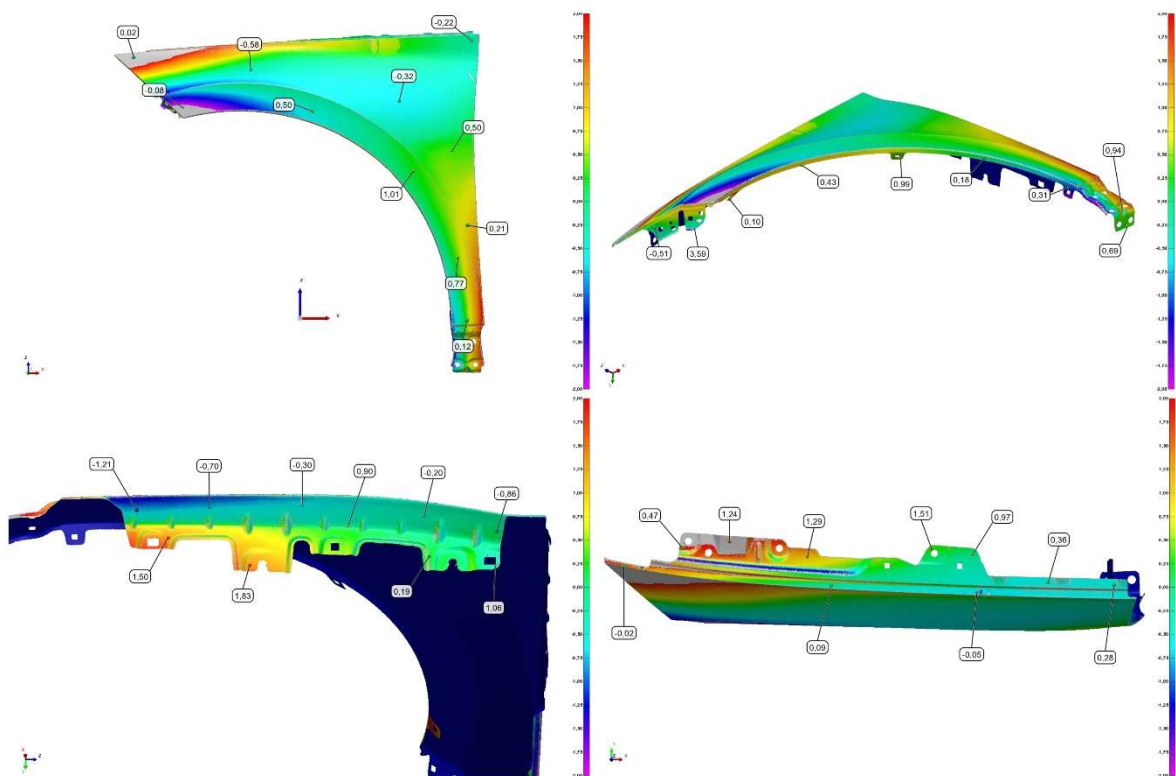


Obrázek 32 - Role jednotlivých SW z balíčku Ansys

V následujících podkapitolách jsou pro názornost mimo českých ekvivalentů uvedena a používána i původní anglická označení prvků a funkcí SW Ansys. V textu jsou tyto názvy rozlišeny kurzívou.

## 6.1 Použitá data

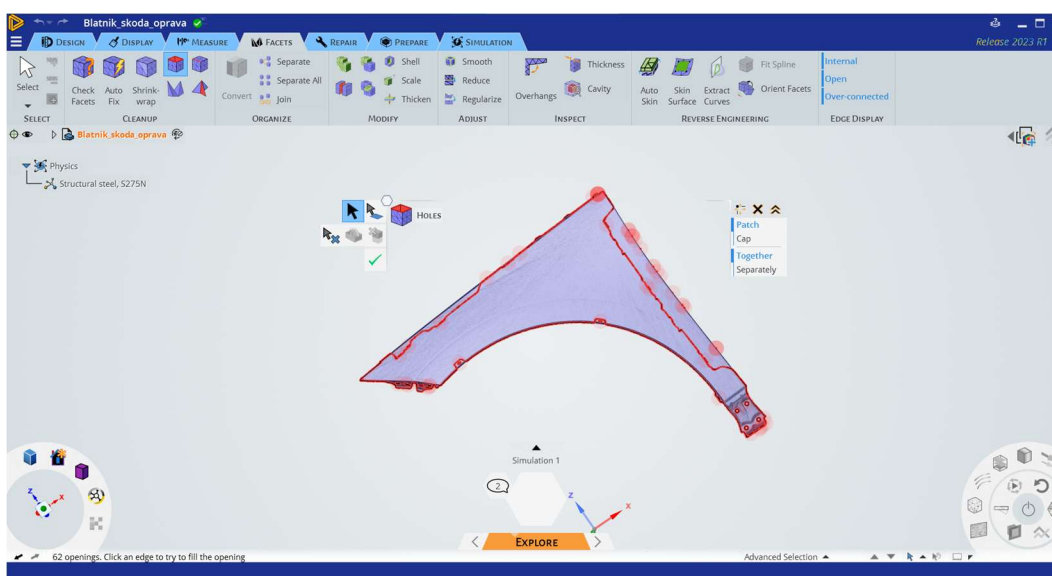
V projektu simulace virtuálního upínání jsem využil soubor STL od společnosti Škoda Auto a.s., který byl vytvořen nasnímáním zkušební dílu laser scannerem. Při snímání byl díl položen na stejném přípravku ze systému Alufix, který je popsán v kapitole 5.3. Naměřená data byla zpracována v programu Polyworks proložením trojúhelníkovou sítí a úpravou montáží otvorů pomocí přednastaveného makra. Otvory měly po této úpravě přesnou velikost a rovné hrany bez otřepů. Poskytnutá data jsem použil z důvodu širších možností vyhodnocení přesnosti výsledků metody virtuálního upínání, jelikož měl dodavatel k dispozici i sken konkrétního dílu ve standardním rámovém přípravku. Odchytky vstupních dat od dat skenu dílu ve standardním přípravku vyjadřují ve vyhodnocení výsledků simulace výchozí stav.



Obrázek 33 - Porovnání dat ze skenů na standardním a Alufix přípravku

## 6.2 Discovery

Dodanou síť jsem vzhledem k jejímu stavu upravil v programu Ansys Discovery. Při této úpravě jsem nezasahoval do velikosti elementů, ani hustoty sítě. Provedl jsem pouze její opravy nástroji zacelení děr, detekce přeurených uzlů a detekce ostrých odchylek obsaženými v tomto programu, aby tyto defekty nemohly ovlivnit výsledek simulace.



Obrázek 34 - Rozhraní programu Ansys Discovery s ukázkou nástroje na zacelení děr

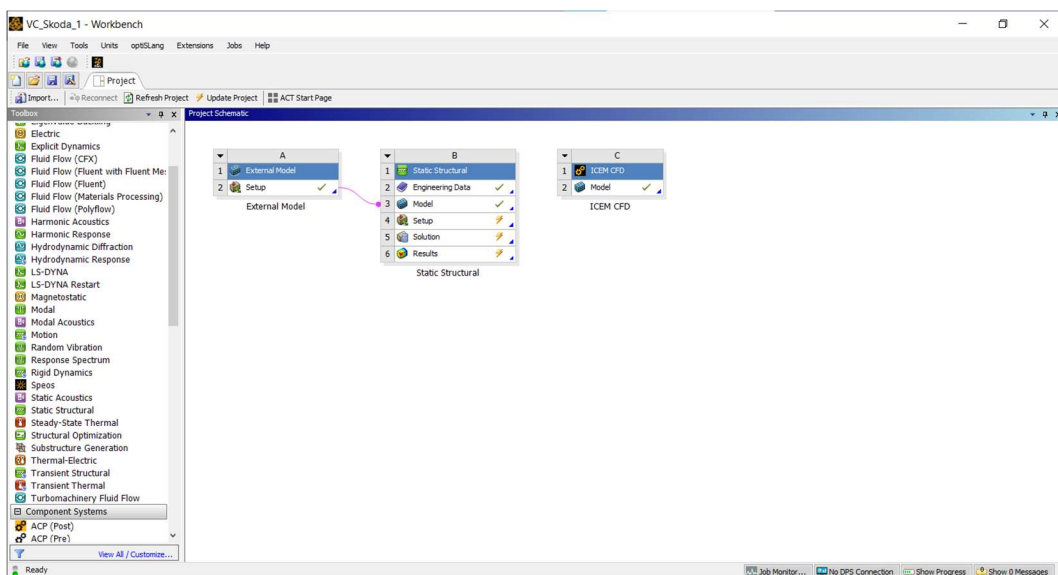
## 6.3 Workbench

Výchozím programem celého projektu byl Ansys Workbench. V jeho rozhraní jsem založil projekt statického namáhání pomocí šablony *static structural*. Ve vytvořeném projektu se zobrazilo 6 řádků pro zadání vstupních dat v dané posloupnosti.

Prvním vstupem bylo zadání vlastností materiálu dílu do řádku *Engineering data*. Poklepáním na tuto kolonku se otevřela záložka s přednastavenými hodnotami pro obecný materiál *structural steel*. Pro mojí simulaci byly rozhodujícími parametry hustota materiálu, Youngův model pružnosti a Poissonova konstanta. Podle potřeby jsem tyto hodnoty upravil a zvolil jejich jednotky.

Následovala kolonka definice geometrie *geometry*, kde jsem zvolil možnost *new SpaceClaim geometry*. Tím došlo ke spuštění programu SpaceClaim, do kterého jsem importoval dodaný soubor STL. Po jeho načtení bylo možné provést dodatečné opravy a modifikace sítě, které už ale nebyly potřebné, jelikož jsem je provedl předtím v programu Discovery (kapitola 6.2).

Další částí úlohy statického namáhání byl *model*, ve kterém měl být spuštěn program Mechanical, kde mělo dojít ke kompletní definici simulace a souvisejících okrajových podmínek. Jelikož ale při tomto postupu SW nedokázal převést síť skenu do prostředí programu Mechanical a několikrát selhal, bylo nutné zvolit alternativní řešení. Později jsem zjistil, že problémem nejsou nedokonalosti sítě, jako roztřepené okraje a podobně, ale skutečnost, že soubor STL obsahoval pouze čelní plochy, a program tak vnímal lem blatníku jako díru, kterou se snažil uzavřít a vytvořit objemové těleso.

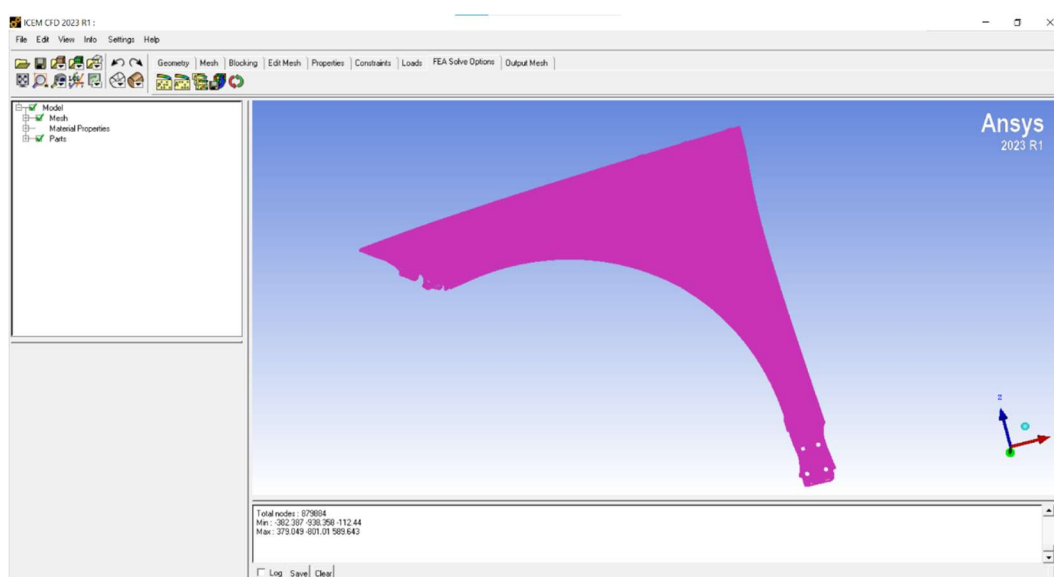


Obrázek 35 - Náhled projektu v programu Ansys Workbench



## 6.4 ICEM CFD

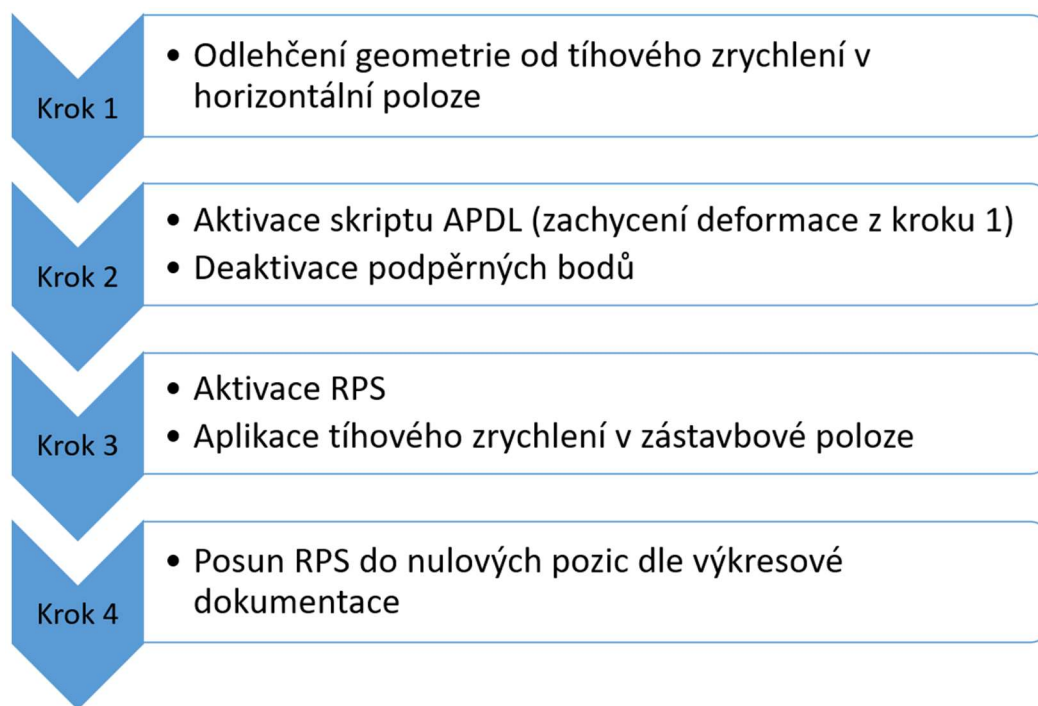
Jako řešení toho problému mi byl navržen alternativní způsob importu dat do projektu static structural. Ten spočíval v použití programu ICEM CFD, kam jsem importoval síť, definoval vlastnosti materiálu, a tloušťku stěny dílu. Síť s takto definovanými parametry jsem poté vyexportoval ve formátu ipn nativním pro SW Ansys. Ve Workbench bylo poté nutné založit úlohu *external model* a propojit jí s částí *model* projektu *static structural*. Do této úlohy jsem poté nahrál soubor ipn, zvolil *Application source*, jednotky geometrie a vypnul funkci *Check valid blocked CDB file*. Vypnutí této funkce bylo zásadní pro úspěšné dokončení kroku importu geometrie.



Obrázek 36 - Rozhraní programu Ansys ICEM CFD

## 6.5 Mechanical

Poté bylo možné přistoupit k definici samotné simulace, která probíhala v programu Ansys Mechanical. Po jeho otevření již byla připravena síť dílu pro další práci. Nejprve bylo nutné provést obecné nastavení simulace, a to především počet kroků. Ten dovoluje měnit hodnoty okrajových podmínek v průběhu simulace v závislosti na aktuálním kroku, případně tyto podmínky deaktivovat. Podle předem připraveného postupu, vycházejícího z postupu uvedeného v kapitole 4.1, jsem rozdělil simulaci do 4 kroků, které jsou podrobněji rozepsány na následujícím obrázku.



Obrázek 37 - Popis jednotlivých kroků simulace v programu Ansys Mechanical

### 6.5.1 Definice okrajových podmínek

Po nastavení kroků následovala definice okrajových podmínek simulace. Nejprve jsem podle naměřených souřadnic podpěrných bodů přípravku vybral uzly odpovídající polohy a vytvořil *named selection* (pojmenovaný výběr) pro každý bod. Poté jsem jako *named selection* vytvořil i všechny RPS plochy výběrem uzlů v oblastech odpovídajících výkresové dokumentaci. Následovala fixace zmíněných pojmenovaných výběrů vytvořením vstupu *displacement* (posunutí). Ten umožňuje posunutí vybraných uzlů buď podle směrového vektoru, nebo podle složek XYZ souřadného systému. V mém případě, kdy byla tato funkce použita, aby zabránila vybraným uzlům v pohybu při působení tíhového zrychlení, jsem nastavil všem podpěrným bodům do pole pro složku v ose Y hodnotu 0. Jelikož bylo nutné odebrat dílu všechny stupně volnosti a využití opěrných tyček nedávalo z důvodů charakteristiky jejich funkce smysl, využil jsem pro odebrání zbylých stupňů volnosti podpěrné body. Bodu P2 (viz Obrázek 25 – Výkres přípravku s naměřenými souřadnicemi podpěrných bodů) jsem nastavil nulovou hodnotu i pro složky X a Z a bodu P3 pro složku X. Všechny podpěrné body tak odebírali posun v ose Y a rotaci kolem os X a Z, bod P2 navíc posun v osách X a Z a bod P3 rotaci kolem osy Y.

## 6.5.2 Tíhové zrychlení

Ansyes poskytuje pro zjednodušení definice vstupních podmínek funkci *standard earth gravity* (standardní zemská gravitace). Ta, jak už z názvu vyplývá, aplikuje ve vybraném směru působení přesnou hodnotu zrychlení v gravitačním poli Země. Tato funkce však nebyla využita z důvodu nemožnosti změny směru, nebo úplné deaktivace působení tíhového zrychlení v průběhu simulace, které bylo proto nastaveno jako obecné zrychlení vstupem *acceleration*. Do tohoto vstupu jsem zadal hodnotu tíhového zrychlení pro Českou republiku zaokrouhlenou na  $9,81 \text{ m/s}^2$  [36]. Dalším rozdílem zadání mezi vstupem *standard earth gravity* a *acceleration* je směr působení. Zatímco vstup *standard earth gravity* působí při zadání osy +Y jako směrového vektoru tak, že pomyslná gravitační síla táhne volné části dílu ve směru této osy, vstup *acceleration* aplikuje zadané zrychlení na aktivní posunutí (*displacement*). Pro stejný výsledek je tak nutné zadat směr působení tohoto zrychlení v opačném směru.

## 6.5.3 APDL skript

V dalším kroku bylo nutné vložit APDL skript přes vstup textového příkazu *command*, aby byla pro změnu směru působení zrychlení zachována deformace sítě způsobená odlehčením od zatížení gravitací v kroku 1. Skript jsem zadal v podobě *D,RPS,all,%\_FIX%*, kde *D* je samotný příkaz pro definici omezení stupňů volnosti v zadaných uzlech, *RPS* je mnou vytvořený *named selection* pro všechny RPS, *all* znamená výběr všech směrů a *%\_FIX%* zadává fixaci stupňů volnosti v momentální relativní hodnotě posunutí. Pro eliminaci možné chyby, nebo ovlivnění simulace jsem tento příkaz vytvořil pro každou RPS pozici zvlášť s příslušným směrem omezení posunu, viz následující obrázek.

```
Commands
1  ! Commands inserted into this file will be executed just prior to the ANSYS SOLVE command.
2  ! These commands may supersede command settings set by Workbench.
3
4  ! Active UNIT system in Workbench when this object was created: Metric (mm, kg, N, s, mV, mA)
5  ! NOTE: Any data that requires units (such as mass) is assumed to be in the consistent solver unit system.
6  ! See Solving Units in the help system for more information.
7
8
9  D,RPS1x,ux,*_FIX%
10 D,RPS2y,uy,*_FIX%
11 D,RPS3y,uy,*_FIX%
12 D,RPS4y,uy,*_FIX%
13 D,RPS5z,uz,*_FIX%
14 D,RPS6z,uz,*_FIX%
15 D,RPS101y,uy,*_FIX%
16 D,RPS102y,uy,*_FIX%
17 D,RPS103y,uy,*_FIX%
18 D,RPS104y,uy,*_FIX%
19
```

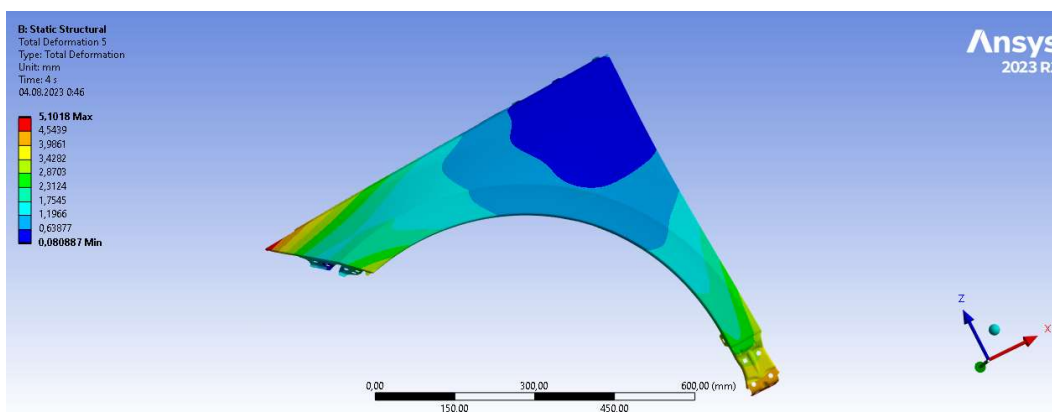
Obrázek 38 - Zadání APDL skriptu

## 6.5.4 Posunutí RPS

Jelikož příkaz popsany v předchozí podkapitole pouze fixuje stupně volnosti, bylo nutné zarovnání RPS do nulových poloh provést pomocí posunutí (*displacement*). Posunutí bylo nutné vytvořit pro každé RPS zvlášť, obdobně jako pro podpěrné body v kapitole 6.5.1, s tím rozdílem, že do osově složky odpovídající ose fixace daného RPS (viz kapitola 3.3.2) jsem zadal hodnotu požadovaného posunutí. Například pro RPS104y jsem do složky Y zadal posunutí 2 mm a zbylým dvěma složkám X a Z nastavil posunutí jako volné (*free*).

## 6.6 Výstupy simulace

Jako výsledek simulace jsem zvolil celkovou deformaci (*total deformation*). Výsledek celkové deformace jsem vytvořil pro každý krok simulace, aby mohla být po odlehčení dílu v kroku 1 odečtena hodnota posunutí RPS daná touto deformací a deformace v krocích 2 a 3 napomohly odhalit případné chyby v definici simulace. Celková deformace v kroku 4 byla výsledkem kompletního procesu virtuálního upnutí dílu. Výslednou zdeformovanou síť jsem po úspěšném provedení simulace vyexportoval do souboru STL, aby mohlo dojít k vyhodnocení přesnosti virtuálního upínání.



Obrázek 39 - Výstup simulace v podobě barevné mapy celkové deformace

## 6.7 Iterace

V průběhu této práce bylo vytvořeno několik simulací s cílem zlepšit její výsledky. Hlavní rozdíly mezi iteracemi, které jsou stručně popsány v následující tabulce, spočívali ve způsobu definice RPS a výpočtu hodnoty jejich posunutí. Postup popsáný v předešlých podkapitolách byl zachován. První iterace měla za cíl ověřit funkčnost simulace, správnost postupu a napomoci odhalit kritická místa definice simulace. Ve druhé iteraci byly RPS zadány jako plochy a jejich posun korigován odečtením deformace v kroku 1 v místě RPS plochy. Ve třetí iteraci byly RPS zadány jako body v uzlech se souřadnicemi odpovídajícími, nebo alespoň nejméně se blížejšími výkresové dokumentaci. Nejistota výběru uzlů vycházela z provádění definice RPS na datech dílu zatíženém gravitační silou v horizontální poloze. V některých částech tím došlo k deformaci, kvůli které by výběr uzlu přesně dle souřadnic neodpovídal bodu ve výkresové dokumentaci, například by se nacházel na jiné ploše. Hodnoty posunutí RPS ve třetí iteraci byly korigovány hodnotami deformací, které byly získány z výsledků směrových deformací (*directional deformation*) v jednotlivých pojmenovaných výběrech RPS. Směrové deformace jsem nastavil tak, aby jejich výsledky zobrazovaly pro každý RPS bod hodnotu deformace v příslušném směru v kroku 1.

Tabulka 3 – Hlavní rozdíly mezi iteracemi

Iterace	Definice RPS	Hodnota posunutí RPS
1	plochy	—
2	plochy	Vypočtena z deformace v ploše RPS
3	body	Vypočtena z hodnoty směrové deformace

## 6.8 Vyhodnocení výsledků

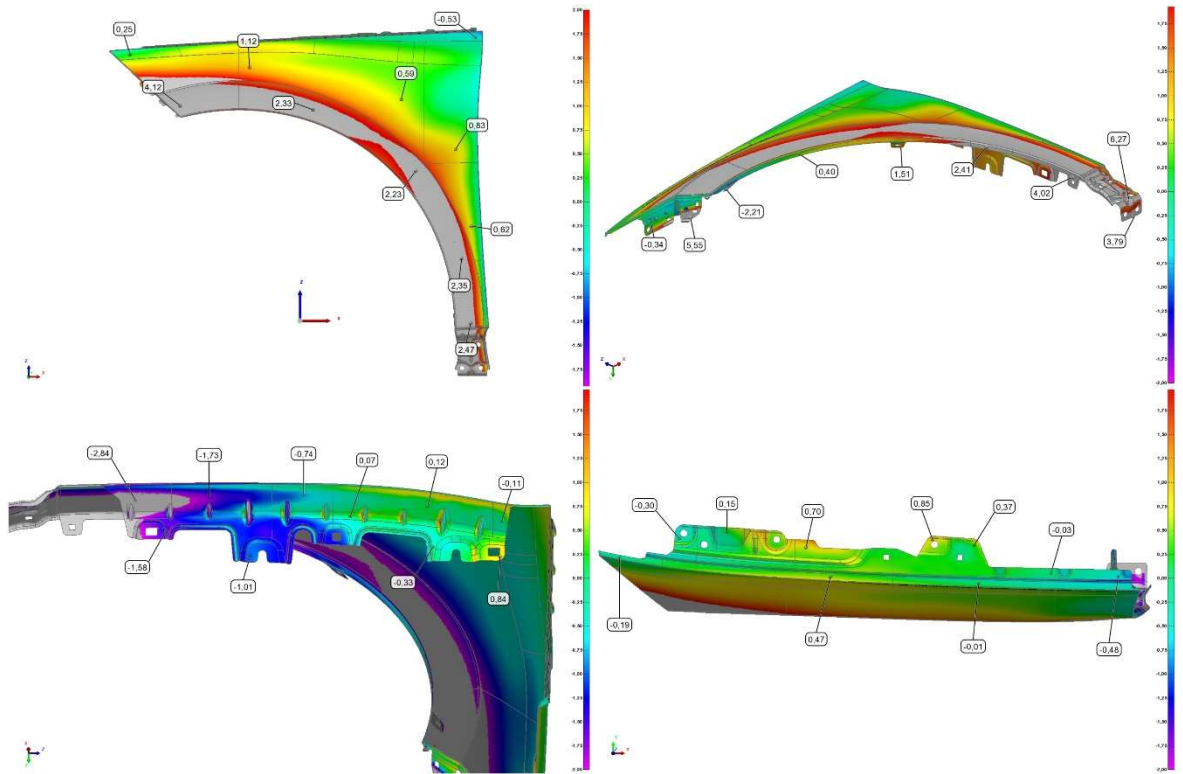
Vyhodnocení výsledků virtuálního upínání bylo provedeno porovnáním výstupu simulace s referenční geometrií ve Škoda Auto a.s. v programu Polyworks. K porovnání byla využita makra umožňující rychlé vyrovnání výstupu simulace a referenčních dat s využitím RPS. V tomto případě se tedy nejedná o obecný best-fit, nýbrž o best-fit RPS ploch. Dalším důvodem pro externí vyhodnocení byla data ze skenu zkušební dílu upnutého ve standardním přípravku, která mi nebyla poskytnuta, aby nemohlo dojít ke korekci nastavení MKP simulace v této práci.

K vyhodnocení odchylek v konkrétních bodech a vytvoření následujících obrázků došlo rovněž automaticky v programu Polyworks dle přednastaveného schématu. Vytažené odchylky se tak nachází ve stejných bodech ve všech variantách porovnání.

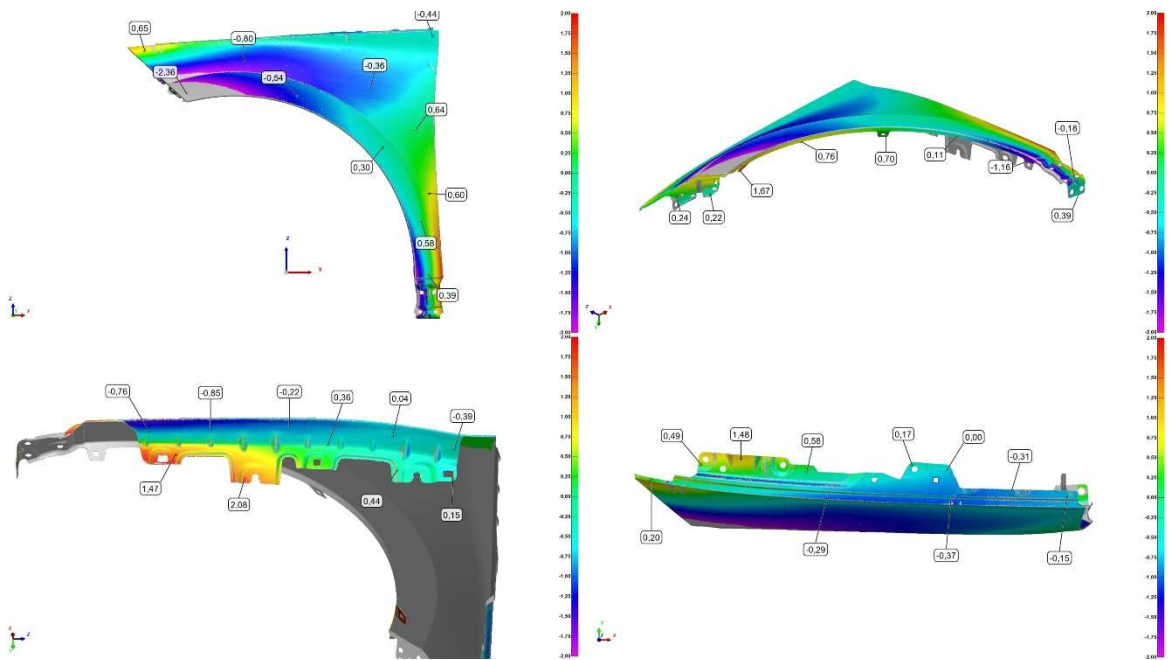
Pro každou iteraci byla vytvořena dvě porovnání a vyhodnocení odchylek. Nejprve byl porovnán výstup MKP simulace (dále jako VC) s CAD modelem dílu (dále jen jako CAD), čímž porovnání napodobuje využití virtuálního upínání v praxi. V tom případě by totiž byla k dispozici pouze zmíněná data. V druhém případě byl porovnán výstup MKP simulace (VC) s daty ze skenu. Ten byl vytvořen po upnutí stejného dílu, který byl vstupem pro MKP simulaci, do současně využívaného rámového přípravku (dále jako sken ve standardním přípravku – SSP). Druhé porovnání tak vyjadřuje shodu výsledků virtuálního upínání se současnou metodou upínání. Při každém porovnání výsledků simulace s referenčními byly vypočítány tři parametry pro kvantifikaci výsledků. Průměrné odchylky byly vypočteny z absolutních hodnot odchylek a pro přehlednost jsou v následujících podkapitolách značeny  $\bar{x}_{ABS}$ . Odchylky byly do absolutních hodnot převedeny pro to, aby jejich průměrná hodnota vyjadřovala průměrnou vzdálenost od referenčních dat, tedy od nulové hodnoty. Dalšími parametry je směrodatná odchylka jednotlivých odchylek  $\sigma$  a variační rozpětí odchylek  $R$ . Hodnoty všech parametrů byly zaokrouhleny na dvě desetinná místa

### 6.8.1 Výsledky první iterace

Jak již bylo zmíněno, první iterace sloužila k ověření funkčnosti simulace a postupu virtuálního upínání. Z průběhu deformace byla rovněž ověřena správnost zadání a funkčnost APDL skriptu. Z toho důvodu nejsou výsledky této iterace relevantní pro ověření metody virtuálního upínání. Při porovnání s CAD modelem byla hodnota průměrné odchylky  $\bar{x}_{ABS} = 1,42$  mm a směrodatné odchylky  $\sigma = 1,93$  mm, variační rozpětí však dosáhlo hodnoty  $R = 9,11$  mm. Při porovnání se skenem ve standardním přípravku pak byly hodnoty  $\bar{x}_{ABS} = 0,60$  mm,  $\sigma = 0,79$  mm a  $R = 4,44$  mm.



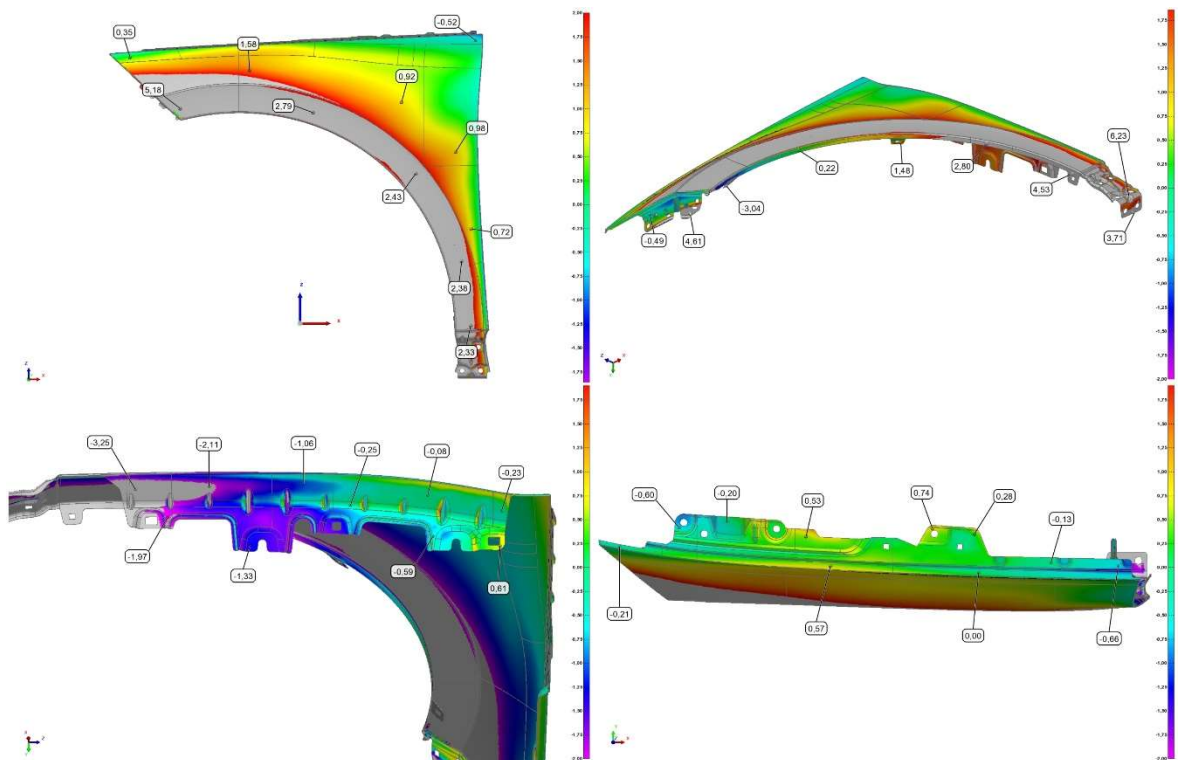
Obrázek 40 - Iterace 1: VC vs. CAD



Obrázek 41 - Iterace 1: VC vs. SSP

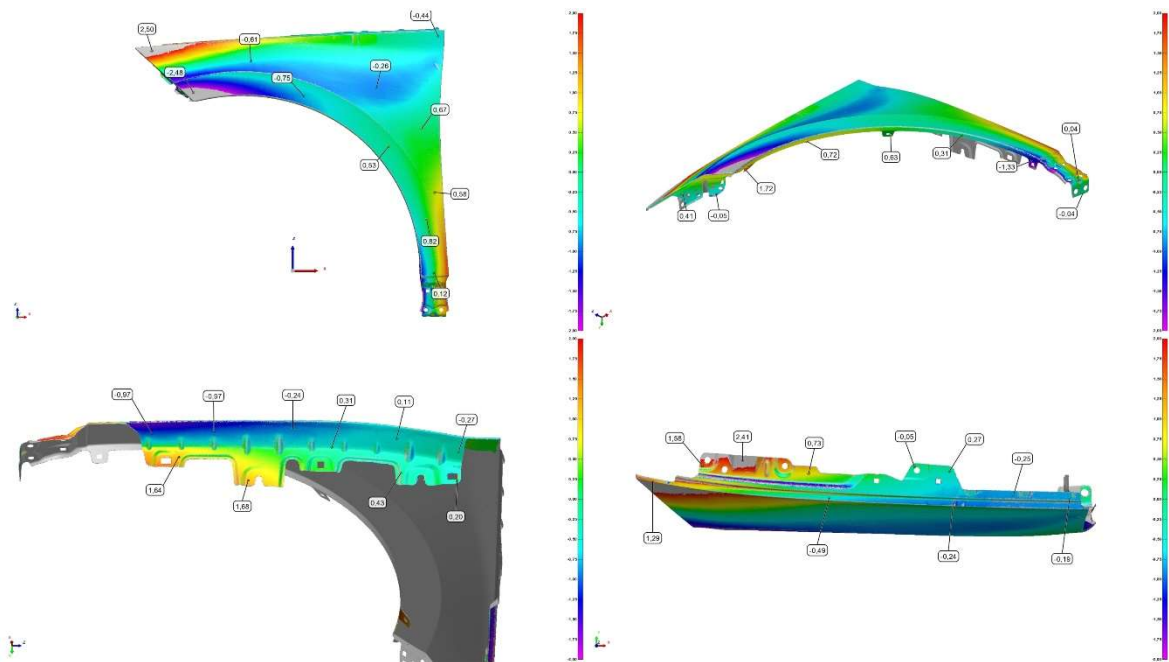
## 6.8.2 Výsledky druhé iterace

Druhá iterace dosáhla z pohledu průměrné odchylky o 10 %, respektive 18 % horších výsledků než iterace první. Hodnoty parametrů byly  $\bar{x}_{ABS} = 1,57$  mm,  $\sigma = 2,09$  mm a  $R = 9,48$  mm pro porovnání s CAD a  $\bar{x}_{ABS} = 0,73$  mm,  $\sigma = 0,97$  mm a  $R = 4,98$  mm pro porovnání s SSP. Druhá iterace poukázala na jev, kdy při relativně přesné ale nesprávné simulaci virtuálního upínání můžou vyvolané deformace způsobit vyšší odchylku od cílové geometrie než při nepřesné ale rychlé definici okrajových podmínek simulace.



Obrázek 42 - Iterace 2: VC vs. CAD

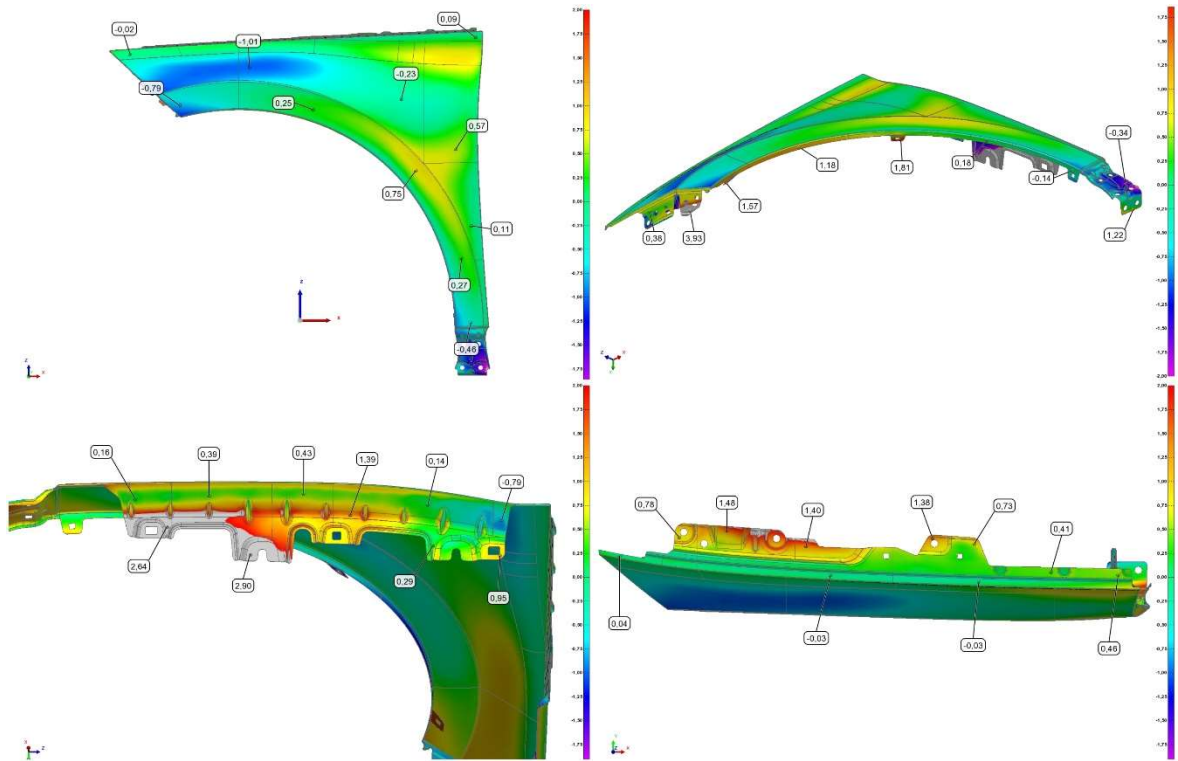




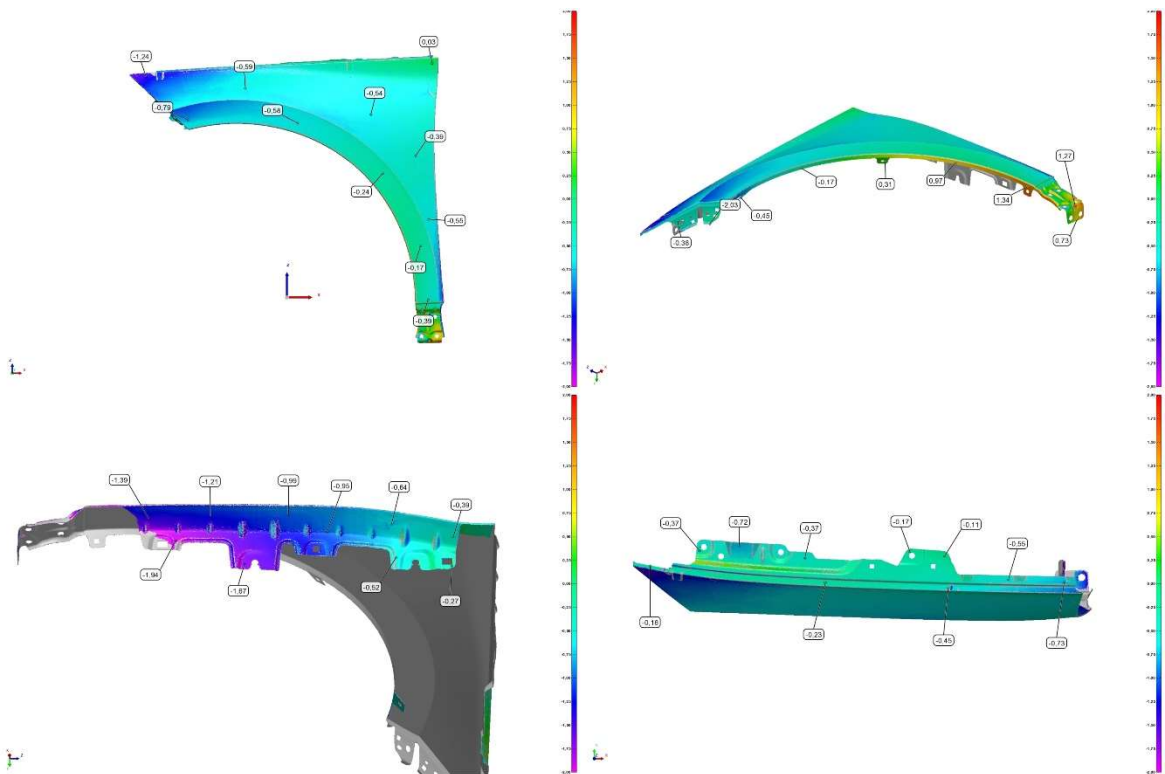
Obrázek 43 - Iterace 2: VC vs. SSP

### 6.8.3 Výsledky třetí iterace

Definice RPS jako bodů ve třetí iteraci představovalo snadnější a přesnější volbu uzlů při tvorbě pojmenovaných výběrů. Výhoda spočívala ve výběru uzlů podle jejich souřadnic a možnosti efektivnějšího využití funkce směrové deformace. Hodnoty kvantitativních parametrů byly  $\bar{x}_{ABS} = 0,80$  mm,  $\sigma = 0,99$  mm a  $R = 4,94$  mm pro porovnání s CAD a  $\bar{x}_{ABS} = 0,67$  mm,  $\sigma = 0,71$  mm a  $R = 3,37$  mm pro porovnání s SSP. Pokud se zaměříme pouze na největší plochu dílu, parametry mají hodnoty  $\bar{x}_{ABS} = 0,41$  mm,  $\sigma = 0,52$  mm a  $R = 1,76$  mm pro porovnání s CAD a  $\bar{x}_{ABS} = 0,50$  mm,  $\sigma = 0,32$  mm a  $R = 1,27$  mm pro porovnání s SSP.



Obrázek 44 - Iterace 3: VC vs. CAD



Obrázek 45 - Iterace 3: VC vs. SSP

# Závěr

V úvodu této práce byla popsána problematika kontroly kvality tenkostěnných plechových dílů spočívající především v jejich možné deformaci při působení pouze gravitačního zatížení. V dalších kapitolách byly popsány upínací přípravky a systémy využívané při kontrole jejich rozměrových tolerancí. V kapitole o přípravcích používaných v současnosti bylo poukázáno na jejich nedostatky a v dalších částech této kapitoly byly zmíněny alternativy v podobě flexibilních upínacích systémů, které jsou schopné vykompenzovat alespoň některé jejich nedostatky. V kapitole Náhrada upínacího systému virtuálním upínáním byla představena metoda virtuálního upínání včetně stručného vývoje a principů této metody a s ní spojená problematika. Blíže byl také popsán software od společnosti Ansys, ve kterém probíhala simulace virtuálního upínání v praktické části.

Praktická část probíhala za plné podpory společnosti Škoda Auto a.s. a byla rozdělena na dvě části. První část spočívala v kompletní rekonstrukci procesu tvorby dat pro metodu virtuálního upínání. V této části byl zkušební díl poskytnutý společností Škoda Auto a.s. nejprve změřen v měrovém středisku společnosti dle dosavadního postupu na stacionárním CMM ve standardním rámovém přípravku. Následně byl díl v prostorách fakulty strojní ČVUT digitalizován metodou pruhové projekce zařízením Zeiss Comet L3D 2. Takto získaná data byla následně zpracována v SW Zeiss Colin 3D tak, aby byla použitelná jako vstup pro metodu virtuálního upínání.

Ve druhé části byla provedena simulace virtuálního upínání v programech od společnosti Ansys Inc. a její postup byl konzultován s odborníky na problematiku úloh statického namáhání z firmy TechSoft Engineering, spol. s r.o. Simulace byla provedena na souboru STL vytvořeném zaměstnanci Škoda Auto a.s. ze skenu zkušební dílu na jednoduchém přípravku laser scannerem. Rozdělena byla do čtyř kroků. V prvním kroku došlo ke kompenzaci působení gravitace v poloze snímání dat dílu. V druhém kroku, který byl přidán kvůli systematické simulací programu Ansys Mechanical, došlo skriptem k odebrání stupňů volnosti RPS za současného zachování odlehčení z kroku 1. Ve třetím kroku bylo aplikováno zatížení dílu gravitací v zástavbové poloze a v posledním kroku byly posunuty RPS do nulových pozic z výkresové dokumentace. Tímto způsobem byly provedeny tři iterace s různými parametry a přístupy s cílem zlepšení výsledku simulace. Nejlepších výsledků dosáhla

třetí iterace. Bylo to především díky definici RPS pomocí bodů, která dovolila snadnější a přesnější výběr uzlů a díky využití funkce vyhodnocení směrové deformace v bodech RPS, z jejichž výsledků byly přesně vypočítány posuny těchto bodů. Při porovnání výsledků třetí iterace se skenem stejného zkušebního dílu ve standardním rámovém přípravku byl průměr z odchylek v absolutních hodnotách  $\bar{x}_{ABS} = 0,67$  mm, směrodatná odchylka odchylek  $\sigma = 0,71$  mm a variační rozptyl  $R = 3,37$  mm. Pokud se zaměříme na největší plochu blatníku, hodnoty parametrů jsou v tomto případě  $\bar{x}_{ABS} = 0,50$  mm,  $\sigma = 0,32$  mm a  $R = 1,27$  mm. Z pohledu způsobilosti metody virtuálního upínání pro nasazení v praxi však není přesnost dosažených výsledků dostatečná. Třetí iterace byla také časově nejdelší vlivem vyšší manuální náročnosti definice simulace dané přesnou definicí okrajových podmínek. Doba výpočtu trvala přibližně 8 minut a byla pro všechny iterace stejná.

Největší vliv na přesnost metody virtuálního upínání má kvalita vstupních dat a přesnost definice okrajových podmínek. Kvalita vstupních dat je ovlivněna metodou a podmínkami digitalizace dílu. Zdrojem nepřesností simulace vycházejících z kvality vstupních dat mohou být vady sítě, jako například díry a chybějící části geometrie, ale také využití konstantní tloušťky materiálu, která nemusí odpovídat realitě, jelikož může, především v ohybech a oblastech s větším přetvořením, docházet vlivem tvářecích operací ke ztenčení stěny. Mimo oprav parametrické sítě je důležité i její zpracování, a to konkrétně volba velikosti elementů, od které se odvíjí přesnost metody konečných prvků. Přesnost definice okrajových podmínek simulace vychází z určení polohy a posunutí bodů, ve kterých jsou odebírány stupně volnosti. V případě virtuálního upínání jde o polohu podpěrných bodů v horizontální poloze dílu a polohu a posunutí RPS. Jakákoliv nepřesnost v definici jejich polohy se projeví ve výsledku simulace. Experimentálně byl navíc zjištěn rozdíl mezi definicí RPS pomocí bodů a prvků (ploch a podobně). Zlepšení výsledků je tak možné zpřesněním definice polohy RPS, například zarovnáním parametrické sítě dílu a nominálního CAD modelu obsahujícího RPS body/prvky, podle kterých dojde k výběru odpovídajících uzlů. Možností je také využití alternativního postupu metody virtuálního upínání, při kterém je deformován CAD model zatížením gravitací v horizontální poloze.

# Reference

- [1] FOREJTOVÁ, Lucie, Ladislav KOLAŘÍK, Jan SUCHÁNEK, Marie KOLAŘÍKOVÁ a Tomáš PILVOUSEK. Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 2017, **2017**(3), 1 [cit. 2023-07-26]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie>
- [2] ŠANOVEC, Jan a Vladimír KÖRBER. Automatická analýza jakosti výlisků. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 2013, **2013**(3), 1 [cit. 2023-07-26]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/automaticka-analyza-jakosti-vylisku>
- [3] HOCKEN, Robert J. a Paulo H. PEREIRA, ed. *Coordinate Measuring Machines and Systems*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011, 592 s. ISBN 978-1-57444-652-4.
- [4] ČSN EN ISO 10360-1. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 1: Slovník*. Praha: Český normalizační institut, 2003, 4 s. Třídící znak 252011.
- [5] Bridge CMMs: Highest precision and speed for industrial metrology. In: *Zeiss metrology* [online]. Carl Zeiss AG, 2023 [cit. 2023-07-29]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/coordinate-measuring-machines/bridge-type-cmms.html#rigidity>
- [6] CMM Zeiss UPMC. In: *Český metrologický institut* [online]. Brno, 2020 [cit. 2023-07-10]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/node/1352>
- [7] Bravo HA. In: *Hexagon* [online]. Stockholm: Hexagon AB, 2023 [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: <https://hexagon.com/products/bravo-ha?accordId=A0ED00B64019445CA9FD376E57ABAFAC>
- [8] S přesností mikronu. In: *Škoda kariéra - blog* [online]. Mladá Boleslav: Škoda Auto a. s., 2022 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.skoda-kariera.cz/blog/s-presnosti-mikronu>
- [9] KOPTIŠ, Michal. *Využití snímacího systému laser scanneru pro aplikace reverzního inženýrství*. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Libor Beránek.

- [10] Měřicí rameno Nikon MCAX S. In: *Topmes* [online]. TOPMES s.r.o. [cit. 2023-07-29].  
Dostupné z: <https://www.topmes.cz/fallback/produkty/nikon-mcax-s>
- [11] Leica Absolute Tracker AT960. In: *Hexagon* [online]. Stockholm: Hexagon AB, 2023 [cit. 2023-07-29]. Dostupné z: <https://hexagon.com/products/leica-absolute-tracker-at960?accordId=31C43C2DB6FE4A829A94AC52BF3088CF>
- [12] Automated Inspection. In: *Hexagon* [online]. Stockholm: Hexagon AB, 2023 [cit. 2023-07-29]. Dostupné z: <https://hexagon.com/solutions/automated-inspection>
- [13] Achieving highly accurate measurements and better productivity with technology. In: *Hexagon* [online]. Stockholm: Hexagon AB, 2019 [cit. 2023-07-29]. Dostupné z: <https://hexagon.com/resources/customer-success-stories/achieving-highly-accurate-measurements-better-productivity-with-technology>
- [14] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [15] DROUIN, Marc-Antoine a Jean-Angelo BERARDIN. Active Triangulation 3D Imaging Systems for Industrial Inspection. *3D Imaging, Analysis and Applications* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2020, 109-165 [cit. 2023-07-31]. ISBN 978-3-030-44069-5.  
Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-44070-1\_3
- [16] YOSHIKAWA, Toru. *Handbook of optical metrology: Principles and applications*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. ISBN 978-0-8493-3760-4.
- [17] TEUTSCH, Christian. *Model-based Analysis and Evaluation of Point Sets from Optical 3D Laser Scanners*. Magdeburg, 2007. Disertace. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Informatik.
- [18] *3DTool* [online]. Poznaň: Lenso Sp. z o.o. [cit. 2023-07-29]. Dostupné z: <https://www.3dtool.pl/>
- [19] Vorrichtungsbau. In: *Witte* [online]. Bleckede: Witte Barskamp GmbH & Co. KG, 2023 [cit. 2023-07-10]. Dostupné z: <https://www.witte-barskamp.de/modulare-spannsysteme/vorrichtungsbau/>

- [20] FIVE U-nique fixturing system. In: *Hexagon* [online]. Stockholm: Hexagon AB [cit. 2023-07-25]. Dostupné z: <https://hexagon.com/products/five-u-nique-fixturing-system>
- [21] *Witte: Fixed on precision* [online]. Bleckede: Witte Barskamp GmbH & Co. KG, 2023 [cit. 2023-07-25]. Dostupné z: <https://www.witte-barskamp.com/>
- [22] *Rayco fixture* [online]. Detroit: Rayco Manufacturing, Inc., 2023 [cit. 2023-07-25]. Dostupné z: <https://www.raycofixture.com/>
- [23] PETŘÍK, Milan. *Analýza použití vybraných upínacích systémů pro měření na CMM*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Libor Beránek.
- [24] *PRAFS: Poly Robot Automated Fixturing System* [online]. Eching: Protos-3D Metrology, 2023 [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://www.protos-3d.de/en/prafs/prafs/>
- [25] LI, Yadong a Peihua GU. Free-form surface inspection techniques state of the art review. *Computer-Aided Design* [online]. 2004, **36**(13), 1395-1417 [cit. 2023-07-25]. ISSN 00104485. Dostupné z: doi:10.1016/j.cad.2004.02.009
- [26] RAI, Bibek a Liu SHENGLAN. RPS Alignment of Automotive Body Parts in Virtual Assembly and Deviation Analyses. *International Journal of Scientific & Engineering Research* [online]. 2016, **2016**(7), 562-570 [cit. 2023-07-27]. ISSN 2229-5518. Dostupné z: <https://www.ijser.org/researchpaper/RPS-Alignment-of-Automotive-Body-Parts-in-Virtual-Assembly-and-Deviation-Analyses.pdf>
- [27] VW 01055. *Reference point system (RPS)*. Wolfsburg: Volkswagen Aktiengesellschaft, 2017, 18 s.
- [28] ERDEM, Ilker, Peter HELGOSSON a Henrik KIHLMAN. Development of Automated Flexible Tooling as Enabler in Wing Box Assembly. *Procedia CIRP* [online]. 2016, **44**, 233-238 [cit. 2023-07-27]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2016.02.065
- [29] TUOMINEN, Valteri. Virtual clamping in automotive production line measurement. *Expert Systems with Applications* [online]. 2011, **38**(12), 15065-15074 [cit. 2023-07-26]. ISSN 0957-4174. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417411008220>
- [30] WECKENMANN, Albert A., R. RODRIGUEZ-VERA, F. MENDOZA-SANTOYO, P. GALL a A. GABBIA. 3D surface coordinate inspection of formed sheet material parts using optical

- measurement systems and virtual distortion compensation. *Eighth International Symposium on Laser Metrology* [online]. 2005, **2005**(5776), 640-647 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: doi:10.1117/12.611842
- [31] WECKENMANN, A. a A. GABBIA. Testing formed sheet metal parts using fringe projection and evaluation by virtual distortion compensation. *Fringe 2005* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2006, **2006**, 539-546 [cit. 2023-07-27]. ISBN 3-540-26037-4. Dostupné z: doi:10.1007/3-540-29303-5\_71
- [32] MENDRICKY, Radomir a Vladimir KAFKA. ANALYSIS OF THE ACCURACY OF VIRTUAL CLAMPING IN THE FIELD OF 3D SCANNING. *MM Science Journal* [online]. 2021, **2021**(1), 4244-4253 [cit. 2023-07-26]. ISSN 18031269. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2021\_03\_2020068
- [33] JARAMILLO, Andrés Eleazar, Pierre BOULANGER a Flavio PRIETO. On-line 3-D system for the inspection of deformable parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2011, **57**(9-12), 1053-1063 [cit. 2023-07-26]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-011-3332-4
- [34] OKEREKE, Michael a Simeon KEATES. *Finite Element Applications: A practical Guide to the FEM Process* [online]. 1. Greenwich: Springer Cham, 2018 [cit. 2023-07-25]. ISBN 978-3-319-67125-3. Dostupné z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-67125-3>
- [35] *VIRTUAL CLAMPING (VC) / DEFORMATION MODEL* [online]. Eching: Protos-3D Metrology, 2020 [cit. 2023-08-05]. Dostupné z: <https://www.protos-3d.de/en/services/virtual-clamping-vc-deformation-model/>
- [36] Acceleration of gravity Mlada Boleslav, CZ. In: *Wolfram Alpha: Computational intelligence* [online]. [cit. 2023-07-10]. Dostupné z: <https://www.wolframalpha.com/input?i=acceleration+of+gravity+Mlada+Boleslav%2C+CZ>



# Seznam obrázků

Obrázek 1 - tl. Plechů automobilu Škoda Octavia III [1].....	11
Obrázek 2 - CMM Zeiss UPMC 850 Carat [6].....	15
Obrázek 3 - CMM DEA Bravo HA [8] .....	16
Obrázek 4 - Sedmiosé měřicí rameno Nikon MCAx S s multisenzorovým snímacím zařízením [10]	17
Obrázek 5 - Laser tracker Leica Absolute Tracker AT960 [11] .....	18
Obrázek 6 - Rozdělení snímacích systémů .....	19
Obrázek 7 - Schéma triangulačního principu laserového skeneru [15] .....	22
Obrázek 8 - Laserový skener Leica T-scan 5 upnutý na průmyslovém robotu [8] .....	23
Obrázek 9 – Princip a konfigurace triangulačních prvků pruhové projekce, převzato a upraveno z [17] .....	24
Obrázek 10 - Rámový upínací přípravek [18].....	26
Obrázek 11 – Upínací deska s modulárními upínkami [19].....	27
Obrázek 12 - Systém DEA Five U-nique [20] .....	28
Obrázek 13 - Přípravek sestavený z upínacího systému Alufix [21].....	30
Obrázek 14 - Vyrovnání metodou 3-2-1 [26] .....	32
Obrázek 15 - Globální souřadnicový systém automobilu, 1) vertikální rovina yz, 2) podélná střední rovina xz, 3) Vodorovná podélná rovina xy, 4) počátek SS [27].....	33
Obrázek 16 - Schéma procesu virtuálního upínání. Převzato a upraveno z [31] .....	36
Obrázek 17 - Postup simulace virtuálního upínání, převzato a upraveno z [32] .....	37
Obrázek 18 – Alternativní postup VC, převzato a upraveno z [33].....	38
Obrázek 19 - Princip kompenzace gravitace a virtuálního upínání v SW GOM Inspect, převzato a upraveno z [35] .....	40
Obrázek 20 - Zkušební díl upnutý ve standardním rámovém přípravku.....	41
Obrázek 21 - Hala měrového střediska C14 v závodu Škoda Auto Mladá Boleslav [8].....	42
Obrázek 22 – Návrh přípravku .....	43
Obrázek 23 - Přípravek složený ze systému Alufix .....	44
Obrázek 24 – Měření přípravku .....	45
Obrázek 25 – Výkres přípravku s naměřenými souřadnicemi podpěrných bodů.....	45
Obrázek 26 - Pohled do prostředí SW Zeiss Colin 3D se záběrem snímaného dílu. Zelený kříž značí střed zorného pole snímače, Červená barva signalizuje přexponovaná místa.....	47
Obrázek 27 - Zeiss COMET L3D 2 s otočným stolem.....	48
Obrázek 28 - Příklad problematického místa s odpovídající vadou nasnímaných dat .....	48
Obrázek 29 - Mrak bodů nasnímaný zařízením Zeiss COMET L3D 2.....	49

Obrázek 30 - Schéma postupu zpracování nasnímaných dat .....	50
Obrázek 31 – Barevná mapa odchylek best-fit porovnání zpracovaných nasnímaných dat s referenčním modelem dílu .....	52
Obrázek 32 - Role jednotlivých SW z balíčku Ansys .....	53
Obrázek 33 - Porovnání dat ze skenů na standardním a Alufix přípravku .....	54
Obrázek 34 - Rozhraní programu Ansys Discovery s ukázkou nástroje na zacelení děr .....	55
Obrázek 35 - Náhled projektu v programu Ansys Workbench .....	56
Obrázek 36 - Rozhraní programu Ansys ICEM CFD .....	57
Obrázek 37 - Popis jednotlivých kroků simulace v programu Ansys Mechanical .....	58
Obrázek 38 - Zadání APDL skriptu .....	59
Obrázek 39 - Výstup simulace v podobě barevné mapy celkové deformace .....	60
Obrázek 40 - Iterace 1: VC vs. CAD.....	63
Obrázek 41 - Iterace 1: VC vs. SSP.....	63
Obrázek 42 - Iterace 2: VC vs. CAD.....	64
Obrázek 43 - Iterace 2: VC vs. SSP.....	65
Obrázek 44 - Iterace 3: VC vs. CAD.....	66
Obrázek 45 - Iterace 3: VC vs. SSP.....	66

# Seznam Tabulek

Tabulka 1 - Parametry použité konfigurace zařízení Zeiss Comet L3D 2 .....	46
Tabulka 2 - Porovnání parametrů sítí dle úrovně zpracování .....	52
Tabulka 3 – Hlavní rozdíly mezi iteracemi.....	61