



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

KALIBRACE OPTICKÝCH SOUŘADNICOVÝCH MĚŘICÍCH STROJŮ GOM ATOS

CALIBRATION OF GOM ATOS OPTICAL COORDINATE MEASURING MACHINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Košťák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Matej Harčarík

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|--|
| Ústav: | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky |
| Student: | Bc. Ondřej Košťák |
| Studijní program: | Strojní inženýrství |
| Studijní obor: | Kvalita, spolehlivost a bezpečnost |
| Vedoucí práce: | Ing. Matej Harčarik |
| Akademický rok: | 2016/17 |

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

Kalibrace optických souřadnicových měřicích strojů GOM ATOS

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Z důvodu stoupajícího významu 3D bezdotykových měřicích metod v průmyslové praxi a absenci normalizovaných kalibračních postupů existuje požadavek na vytváření interních kalibračních postupů pro tyto přístroje a metodiky pro jejich používání při kontrole kvality výrobků.

Cíle diplomové práce:

- Popis konstrukce a funkce přístrojů GOM ATOS.
- Návrh vhodné interní kalibrační metodiky.
- Návrh a realizace vhodných etalonů.
- Stanovení nejistot při kalibraci.
- Doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN ISO 10360-8. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích systémů (CMS) - Část 8: Souřadnicové měřicí stroje s optickými snímači vzdálenosti. Praha: ÚNMZ, 2014.

VDI/VDE 2634 BLATT 1:2002-05. Optische 3D-Messsysteme - Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung. Berlin: Verband der Automobilindustrie, 2002.

VDI/VDE 2634 BLATT 2:2012-08. Optische 3-D-Messsysteme - Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung. Berlin: Verband der Automobilindustrie, 2012.

VDI/VDE 2634 BLATT 3:2008-12. Optische 3-D-Messsysteme - Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung in mehreren Einzelansichten. Berlin: Verband der Automobilindustrie, 2008.

EA – 4 /02 M:2013. Vyjádření nejistoty měření při kalibraci. Praha: ČIA, 2014.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Diplomová práce obsahuje základní rozdělení 3D metod používaných pro rekonstrukci měřených objektů a druhy vzorů strukturovaného světla využívané pro 3D triangulaci. Dále se věnuje popisu konstrukce a funkcím přístrojů GOM ATOS a TRITOP. Primárně je však věnována problematice kalibrací těchto přístrojů, návrhu vhodných zkušebních těles a interní kalibrační metodiky využívané ve společnosti ŠKODA AUTO a.s. Následně práce obsahuje ověření navrženého kalibračního postupu v praxi, návrh pro stanovení nejistot kalibrace a doporučení pro praxi.

ABSTRACT

This master's thesis contains the basic division of 3D methods which are used for reconstruction of measured objects. Furthermore the types of structured light patterns used for 3D triangulation. It also contains a description of the construction and functions of GOM ATOS and TRITOP machines. Primarily the thesis deals with the calibration of these machines, the design of suitable materials standard of size and the internal calibration methodology used by ŠKODA AUTO a.s. The text also includes verification of the proposed calibration procedure in practice, proposal for determination of calibration uncertainties and recommendations for practice.

KLÍČOVÁ SLOVA

metrologie, kalibrace, 3D optické souřadnicové měřicí stroje, kalibrační postup, ATOS, TRITOP, zkušební tělesa

KEYWORDS

metrology, calibration, 3D optical coordinate measuring machines, calibration procedure, ATOS, TRITOP, materials standard of size

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOŠŤÁK, O. *Kalibrace optických souřadnicových měřicích strojů GOM ATOS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 85 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Matej Harčarík.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především svému kolegovi Radimu Janíčkoví za jeho cenné rady a připomínky k obsahu diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat své sestře Ing. Elišce Košťákové za pomoc při korekcích a finálních úpravách této práce. Závěrem děkuji firmě ŠKODA AUTO a.s. za poskytnutou podporu v průběhu studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 26.5.2017

.....
Bc. Ondřej Košťák

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| 1 ÚVOD | 15 |
| 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ..... | 17 |
| 2.1 Historie a princip triangulace | 17 |
| 2.2 Základní rozdělení 3D metod používaných pro rekonstrukci měřených objektů.. | 18 |
| 2.2.1 Pasivní metody snímání | 18 |
| 2.2.2 Aktivní metody snímání..... | 19 |
| 2.3 Strukturované světlo | 19 |
| 2.4 Druhy vzorů strukturovaného světla využívané pro 3D triangulaci | 20 |
| 2.4.1 Temporální kodifikace | 21 |
| 2.4.2 Prostorová kodifikace | 23 |
| 2.4.3 Přímá kodifikace..... | 25 |
| 2.5 Matnicí prášky | 26 |
| 3 POPIS KONSTRUKCE A FUNKCE PŘÍSTROJŮ GOM ATOS A TRITOP | 27 |
| 3.1 Popis konstrukce a funkce systému ATOS III Triple Scan..... | 27 |
| 3.1.1 Hlavní části systémů ATOS | 28 |
| 3.1.2 GOM Touch Probe | 29 |
| 3.1.3 ATOS Plus | 30 |
| 3.2 Popis konstrukce a funkce přístrojů TRITOP | 30 |
| 3.2.1 Hlavní části systému TRITOP (viz Obr. 19)..... | 31 |
| 3.2.2 Nekódované referenční body | 32 |
| 3.2.3 Kódované referenční body | 32 |
| 3.2.4 Referenční tyče – scale bary..... | 32 |
| 4 PROBLEMATIKA KALIBRACÍ A JEJICH ČLENĚNÍ..... | 33 |
| 4.1 Použitá terminologie | 34 |
| 4.1.1 Kalibrace (rekalibrace)..... | 34 |
| 4.1.2 Kvalifikační normál | 34 |
| 4.1.3 Zkušební těleso | 34 |
| 4.2 Kvalifikační normály používané pro samokalibraci přístrojů ATOS | 34 |
| 4.2.1 Samokalibrace přístrojů ATOS | 34 |
| 4.2.2 Samokalibrace systému TRITOP | 35 |
| 4.3 Kalibrace kvalifikačních normálů a referenčních tyčí | 35 |
| 4.4 Kalibrace přístrojů ATOS a TRITOP | 37 |
| 4.5 Kalibrační metodika a zkušební tělesa výrobce (GOM) | 37 |
| 5 NÁVRH A REALIZACE VHODNÝCH ZKUŠEBNÍCH TĚLES | 39 |
| 5.1 Zkušební tělesa pro kalibraci systému ATOS | 39 |
| 5.1.1 Zkušební koule pro kalibraci snímacího systému (PF, PS) | 39 |
| 5.1.2 Ball bary pro kalibraci vzdáleností (SD, E) | 41 |
| 5.2 Zkušební těleso pro kalibraci systému TRITOP..... | 44 |
| 6 NÁVRH VHODNÉ INTERNÍ KALIBRAČNÍ METODIKY..... | 45 |
| 6.1 Předmět kalibrace | 46 |
| 6.2 Související normy, směrnice a navazující předpisy | 46 |
| 6.3 Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci | 46 |
| 6.4 Názvosloví, definice..... | 46 |
| 6.5 Měřidla a pomůcky potřebné ke kalibraci | 47 |
| 6.6 Obecné podmínky kalibrace | 48 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 6.7 | Rozsah kalibrace | 48 |
| 6.8 | Předběžná a vizuální kontrola..... | 48 |
| 6.9 | Zkouška měřidla..... | 48 |
| 6.9.1 | Kontrola dodávky při vstupní přejímce | 48 |
| 6.9.2 | Příprava ke kalibraci | 49 |
| 6.9.3 | Metody měření / rozsah zkoušek | 49 |
| 6.9.4 | Měření metrologických parametrů..... | 49 |
| 6.10 | Vyhodnocení a výrok o kalibraci | 53 |
| 6.10.1 | Vyhodnocení výsledků měření | 53 |
| 6.10.2 | Stanovení nejistoty měření při kalibraci | 54 |
| 6.10.3 | Výrok o výsledku kalibrace..... | 55 |
| 6.11 | Protokol o kalibraci, označení měřidla..... | 55 |
| 6.11.1 | Náležitosti protokolu..... | 55 |
| 6.11.2 | Kalibrační protokol | 55 |
| 6.11.3 | Jiné kalibrační záznamy | 55 |
| 6.12 | Převzetí měřidla ke kalibraci, předání zkalibrovaného měřidla, reklamace..... | 55 |
| 6.12.1 | Převzetí měřidla ke kalibraci: neprovádí se | 55 |
| 6.12.2 | Předání měřidla po kalibraci: neprovádí se | 55 |
| 6.12.3 | Reklamace | 55 |
| 6.13 | Péče o kalibrační postup..... | 55 |
| 6.14 | Rozdělovník, úprava a schválení, revize | 55 |
| 6.14.1 | Rozdělovník, úprava a schválení | 55 |
| 6.14.2 | Revize..... | 56 |
| 6.15 | Stanovení nejistoty kalibrace | 56 |
| 7 | NÁVRH PRO STANOVENÍ NEJISTOT KALIBRACE..... | 57 |
| 8 | OVĚŘENÍ KALIBRAČNÍHO POSTUPU V PRAXI | 61 |
| 8.1 | Kalibrace snímacího systému | 61 |
| 8.2 | Kalibrace pomocí měrek s koulemi | 62 |
| 8.3 | Kalibrace pomocí tyče s kuželi / koulemi (TRITOP) | 63 |
| 9 | DOPORUČENÍ PRO PRAXI..... | 65 |
| 10 | ZÁVĚR..... | 67 |
| 11 | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ..... | 69 |
| 12 | SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK | 71 |
| 12.1 | Seznam tabulek | 71 |
| 12.2 | Seznam obrázků | 72 |
| 12.3 | Seznam zkratk | 74 |
| 13 | SEZNAM PŘÍLOH..... | 75 |

1 ÚVOD

Optická souřadnicová měřicí technika zažívá nejen v současné průmyslové praxi obrovský „boom“. Digitalizace se stává prakticky nezbytnou součástí každého průmyslově vyspělého výrobního podniku. Což je způsobeno především požadavky moderní výroby souvisejícími s přechodem na Průmysl 4.0. Těmito požadavky jsou například rychlost měření a s tím související počet nasnímaných bodů. Uvedené požadavky představují nejvýznamnější výhody, které optické přístroje oproti klasickému dotykovému měření nabízí. Těmto požadavkům se samozřejmě přizpůsobují i výrobci, kteří se zákazníky snaží oslovit co nejkompaktnějším, nejpraktičtějším, nejefektivnějším a nejlegantnějším řešením. Na trhu proto existuje celá paleta různých optických souřadnicových měřicích systémů, které se od sebe liší nejen tvarem a konstrukcí, ale především metodami a způsoby použitými pro nasnímání požadovaných tvarů, povrchů, stejně tak i kvalitou a rychlostí měření. Je proto obtížné nalézt vhodný optický měřicí systém, který bude splňovat žádanou kombinaci vlastností dle preferencí zákazníka.

Optické 3D měřicí systémy jsou používány jako univerzální měřicí a zkušební zařízení. Každý zákazník musí mít jistotu, že optický 3D měřicí systém bude použit ve shodě (k požadovanému výkonu) s požadovanými přednastavenými specifikacemi. Zásadní je nepřekročení maximální povolené chyby měření. V dlouhodobém horizontu může být tento požadavek zajištěn pouze prostřednictvím harmonizovaných kritérií přejímky a kontroly celého zařízení v pravidelných intervalech. Odpovědnost za splnění tohoto požadavku nesou společně výrobce měřicího zařízení na jedné straně a jeho uživatel (zákazník) na straně druhé. S tím souvisí i problematika přejímek a kalibrací těchto zařízení. Na úrovni mezinárodních a národních norem v současnosti prakticky neexistují předpisy, které by bylo možné na tato zařízení aplikovat. Nejbližším dostupným aplikovatelným doporučením je řada směrnic VDI/VDE 2634, 1-3, které byly vydány v průběhu let 2002 až 2012. Z těchto směrnic vychází tato diplomová práce.

Diplomová práce je specificky zaměřena na 3D optické skenery typu ATOS od firmy GOM, které k digitalizaci reálných objektů využívají principy triangulace a projekce strukturovaného světla. Hlavním cílem diplomové práce je návrh vhodných zkušebních těles a kalibrační metodiky pro přístroje ATOS a TRITOP. Mezi dílčí cíle patří návrh stanovení nejistot při kalibraci a doporučení pro praktická měření na výše uvedených přístrojích. K dosažení cílů byly využity analyticko-syntetické metody a metoda měření. Text práce je rozčleněn na úvod, osm kapitol a závěr.

Cílem druhé kapitoly je seznámit čtenáře se současným stavem poznání. Kapitola je zaměřena na základní rozdělení 3D metod používaných pro rekonstrukci měřených objektů a druhů strukturovaného světla využívaných pro 3D triangulaci. Rovněž jsou zde popsány druhy matnicích prášků.

Třetí kapitola popisuje hlavní části a funkce přístrojů GOM ATOS a TRITOP. Dále je zde uvedeno členění referenčních bodů.

Čtvrtá kapitola detailně rozebírá problematiku kalibrací zkušebních těles, artefaktů a etalonů používaných ke kalibraci a samokalibraci přístrojů ATOS a TRITOP.

Pátá kapitola je jedním ze stěžejních bodů této práce, neboť určuje vhodná zkušební tělesa, která budou využívána při interních rekalibracích výše uvedených systémů.

Šestá kapitola představuje gró této diplomové práce. S využitím interních předpisů společnosti ŠKODA AUTO a.s. a jejich doplněním je zde definována vhodná interní kalibrační metodika pro přístroje ATOS a TRITOP.

Sedmá kapitola představí návrh pro stanovení nejistot kalibrace všech vyhodnocovaných parametrů.

Předposlední kapitola je zaměřena na praktické posouzení navrženého kalibračního postupu a vyhodnocení zkoumaných parametrů na konkrétně zvoleném systému.

Poslední kapitola shrnuje doporučení pro praxi nabyté autorem v průběhu kalibrace.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

V úvodu diplomové práce jsou uvedeny obecné informace o využití 3D digitalizace v průmyslu, problematice kalibrací těchto zařízení, obsah a zaměření této práce.

Základní metody používané pro 3D digitalizaci objektů využívají principu triangulace, který je blíže rozebrán v následující podkapitole. Dále je tato kapitola zaměřena na základní rozdělení 3D metod používaných pro rekonstrukci měřených objektů a souvisejících druhů vzorů strukturovaného světla. Vybrané metody využívají i systémy ATOS od firmy GOM.

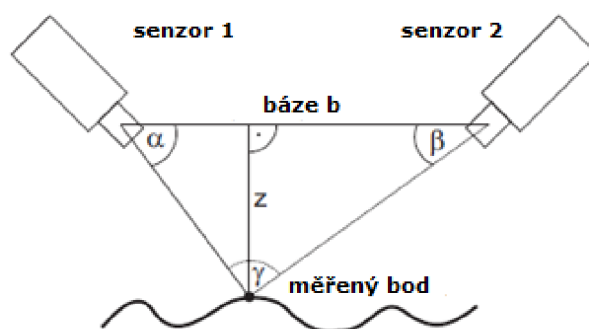
2.1 Historie a princip triangulace

Všeobecně se předpokládá, že princip triangulace museli znát již staří Egyptané, Mayové nebo Sumerové. V moderních dějinách využil princip triangulace v roce 1609 Johannes Kepler k vysvětlení pohybu planet v naší sluneční soustavě. V roce 1617 publikoval tyto principy holandský matematik Willebrord Snellius ve své práci nazvané „Eratosthenes Batavus“. [1]

Princip triangulačního měření závisí na skutečnosti, že trojúhelník je přesně definován délkou jedné strany a přilehlými úhly. Třetí úhel a zbývající délky stran pak lze dopočítat. Optické měřicí systémy využívají tohoto principu k určení geometrie měřeného objektu a jeho prostorových rozměrů. Systém je pak složen ze dvou senzorů, které „pozorují“ snímaný objekt. Jeden z těchto senzorů je kamera, druhým může být zdroj světla nebo taktéž kamera. Trojúhelník je definován projekčními centry senzorů a bodem na povrchu snímaného objektu (viz Obr. 1). Vzdálenost mezi senzory - bází (b), musí být v tomto trojúhelníku známá. Úhly mezi senzory a základnou (α , β) určují průsečík (měřený bod), který je vypočítán pomocí triangulace. Výpočet úhlů α a β , stejně jako délka báze b vychází z předchozího nastavení systému, kde jsou tyto parametry stanoveny. [1]

Potřebná výška trojúhelníku z je pak vypočítána pomocí obecné triangulační rovnice:

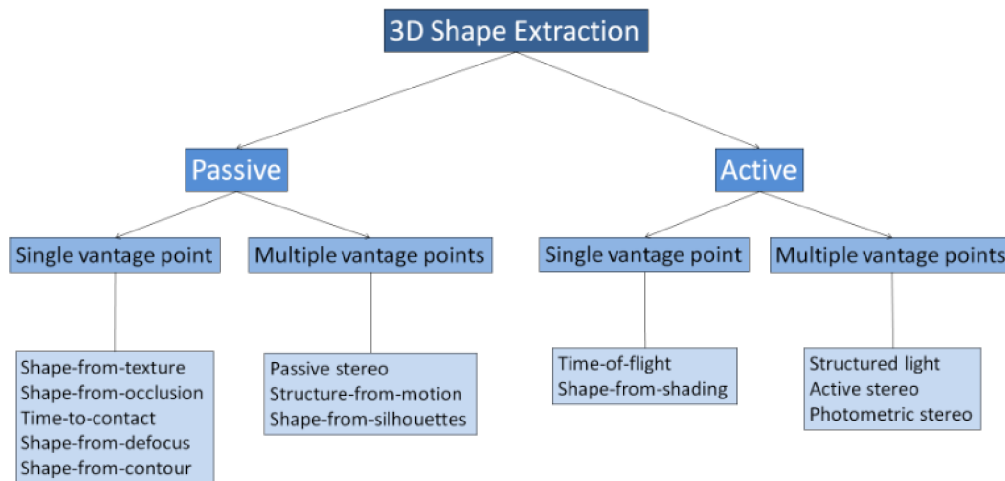
$$z = \frac{b \cdot \sin\alpha \cdot \sin\beta}{\sin\gamma}, \quad \gamma = \pi - \alpha - \beta \quad (1)$$



Obr. 1) Triangulační trojúhelník [5]

2.2 Základní rozdělení 3D metod používaných pro rekonstrukci měřených objektů

Z důvodu širokého spektra nabízených zařízení, které využívajících různé metody pro nasnímání měřeného objektu, se v odborné literatuře setkáváme s jejich různými interpretacemi a odlišným rozdělením. Lze však uvést základní a nejpoužívanější rozdělení do dvou skupin - pasivní a aktivní (viz Obr. 2). [2]



Obr. 2) Taxonomie optických metod používaných pro rekonstrukci 3D tvaru objektů [2]

2.2.1 Pasivní metody snímání

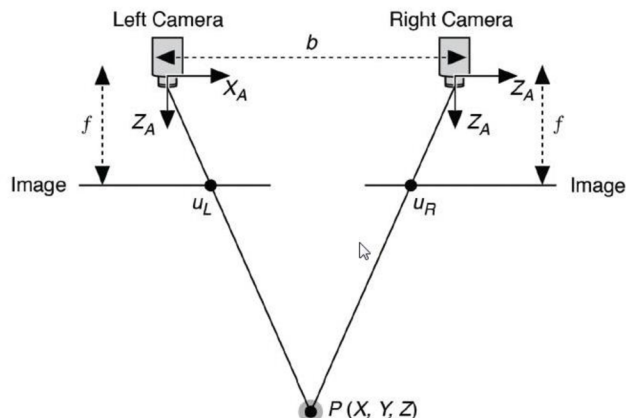
U fotogrammetrických metod není v rámci geometrického uspořádání měřicího systému zahrnut doplňkový zdroj osvětlení. Není zde využíváno jiného zařízení než kamer(-y). Dochází pouze k přijímání energie, nikoliv k jejímu emitování. Podstatou této metody je nasnímání minimálně dvou snímků kamerou buď změnou polohy snímače, nebo natočením měřeného objektu. U systémů s dynamickým snímáním je preferován vyšší počet kamer se známou orientací a samokalibrací (pojem je vysvětlen v kapitole 4 *Problematika kalibrací a jejich členění*). [3, 4]

Mezi pasivní metody patří metody měření tvaru pomocí [3]:

- Stereovidění
- Analýzy pohybu
- Zoomování
- Stínování
- Siluet (kontur) objektu
- Změny ohniska
- Textur objektu

Nejrozšířenější uplatnění z výše uvedených metod má metoda stereovidění (viz Obr. 3), která pro zachycení obrazu využívá stejného principu jako lidské oči – stereoskopie (triangulace). Dvě kamery umístěné v definované a průběhu měření neměnné vzdálenosti vytvoří dva 2D obrazy snímaného objektu z jiných úhlů pohledu. Výsledná geometrie měřeného objektu je pak vypočítána ze vzájemné orientace těchto kamer a rozdílně zaznamenaných pozic bodů z levé a pravé kamery. Největším problémem této metody je korespondence souhlasných bodů v obrazech. Tento problém vede k nepřesnostem měření,

proto se stereovidění často používá společně s různými aktivními metodami. Velmi kritické jsou u této metody i požadavky na okolní osvětlení. Stereovidění je tedy vhodné použít tam, kde nejsou kladeny nároky na vyšší přesnost měření. [4]



Obr. 3) Zjednodušený model stereovizního systému [4]

2.2.2 Aktivní metody snímání

U aktivních snímacích metod je na měřený objekt emitováno světlo například v podobě rozkmitaného laserového pruhu nebo strukturovaných světelných vzorů. Promítané vzory se na měřeném objektu zakřívují dle jeho skutečného tvaru. Kamera toto zakřivení zaznamenává a SW následně s využitím triangulace přepočítává polohu bodů v prostoru. Ve srovnání s pasivními metodami snímání jsou aktivní metody přesnější a spolehlivější, protože vlastním světelným zdrojem řeší problém s korespondencí souhlasných bodů v obrazech. [4]

Aktivní triangulační metody využívají k nasvícení měřeného objektu [4]:

- Světelný paprsek (1D triangulace)
- Světelný pruh (2D triangulace)
- Strukturovaný světelný svazek (3D triangulace)

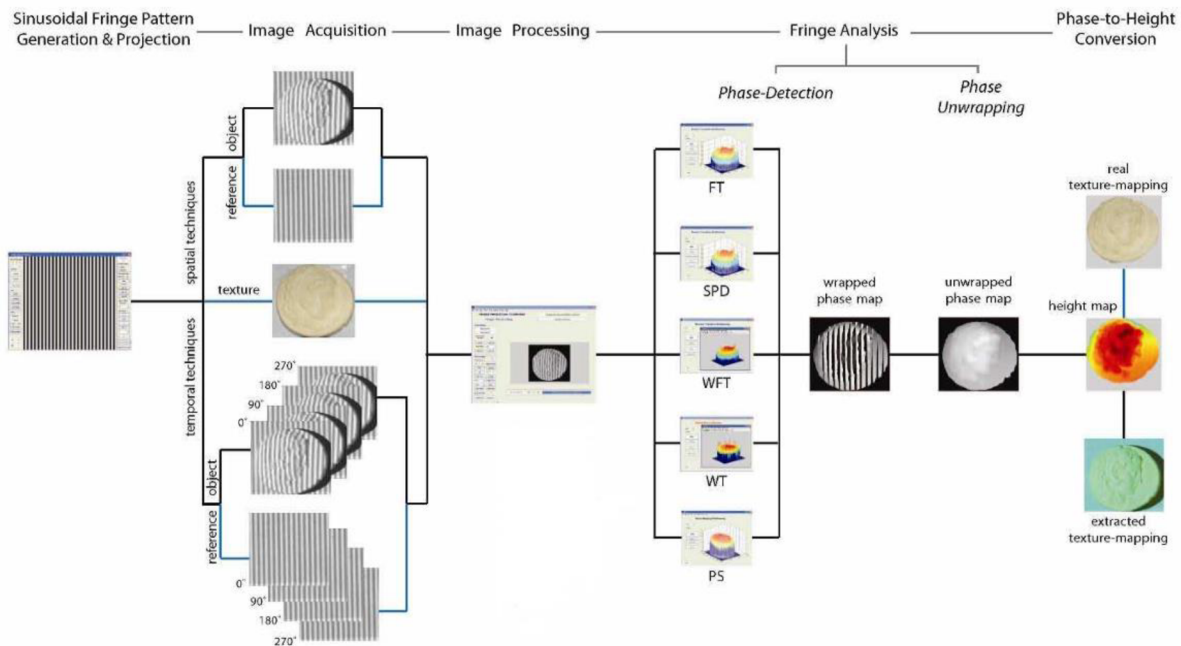
Projekce světelných paprsků a pruhů je využívána hlavně u laserových skenovacích systémů. V průmyslové praxi nacházejí uplatnění jako laserové skenovací hlavy montované na klasické dotykové souřadnicové měřicí stroje. Aktivní triangulaci využívá většina průmyslových 3D bezkontaktních měřicích strojů. [4]

2.3 Strukturované světlo

V posledních letech se projekce strukturovaného světla stala pro vytváření 3D informace o povrchu měřeného objektu jedním z nejčastěji používaných způsobů měření v metrologii. Jednou z nejvýznamnějších výhod technik využívajících strukturovaného světla je jejich schopnost bezkontaktně, rychle a ve vysokém rozlišení vytvářet 3D rekonstrukce celého pole objektů. Typický strukturované světlo promítající profilometrický systém se skládá z projekční jednotky (projektoru), jednotky pro záznam obrazu (CCD kamery) a procesní a analyzační jednotky (PC). [5]

Samotné měření pak probíhá v následujících krocích (viz Obr. 4) [5]:

- 1) Promítnutí určitého vzoru strukturovaného světla na povrch měřeného objektu
- 2) Kamerový záznam vzoru promítnutého na měřený objekt, který je zakřiven jeho tvarem
- 3) Počítačová kalkulace takto modulovaného vzoru pomocí vhodného algoritmu a vytvoření bodů orientovaných v prostoru, tzv. mračna bodů
- 4) Další zpracování a vyhodnocení naměřených dat



Obr. 4) Pracovní postup u profilometrie strukturovaného světla [5]

Pomocí projekce strukturovaného světla lze zaznamenávat nejen statický, ale i pohybující se objekt. V případě pohybujících se objektů se snižuje kvalita digitalizace, což vedlo k zavedení strukturálně složitějších vzorů, které jsou uvedeny v následující podkapitole. [6]

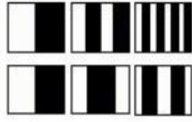

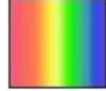

Nevýhodou aplikace strukturovaného světla jsou chyby měření způsobené lesklými a transparentními povrchy. Povrch měřeného objektu musí disponovat dostatečnou difúzní odrazivostí, aby nedocházelo k nežádoucím odrazům promítaných světelných vzorů a tím i značnému zkreslení naměřených dat. Příkladem může být měření koncové měřky, která má velmi lesklý povrch. Jediným řešením pro měření takto lesklých povrchů je jejich zmatnění. Pro tyto účely se používají matnicí prášky, které jsou detailněji popsány v podkapitole 2.5 *Matnicí prášky*. [6]

2.4 Druhy vzorů strukturovaného světla využívané pro 3D triangulaci¹

Z důvodu přesnosti, rychlosti a kvality měření vznikly různé druhy vzorů, které jsou vytvářeny a analyzovány odlišnými způsoby. Každý promítaný vzor má své výhody i nevýhody. Vzory jsou skládány z jednotlivých skupin pixelů s odlišnými kódovými slovy, která jsou mapována na základě úrovně šedé a barevných nebo geometrických reprezentací. Množství kódovaných bodů, určuje složitost mapování ve vzorech a tím i vyšší přesnost

¹ Uvedená kapitola primárně vychází ze zdroje [6, není-li uvedeno jinak]

měření. Vzory se dle kodifikace dělí do třech základních skupin: temporální, prostorovou a přímou. Jejich členění je znázorněno na Obr. 5.

| Temporální kodifikace | Prostorová kodifikace | Přímá kodifikace |
|---|--|--|
| Binární kódy  | Neformální kódování (algoritmus "brutální síly") | Vzory s úrovněmi šedé |
| n-ární kódy | De Bruijn sekvence  | Barevné vzory  |
| Kombinace šedého kódu a fázového posuvu | M-pole (maticová pole)  | |
| Hybridní metody | | |

Obr. 5) Základní členění promítaných vzorů dle struktury

2.4.1 Temporální kodifikace

Její princip spočívá v přiřazení posloupnosti hodnot každému kódovanému bodu pomocí sekvenční projekce vzorů. Vzory, které jsou promítány na měřený objekt, se skládají z proužků, jejichž parametry se v závislosti na čase mění.

Mezi výhody této kodifikace patří:

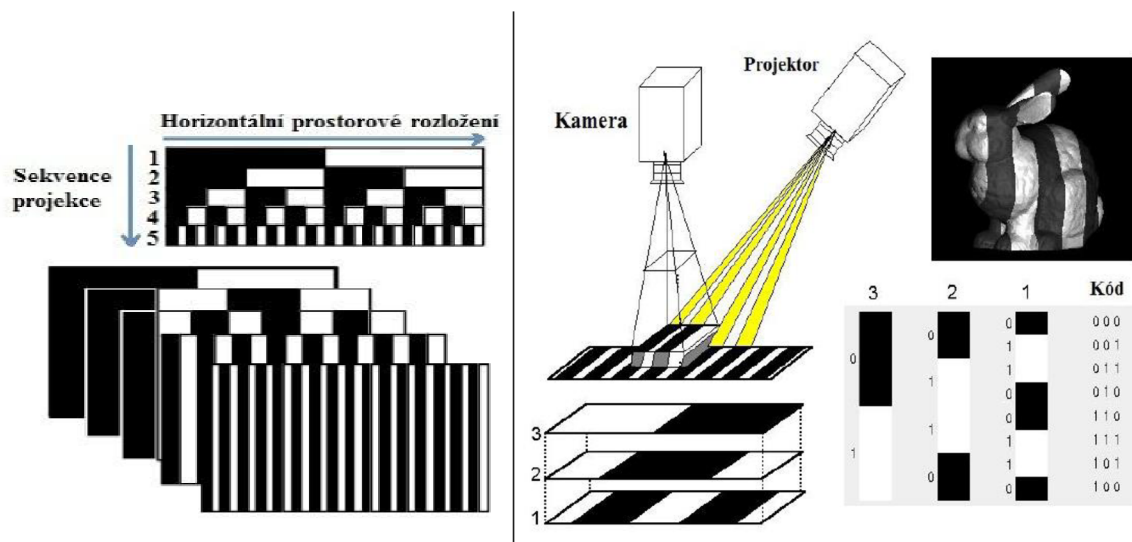
- Vysoké rozlišení a přesnost měření
- Vhodnost pro snímání barevných povrchů

Mezi nevýhody potom:

- Nemožnost její aplikace na pohybující se objekty
- Delší čas měření, který roste v závislosti na přesnosti měření

Vzory s binárním kódem

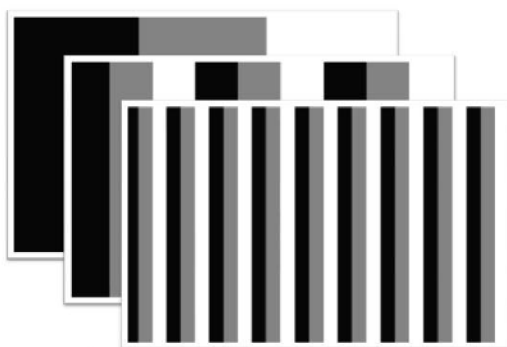
Binární kódování funguje na principu sekvenční projekce vzorů s černobílými pruhy, přičemž jsou tyto vzory kódovány pouze v jednom směru osy. Každý zakódovaný bod je potom identifikován na základě jeho intenzity. Kódová slova přiřazená jednotlivým pixelům jsou posloupností jedniček a nul získaných z promítaných vzorů. Binární kódování je znázorněno na Obr. 6 a). Z důvodu větší odolnosti vůči okolnímu šumu byl tento kód modifikován na šerý kód (viz Obr. 6 b), kde je Hammingova vzdálenost použitých kódových slov vždy rovna jedné. Hammingova vzdálenost určuje počet znaků, o které se po sobě jdoucí slova liší.



Obr. 6) Princip binárního a) vlevo a šedého b) vpravo kódování

Vzory s n-árním kódem

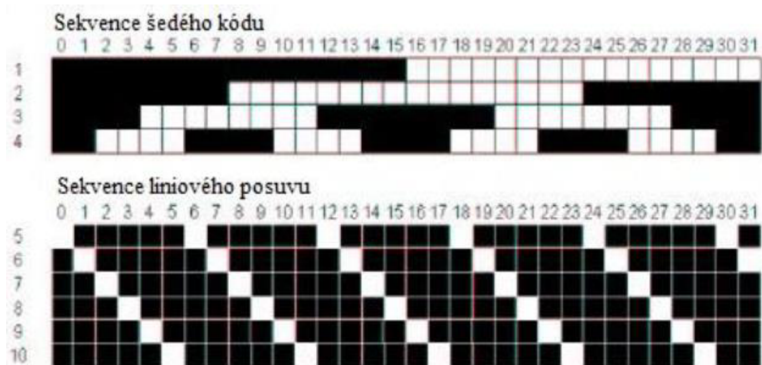
Vznikly za účelem snížení počtu promítaných vzorů při aplikaci binárního kódování rozšířením šedého kódu o abecedu n symbolů tak, že každý symbol abecedy reprezentuje určitou barvu z RGB modelu. Sekvence promítaných vzorů je patrná z Obr. 7.



Obr. 7) Vzory s n-árním kódem

Kombinace šedého kódu s fázovým posuvem

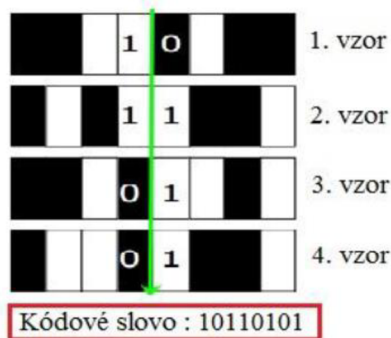
Metoda fázového posuvu promítá na povrch měřeného objektu sinusoidální vzory – periodický černobílý gradient. Projekce těchto vzorů má vliv na vysoké prostorové rozlišení, ovšem její nedostatky souvisejí s nerovnoměrností povrchu měřeného objektu. V případě, že nespojitost dvou povrchů je větší než dovolená, dochází k neúplnému rozbalení fáze a tím vznikají nepřesnosti měření. Metoda byla dále upravena použitím liniového posuvu, který místo sinusoidálních vzorů využívá projekci posouvajících černobílých pruhů. Kombinací šedého kódu s fázovým posuvem bylo dosaženo jednotné kodifikace pruhů a velmi přesné trojrozměrné rekonstrukce měřeného objektu (viz Obr. 8).



Obr. 8) Kombinace šedého kódu s liniovým fázovým posunem

Hybridní metody

Oproti ostatním metodám temporální kodifikace je snížen počet promítaných vzorů. Speciálně navržený algoritmus přiřazuje v aktuálním snímku hranice pruhů k místům s nejvyšším gradientem světelné intenzity. Výstupem algoritmu je kód charakterizující hranice dvou sousedních pruhů (viz Obr. 9). Hybridní metody lze aplikovat i na pomalu se pohybující objekty.



Obr. 9) Kódování vzorů na hranicích pruhů

2.4.2 Prostorová kodifikace

U této metody kodifikace je objekt měřen pouze jedním snímkem, proto není na rozdíl od temporální kodifikace časově závislá. Kódové slovo každého pixelu je vytvořeno z jeho barvy nebo intenzity pixelů z blízkého okolí. Velikost okolí je přímo úměrná počtu zakódovaných bodů a nepřímo úměrná počtu použitých barev. Problémem jsou nespojitosti objektu nebo jeho stíny v blízkosti daného pixelu.

Mezi výhody této kodifikace patří:

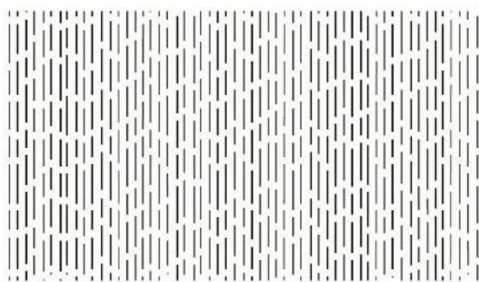
- Možnost zaznamenávat pohybující se objekty
- Možnost situování kódovacího systému do jednoho vzoru

Mezi nevýhody potom:

- Nižší rozlišení než u temporální kodifikace
- Složitější dekódování u vzorů s vyšším počtem barev
- Chyby měření způsobené nespojitostí měřených povrchů

Neformální kodifikace

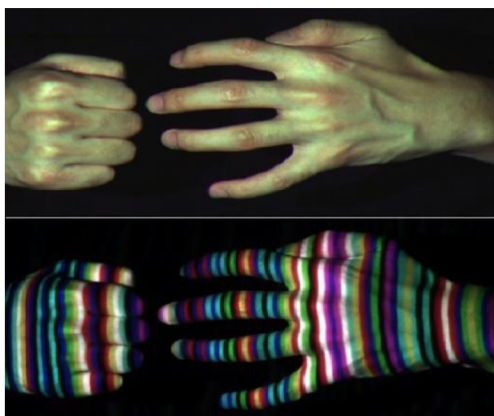
Využívá speciálně navržené vzory bez aplikace dosavadních matematických základů, kde jsou kódová slova získávána z menších podoblastí. Většinou využívá algoritmu tzv. brutální síly. Vzniklé segmenty jsou mapovány ve vzorech pomocí jejich pozic a vlastní délky. Ve vzoru zachyceném kamerou jsou s ohledem na sousedící segmenty dekodovány ty segmenty, které délkově odpovídaly těm promítaným. Po nalezení všech shod je pro určení zbývajících segmentů aplikován regionální růstový algoritmus. Délka těchto segmentů je závislá na použité optice a vzdálenosti kamery a projektoru od měřeného objektu. Příklad promítaného neformálního vzoru je uveden na Obr. 10. Snímání barevně složitých objektů není u této metody doporučováno. Koherence barevných paprsků s měřeným povrchem totiž způsobuje chyby v dekodování.



Obr. 10) Příklad vzoru neformální kodifikace

De Bruijnovy vzory

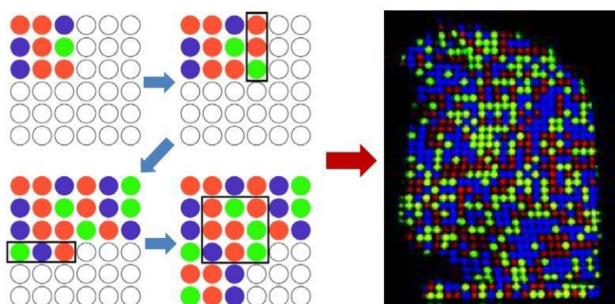
Na rozdíl od předchozích technik neformální kodifikace koriguje de Bruijnova posloupnost nedostatky, které vznikají v důsledku opakujících se okolí bodů. Vytváří totiž unikátní vzory bez opakujících se okolí. Zjednodušeně řečeno jsou pomocí této metody vytvořena kódová slova tak, že žádné z nich není ve výsledku obsaženo dvakrát. Toho je dosaženo například pomocí barevného vzoru, který obsahuje konkrétní pruh pouze jedenkrát (viz Obr. 11).



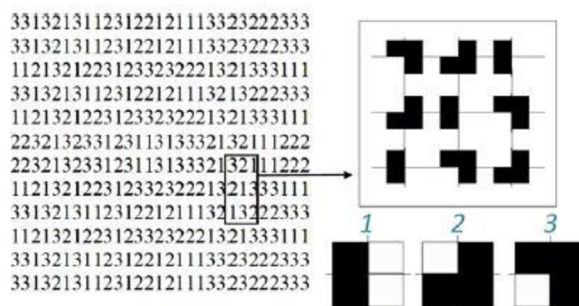
Obr. 11) Příklad projekce de Bruijnova vzoru

M-pole

Pro rekonstrukci měřeného objektu se využívá matematických vlastností matic, tzv. M-polí. Vzory tvořené M-polem jsou generovány pomocí pseudonáhodných sekvencí. Na základě reprezentujících elementů jsou tyto techniky rozděleny do dvou základních skupin. První skupinou jsou vzory obsahující barevné tečky, přičemž každá tečka reprezentuje jeden ze symbolů kódovací abecedy (viz Obr. 12). Zde se promítaný vzor skládá z jednotlivých oken, přičemž je algoritmus, který tato okna generuje založen na principu brutální síly. Druhou skupinou jsou vzory složené z geometrických tvarů, kde je každý tvar přiřazen k příslušnému symbolu (viz Obr. 13). Tato skupina využívá tzv. ternárního kódování. Prvky v poli musí mít rozdílná kódová slova korespondující nejen s vlastní hodnotou, ale také s hodnotou čtyř sousedních prvků.



Obr. 12) Princip tvorby maticových vzorů z barevných značek



Obr. 13) Princip ternárního kódování vzorů

2.4.3 Přímá kodifikace

Umožňuje jednosnímkové skenování. Pixely jsou u této metody zakódovány vlastní barvou nebo intenzitou, proto se promítané vzory skládají z širokého spektra barev a intenzit. Jednotlivé vlnové délky a projekční úhly poskytují jednodušší identifikaci souřadnic bodů.

Mezi výhody této kodifikace patří:

- Snížení počtu promítaných vzorů
- Vysoké rozlišení

Mezi nevýhody potom:

- Náchylnost přijímaného signálu na šum
- Nutnost použití speciálních projektorů a kamer
- Malá přesnost
- Nevhodnost pro měření pohyblivých objektů

Vzory s úrovněmi šedé

Využívají vzory s gradientem úrovně šedé barvy. Malá přesnost měření (řádově v cm).

Barevné vzory

U této techniky promítá projektor barevné světelné paprsky s prostorově závislou vlnovou délkou. Pro zaznamenání obrazu je nutné pořídit dva snímky přes různé barevné filtry. Tento způsob digitalizace vyžaduje speciální typ projektoru a kamery.

2.5 Matnicí prášky

Využívají se ke zmatnění lesklých a transparentních povrchů měřených objektů před samotným měřením. V mnoha případech by totiž takovéto povrchy bez příslušné úpravy vůbec nebylo možné měřit. Matnicí prášky mají zásadní vliv na přesnost bezkontaktního měření. Tloušťka nanesené vrstvy by měla být dostatečná a v maximální možné míře rovnoměrná. Pro zmatnění měřeného povrchu se obvykle využívá nástřiku křídovým nebo cyklododekanovým práškem, či oxidem titaničitým.

Křídový prášek

Hlavní složkou je uhličitan vápenatý (CaCO_3). Díky cenové dostupnosti patří mezi nejpoužívanější matnicí prášky. Doporučená nanášecí vzdálenost je 10-15 cm. Díky větší tloušťce nanesené vrstvy se nedoporučuje pro zmatňování kalibračních etalonů. [6]

Oxid titaničitý

Prášek z oxidu titaničitého (TiO_2) nanáší ve srovnání s ostatními zmatňujícími prášky znatelně slabší vrstvu, proto je vhodný pro přesná měření a případnou nutnost zmatnění kalibračních etalonů před kalibrací. Velikost částic oxidu titaničitého se pohybuje v rozmezí 200-350 nm. Vhodným nástřikem prášku je možné nanést tloušťku vrstvy pod 0,001 mm. Mezi jeho největší nevýhody patří znatelně vyšší cena a náročnost přípravy roztoku před samotným nanesením na povrch měřeného objektu. [6]

Cyklododekanový prášek

Cyklododekan ($\text{C}_{12}\text{H}_{24}$) je hydrofobní sloučenina patřící do skupiny nasycených alkalických uhlovodíků. Jeho nejužitečnější vlastností je schopnost samovolné sublimace. Doba odpařování nanesené vrstvy je závislá na její tloušťce, použitém rozpouštědle, teplotě okolí a teplotě zmatňovaného materiálu. Obvykle se pohybuje v rozmezí několika hodin až dnů. V případě nutnosti okamžitého odstranění nástřiku je cyklododekan možné očistit benzínem. Pro aplikaci nástřiku na delší dobu se doporučuje nanášecí vzdálenost 3-5 cm. Pro vytvoření souvislejší a jemnější vrstvy potom vzdálenost 6-10 cm. Větší vzdálenosti vedou ke krátké odpařovací době. Cyklododekan se běžně používá v kombinaci s rozpouštědlem. [6]

3 POPIS KONSTRUKCE A FUNKCE PŘÍSTROJŮ GOM ATOS A TRITOP

Německá firma GOM (Gesellschaft für Optische Messtechnik – Společnost pro optickou měřicí techniku) se zabývá vývojem, výrobou a prodejem optických měřicích systémů, které jsou určeny pro 3D měření tvaru objektů a deformací komponent, ty jsou založeny na technologii zpracování digitálního obrazu. [7]

Jedním z nejvýznamnějších produktů této firmy jsou systémy ATOS (Advanced Topometric Sensor – Pokročilý topometrický senzor). S využitím těchto systémů mohou být objekty měřeny rychle a s vysokým lokálním rozlišením. Systémy ATOS fungují na již výše zmíněném principu triangulace, při kterém na měřený objekt promítány vzorce strukturovaného světla, ty jsou zaznamenávány dvěma kamerami. Každé měření generuje více než 8 miliónů bodů. Pro kompletní digitalizaci měřeného objektu je nutné provést několik dílčích měření z různých úhlů. Díky kruhovým referenčním značkám, které musí být vylepeny buď přímo na měřeném objektu, měřicím podkladu, případně na pomocném fixačním rámu, může systém ATOS automaticky transformovat tato dílčí měření do společného souřadného systému. Naměřená data jsou pak k dispozici v podobě mračna bodů nebo ve formátu STL. Systémy ATOS jsou zpravidla samostatné systémy, které ovšem lze pro účely automatizace použít společně s otočnými stoly nebo roboty. [8]

3.1 Popis konstrukce a funkce systému ATOS III Triple Scan

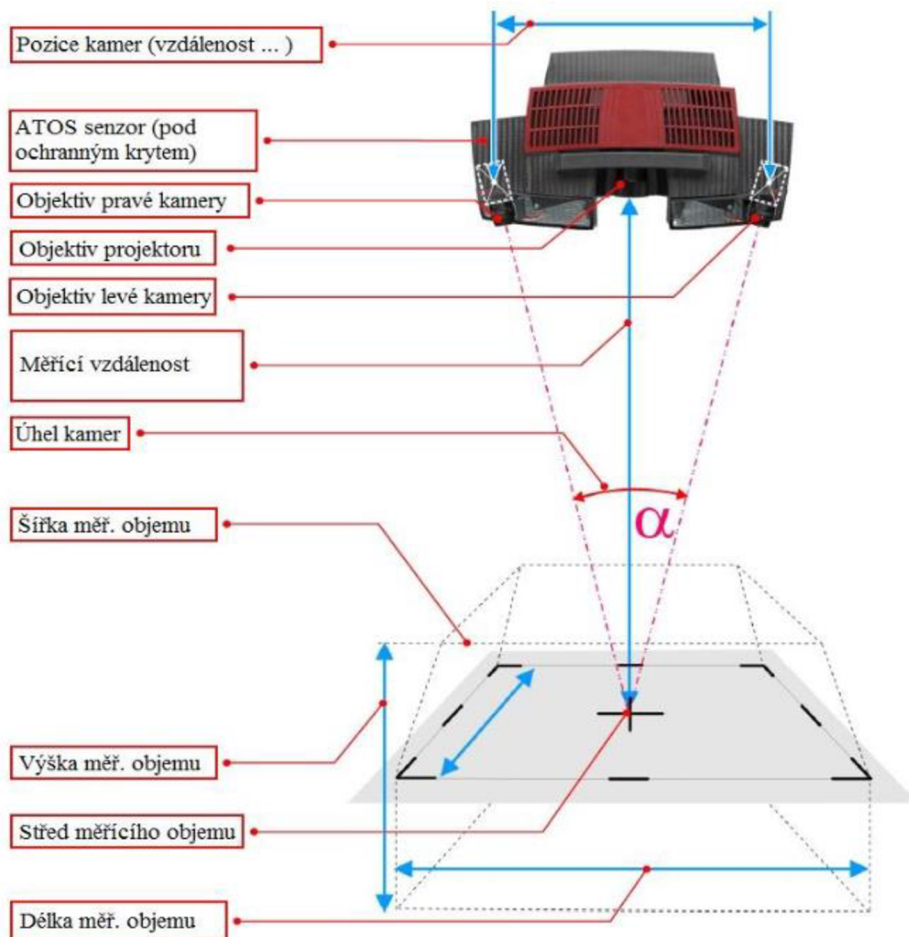
3D skener ATOS III Triple Scan (viz Obr. 14) disponuje speciálně vyvinutou měřicí a projekční technologií vyznačující se vysokou přesností měření. Triple Scan je pojmenován z toho důvodu, že operuje jako 3 senzory v jednom systému. Každá z kamer pracuje nezávisle na té druhé, ale zároveň pracují spolu. Vzniknou tedy tři 3D skeny z jednoho záběru. Tato technologie zlepšuje snímání lesklých povrchů, minimalizuje celkový počet skenů a redukuje celkový čas měření. Vysoké přesnosti je také dosaženo pomocí speciální optiky a kamer s rozlišením až 8 megapixelů. Díky širokým možnostem nastavení pro konkrétní aplikace umožňuje využití nejvyššího rozlišení i pro měření malých a velmi složitých objektů (do rozměru 38 mm). Využívá projekci strukturovaného modrého světla (Blue Light), díky kterému není měření závislé na okolních světelných podmínkách. Světlo může být promítáno v pruzích různě širokých, orientovaných a fázově posunutých. Ve spojení se systémem TRITOP nabízí možnost měřit díly o rozměrech větších než 30 m. [7, 9] Základní popis přístroje a používaných pojmů je uveden na Obr. 15.



Obr. 14) Systém ATOS III Triple Scan [7]

3.1.1 Hlavní části systémů ATOS

- Skenovací hlava složená z projekční jednotky a dvou CCD kamer
- Mobilní stojan (nabízí možnost polohování hlavy v pěti osách)
- Výkonný počítač vybavený softwarem od firmy GOM (vysoké grafické nároky)
- Nekódované referenční body (lepící, magnetické)
- Kvalifikační normály (panel a kříž)
- Otočný stůl
- Sonda pro dotykové měření GOM Touch Probe [1]



Obr. 15) Základní popis přístroje ATOS III Triple Scan a používaných pojmů [7]

Základní vlastnosti systému ATOS III Triple Scan jsou uvedeny v Tab 1. V Tab 2 jsou uvedeny nejpoužívanější měřicí objemy ve ŠKODA AUTO a.s. a doplňkové informace ke správnému nastavení systému. Druhá tabulka bude v dalším textu (s přihlédnutím k doporučené kalibrační metodice uvedené ve směrnici řady VDI / VDE 2634) zcela zásadní pro volbu vhodného kalibračního zkušební tělesa.

Tab 1) Tabulka základních vlastností systému ATOS III Triple Scan [8]

| Systém | ATOS III Triple Scan |
|------------------------|---|
| Počet pixelů na kameru | 8 000 000 |
| Plocha měření | 38 x 29 mm ² - 2000 x 1500 mm ² |
| Hustota bodů | 0,012 – 0,608 mm |
| Pracovní vzdálenost | 490 – 2330 mm |
| Pracovní teplota | 5 – 40 °C |

Tab 2) Tabulka měřicích objemů a doplňkových informací ke správnému nastavení systému ATOS III Triple Scan [8]

| Měřicí objem senzoru (délka x šířka x hloubka) [mm] | Doporučený minimální průměr referenčních bodů [mm] | Hustota naměřených bodů [mm] | Ohnisková vzdálenost objektivu projektoru [mm] | Ohnisková vzdálenost objektivu kamer [mm] | Měřicí vzdálenost [mm] | Úhel kamer [°] | Kvalifikační (kalibrační) normál a jeho rozměr [mm] |
|---|--|------------------------------|--|---|------------------------|----------------|---|
| 1400 x 1050 x 1050 | 8 | 0,399 | 20 | 20 | 1530 | 15 | Kříž 1400 |
| 1000 x 750 x 750 | 5 | 0,332 | 24 | 20 | 1280 | 18 | Panel 1000 |
| 700 x 530 x 520 | 3 | 0,213 | 24 | 20 | 830 | 27 | Panel 700 |
| 560 x 420 x 420 | 3 | 0,176 | 30 | 24 | 830 | 27 | Panel 560 |
| 320 x 240 x 240 | 1,5 | 0,104 | 50 | 40 | 830 | 27 | Panel 320 |

Pozn.: Uvedené hodnoty jsou pro Camera support 400.

3.1.2 GOM Touch Probe

Jedná se ruční dotykovou sondu kombinující celoplošné měření s dotykovým. Skládá se ze zkalibrovaného setu referenčních bodů rozmístěných na jednoduchém těle a dotykového hrotu (viz Obr.16). Pro měření objektů všech velikostí je k dispozici pět těchto sond. Hmotnost měřicí sondy se pohybuje okolo 100 g. Touch Probe umožňuje rychlé měření i v oblastech, které jsou složitě dostupné. Dále umožňuje přímé srovnávání s CAD modelem a rychlé proměření jednotlivých bodů a online ustavení. Měření 3D skenerem ATOS s dotykovou sondou Touch Probe je realizováno jedním systémem v jednom vyhodnocovacím softwaru. Mimo jiné umožňuje i rychlé měření se snadnou vzájemnou záměnou mezi měřením povrchu, jednotlivých bodů a analýzou. [7, 10]



Obr. 16) Paleta dotykových sond GOM Touch Probe [10]

3.1.3 ATOS Plus

Jedná se o fotogrammetrickou kameru s vysokým rozlišením (až 29 megapixelů) se speciálně vyvinutou optikou dovolující měřit rozlehlé oblasti s krátkými pracovními vzdálenostmi. Integrované osvětlení zajišťuje rovnoměrné rozložení světla bez ohledu na měřený objekt nebo okolní podmínky při měření. V podstatě je doplňkem rozšiřujícím stávající systém ATOS Triple Scan (viz Obr. 17) a slouží tak jako náhrada systému TRITOP. Systému Triple Scan poskytuje automatizovanou fotogrammetrii a vyšší přesnost měření. Řešení ATOS Plus je zároveň plně integrováno do digitalizačního a inspekčního softwaru GOM. [7, 10]



Obr. 17) Systém ATOS III Triple Scan doplněný o ATOS Plus (nad projektorem) [10]

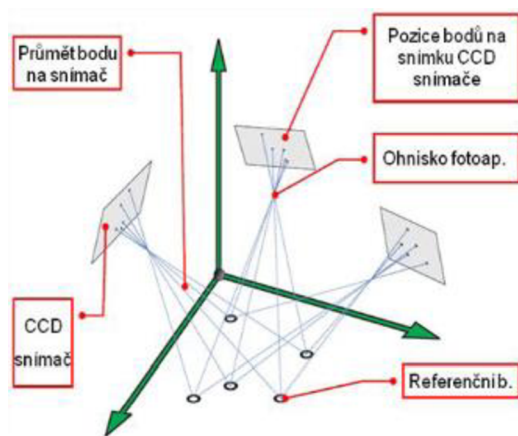
3.2 Popis konstrukce a funkce přístrojů TRITOP

Samostatný systém ATOS bez použití TRITOPu není z důvodu vysokých nepřesností vznikajících skládáním velkého počtu snímků vhodný pro měření objemnějších dílů. Ve společnosti ŠKODA AUTO a.s., kde se provádí měření hotových vozů, raznic a výlisků z plechu, je proto nutné využívat systémy ATOS v kombinaci s TRITOPem.

Jedná se o průmyslový bezkontaktní optický měřicí systém, který je určen k přesnému měření polohy diskrétních bodů. Princip měření je založen na fotogrammetrické metodě (viz Obr. 18).

Před vlastním měřením se na snímáný objekt umístí referenční body (samolepící, magnetické, případně speciální adaptéry). V současné době je trendem neumísťovat referenční body přímo na měřený objekt, ale na pozadí, případně na pomocné upínací prostředky. To je prováděno za účelem maximálního zautomatizování měření. Připravený měřený objekt je následně z různých úhlů snímán digitálním fotoaparátem. Software TRITOP na základě pořízených fotografických snímků vypočte 3D souřadnice referenčních bodů umístěných na měřeném objektu. TRITOP umožňuje měření objektů až do velikosti zhruba 30 m. Na takto velkých měřených objektech mohou být umístěny i tisíce

referenčních bodů. Přesnost měření tohoto systému je závislá na mnoha parametrech. Především na použitém fotoaparátu, tvaru a povrchu měřeného objektu a na jeho osvětlení. Objekt lze osvětlit bleskem fotoaparátu i okolním osvětlením. Při snímání velkých objemných objektů se s rostoucím počtem pořízených snímků sčítají chyby snímání. [1]



Obr. 18) Princip měření se systémem TRITOP [1]

3.2.1 Hlavní části systému TRITOP (viz Obr. 19)

- Digitální fotoaparát s vysokým rozlišením
- Paměťové medium (např. PCMCIA)
- Blesk
- Kódované referenční body
- Nekódované referenční body
- Referenční tyče
- Teleskopická tyč
- Hranové adaptéry
- Výkonný počítač
- Software TRITOP pro vyhodnocení, analýzu a úpravu snímků a naměřených výsledků [1, 11]

Fotoaparát:

Digitální zrcadlovka s rozlišením 4992 x 3328 pixelů vybavená speciálním objektivem, dálkovým ovládním a externím bleskem. Objektiv fotoaparátu je stavitelný a je vybaven aretačními šrouby. Pro snímání měřeného objektu z výškových poloh lze fotoaparát připevnit na teleskopickou tyč. [1]



Obr. 19) Hlavní části systému TRITOP [12]

3.2.2 Nekódované referenční body

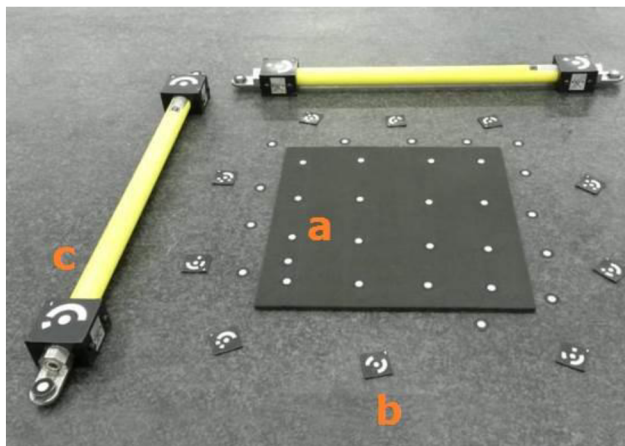
Jedná se o jednoduché černobílé kruhové značky (viz Obr. 20 a), které se používají k určení 3D souřadnic měřeného objektu. Velikost bodů je závislá na rozměrech měřeného objektu. Při vylepování bodů je nutné zajistit, aby byl každý z nich vidět alespoň ze třech různých poloh fotoaparátu. Kromě systému TRITOP je využívá i systém ATOS. Správné rozmístění těchto bodů je závislé na tom, který systém použijeme. [8]

3.2.3 Kódované referenční body

System kromě výše popsaných nekódovaných referenčních bodů využívá pro orientaci v prostoru i body kódované (viz Obr. 20 b). Ty slouží k identifikaci jednotlivých snímků a automatickému určování polohy fotoaparátu. Každý bod má v sobě zakódovanou číselnou hodnotu, kterou je systém schopen automaticky rozpoznat. Body slouží k určení polohy souřadného systému v prostoru, nikoliv k zachycení 3D souřadnic měřeného objektu. Při zaznamenávání obrazu je z důvodu zaručení co nejvyšší přesnosti měření nutné zahrnout do každého snímku co nejvyšší počet těchto bodů. System TRITOP dokáže pracovat až s 420 kódovanými referenčními body. [1, 8]

3.2.4 Referenční tyče – scale bary

U systému TRITOP jsou využívány jako měřítka vzdálenosti. Na obou koncích těchto tyčí jsou ve vzájemně definovaných vzdálenostech nalepeny kódované referenční body (viz Obr. 20 c). Délka tyčí se volí s ohledem na měřený objekt. Obecně se doporučuje použití dvou tyčí o přibližně stejné délce jakou má měřený objekt. Referenční tyče se při měření umísťují co nejbližší k měřenému objektu, nebo přímo na něj. [1, 8]



Obr. 20) Nekódované (a) a kódované (b) značky a referenční tyče (c) [13]

4 PROBLEMATIKA KALIBRACÍ A JEJICH ČLENĚNÍ

Před samotným návrhem kalibrační metodiky je nutné rozdělit si používaná kalibrační / zkušební tělesa a artefakty do správných kategorií a definovat jednotnou terminologii.

Nejprve k pojmu kalibrace, která je dle Mezinárodního metrologického slovníku [14] definována jako:

„činnost, která za specifikovaných podmínek v prvním kroku stanoví vztah mezi hodnotami veličiny s nejistotami měření poskytnutými etalony a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami měření a ve druhém kroku použije tyto informace ke stanovení vztahu pro získání výsledku měření z indikace“

S následujícími poznámkami:

„POZNÁMKA 1 Kalibrace smí být vyjádřena údajem, kalibrační funkcí, kalibračním diagramem, kalibrační křivkou nebo kalibrační tabulkou. V některých případech se smí skládat ze součtových nebo násobných korekcí indikace s přidruženou nejistotou měření.

POZNÁMKA 2 Kalibrace nemá být zaměňována s justováním měřicího systému, často mylně nazývaným „samokalibrace“, ani s ověřením kalibrace.

POZNÁMKA 3 Samotný první krok ve výše uvedené definici je často chápán jako kalibrace.“

Z výše uvedeného jsou pro tuto práci relevantní především Poznámky 2 a 3. Problematiku kalibrací je proto nutné rozdělit do třech částí.

První částí je tzv. „samokalibrace“ přístroje ATOS, která se provádí před měřením. K tomuto úkonu jsou používána tělesa typu panel nebo kříž, která jsou vždy součástí dodávky přístroje.

Druhou částí je pak kalibrace těchto kvalifikačních normálů.

Pro tuto práci je nejdůležitější třetí část - samotná kalibrace (rekalibrace) celého systému ATOS a TRITOP, která se provádí na zkušebních tělesech typu koule nebo ball bar. Tato část souvisí s Poznámkou 3.

Autor této práce je aktivním členem *TNK 7 - Technické normalizační komise zabývající se rozměrovou a geometrickou specifikací produktu a jejich ověřováním*. Tato komise funguje pod *Úřadem pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. Autor je proto detailně obeznámen s problematikou výkladu a nejednotností metrologické terminologie, především pak v oblasti kalibrací souřadnicových měřicích strojů a souvisejících pojmů - kalibrace vs. verifikace (ověření) kalibrace a zkoušení (podrobněji například zde [15]). Pro orientaci v dalším textu autor navrhl jednotnou terminologii.

4.1 Použitá terminologie

Pro usnadnění orientace v dalším textu autor zavádí následující terminologii.

4.1.1 Kalibrace (rekalibrace)

Tímto pojmem je v dalším textu označen první krok z definice kalibrace (Poznámka 3). U tak složitých měřicích systémů jako je právě ATOS může kalibraci v plném rozsahu provést pouze výrobce nebo oprávněný servisní zástupce. Uživatel může v SW změnit pouze hodnoty kvalifikačních normálů. Interně lze provádět pouze ověření kalibrace.

4.1.2 Kvalifikační normál

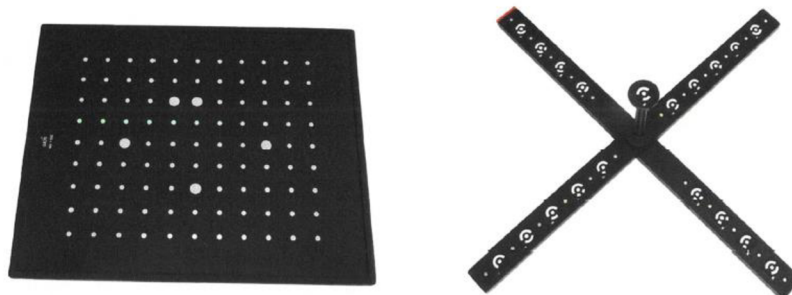
Označení pro tělesa typu panel a kříž používaná k samokalibraci přístrojů ATOS. Tato tělesa autor za kvalifikační normály označil z toho důvodu, že u klasických dotykových souřadnicových měřicích strojů se pro referenční kouli používá právě označení kvalifikační normál. Referenční koule se rovněž používá před měřením k vytvoření souřadného systému.

4.1.3 Zkušební těleso

V souladu s ČSN EN ISO 10 360-1 [16] byly takto souhrnně označeny etalony a artefakty používané ke kalibraci přístrojů ATOS a TRITOP.

4.2 Kvalifikační normály používané pro samokalibraci přístrojů ATOS

Systémy ATOS využívají pro samokalibraci kvalifikační normály typu panel a kříž (viz Obr. 21), které jsou dostupné v různých rozměrech. Jejich použití závisí na zvoleném měřicím objemu, respektive typu objektivu (viz Tab. 2 v kapitole 3.1.1). Tyto normály jsou vybaveny referenčními body, které v sobě nesou informaci typu scale bar, tj. definované vzdálenosti mezi specifikovanými body. Panely mají definovanou jednu nebo dvě tyto vzdálenosti. Kříže mají vzdálenost definovanou na každém rameni, tedy celkem dvě. [8]

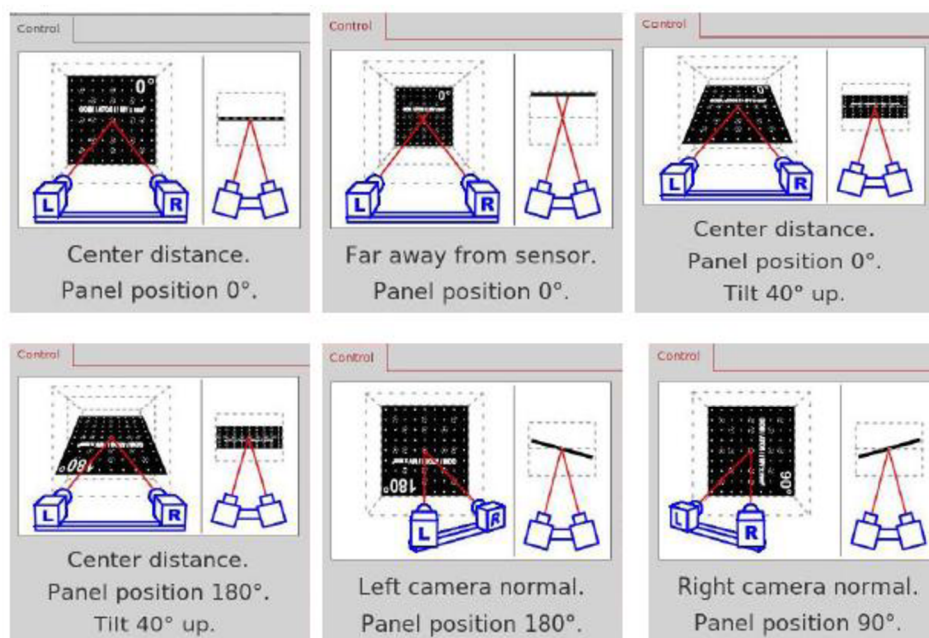


Obr. 21) Kvalifikační normály používané pro samokalibraci přístrojů ATOS (vlevo panel, vpravo kříž) [8]

4.2.1 Samokalibrace přístrojů ATOS

Je nutná před započítím prvního měření (po vybalení a instalaci), při výměně objektivu, a změně úhlu kamer. Změny v nastavení projektoru nemají na kalibraci vliv. Před vlastní samokalibrací výrobce doporučuje zapnout přístroj a nechat ho 5 – 10 min. zahřát, aby kalibrace proběhla v provozních podmínkách. Předpokladem pro úspěšnou kalibraci je správné nastavení senzoru, tedy volba měřicího objemu (vhodného objektivu) v závislosti na rozměrech měřeného objektu. V závislosti na měřicím objemu se pro samokalibraci použije buď panel, nebo kříž o správných rozměrech (viz Tab. 2 v kapitole 3.1.1). Samokalibrace a polohování kvalifikačního normálu pak probíhá v SW dle zobrazovaných

pokynů (viz Obr. 22). Po správně provedené kalibraci by měla kalibrační odchylka ležet v rozmezí hodnot 0,01 až 0,04 pixelů. Zároveň nesmí být odchylka naměřené (indikované) hodnoty větší než 0,005% od zkalibrované hodnoty kvalifikačního normálu. Velká odchylka značí použití nesprávného kvalifikačního normálu nebo jeho špatné hodnoty (nutná recalibrace). Po takto provedené samokalibraci lze přistoupit k vlastnímu měření. [8]



Obr. 22) Polohy kvalifikačního normálu a natočení kamer při samokalibraci přístrojů ATOS [1]

4.2.2 Samokalibrace systému TRITOP

Neprovádí se, protože systém není možné jakkoliv nastavit. Pro správné odměřování využívá přímo při měření referenční tyče s definovanými (zkalibrovanými) vzdálenostmi kódovaných referenčních bodů (viz kapitola 4.3).

4.3 Kalibrace kvalifikačních normálů a referenčních tyčí

Z důvodu přesného odměřování celého systému (ATOS i TRITOP) je vhodné kalibrovat i kříže, panely a referenční tyče. Výrobce tvrdí, že v případě kdy vyjde kalibrace celého systému, musí logicky vyjít i kalibrace kvalifikačních normálů, jelikož na ně byl celý systém nastaven (samokalibrován). Nicméně ve společnosti ŠKODA AUTO a.s. se provádí i kalibrace těchto normálů a tyčí. Samotná kalibrace pak probíhá buď na optickém souřadnicovém měřicím stroji Werth VideoCheck UA, nebo na klasickém dotykovém souřadnicovém měřicím stroji vybaveném optickou snímací hlavou. Volba měřicího stroje je závislá na velikosti kvalifikačního normálu. Na přístroji Werth VideoCheck UA je možné kalibrovat normály do rozměru 400 mm x 400 mm x 200 mm. Ve společnosti ŠKODA AUTO a.s. se dále pro kalibraci rozměrnějších normálů a referenčních tyčí využívá souřadnicový měřicí stroj ZEISS Prismo 7 Navigator vybavený 2D optickou snímací hlavou ViScan (viz Obr. 23), která je montována na otočnou hlavu RDS. ViScan disponuje vlastní osvětlovací jednotkou a až sedmi různými objektivy. Vhodný objektiv je opět nutné volit s ohledem na velikost kalibrovaného referenčního bodu. K volbě vhodného objektivu slouží Tab 3. Příklad snímku nekódovaného referenčního bodu ze systému ViScan je uveden na Obr. 24.

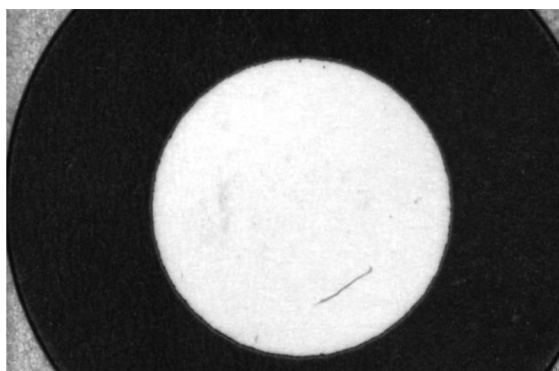
Při kalibraci referenčních tyčí se odměřují vzdálenosti nekódovaných i kódovaných referenčních bodů (viz Obr. 20 c). Příklad kalibrovaných vzdáleností kvalifikačního normálu typu panel je patný z Obr. 25.

Tab 3) Kritéria pro výběr vhodného objektivu ZEISS ViScan [17]

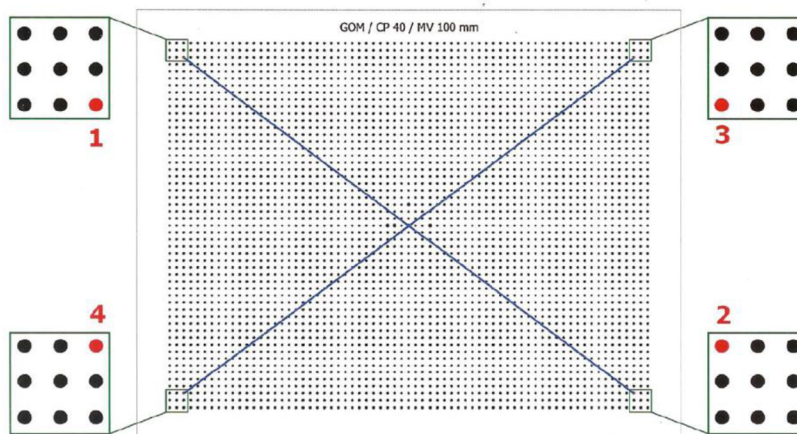
| Faktor měřítka | Velikost měřicího pole [mm ²] | Rozlišení při pixelově přesném měření [μm] |
|----------------|---|--|
| 0,14x | 34,3 x 25,7 | 42,9 |
| 0,3x | 16 x 12 | 20 |
| 0,5x | 9,6 x 7,2 | 12 |
| 1x | 4,8 x 3,6 | 6 |
| 2x | 2,4 x 1,8 | 3 |
| 4x | 1,2 x 0,9 | 1,5 |
| 6x | 0,8 x 0,6 | 1,0 |



Obr. 23) 2D optická snímací hlava ViScan od firmy ZEISS [18]



Obr. 24) Snímek nekódovaného referenčního bodu o průměru 5 mm ze systému ViScan (objektiv 0,5x) [25]



Obr. 25) Příklad kalibrace vzdálenosti vybraných bodů na kvalifikačním normálu typu panel [19]

4.4 Kalibrace přístrojů ATOS a TRITOP

Již v úvodu bylo řečeno, že v současnosti neexistují žádné normy, které by se zabývaly kalibrací těchto přístrojů. Řada norem ISO 10 360 je sice specificky zaměřena na *Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů a systémů*, ale stále nezahrnuje postupy pro systémy typu ATOS a TRITOP. Jediná použitelná odborná literatura, která je zaměřena na 3D optické měřicí systémy a ze které se dá při návrhu kalibračního postupu v současné době vycházet, je řada směrnic VDI/VDE 2634, 1-3 [20, 21, 22]. První část řady těchto směrnic je zaměřena na zobrazovací systémy s bodovým snímáním a jako taková byla využita ke kalibraci systému TRITOP. Část druhá se zabývá optickými systémy založenými na plošném skenování, ta ovšem byla aplikována pouze v minimálním rozsahu (výpočet nejistot), jelikož je zaměřena na vyhodnocení 3D souřadnic pouze z jednoho snímku – tzv. „single view“. Naopak nejvíce využívaná byla část třetí, která je zaměřena na vícehledové systémy založené na plošném skenování. Třetí část byla aplikována při návrhu kalibračního postupu na systémy ATOS.

4.5 Kalibrační metodika a zkušební tělesa výrobce (GOM)

Výrobce při kalibraci přístrojů ATOS taktéž vychází ze směrnice VDI/VDE 2634-3 [22] s několika málo odlišnostmi. Například celkový měřicí objem definuje jako měřicí objem senzoru. S ohledem na tuto skutečnost si navrhl a vyrobil vlastní zkušební tělesa. Ke kalibraci tedy používá zkušební tělesa nesoucí označení PSA (Probing / Spacing Artifact - viz Obr. 26). Tělesa jsou složena z několika párů koulí o různých průměrech, vzdálenostech a vylepených referenčních bodů. Průměry koulí a vzdálenosti jejich středů jsou zkalibrovány. Tato tělesa ovšem mají dvě nevýhody. V první řadě využívají vysoce lesklé koule, které je před kalibrací nutné zmatnit. K tomuto účelu výrobce používá nástřík oxidem titaničitým. Nerovnoměrnost nástříku vnáší do procesu kalibrace další chyby / nejistoty. Výrobce pro proces zmatnění nabízí speciální kryt, který zabrání nanesení nástříku na referenční body. V druhé řadě potom nespĺňují jednu z doporučujících podmínek směrnice VDI/VDE 2634-3 [22], a to sice, že je třeba vyvarovat se snímání obou koulí zkušebního tělesa v jednom snímku. Zkušební tělesa navržená v kapitole 5 *Návrh a realizace vhodných zkušebních těles* oba tyto nedostatky eliminují. Další nevýhodou je poměrně vysoká cena zkušebních těles od výrobce.



Obr. 26) Firmou GOM navržená zkušební tělesa pro kalibraci přístrojů ATOS (vpředu PSA400 s devíti páry koulí a vzadu PSA900 se čtyřmi páry koulí) [23]

5 NÁVRH A REALIZACE VHODNÝCH ZKUŠEBNÍCH TĚLES

V této kapitole je uveden seznam všech zkušebních těles, která jsou nutná ke kalibraci přístrojů ATOS a TRITOP. Při volbě zkušebních těles bylo rozhodováno mezi nákupem nových nebo využitím a úpravou stávajících těles. Společnost ŠKODA AUTO a.s. disponuje širokou paletou zkušebních těles používaných pro kalibrace taktálních souřadnicových měřicích strojů, proto bylo s přihlédnutím k finančním nárokům rozhodnuto, že budou v maximální možné míře využita tělesa stávající. Vybraná tělesa tedy byla upravena pro potřeby kalibrací optických souřadnicových měřicích strojů. Zkušební tělesa byla navržena a vyrobena / upravena v souladu s požadavky směrnic VDE/VDE 2634 [20, 21, 22].

5.1 Zkušební tělesa pro kalibraci systému ATOS

V Tab 4 jsou uvedeny doporučené limitní rozměry zkušebních těles, které směrnice definuje dle použitého měřicího objemu senzoru. Uvedené měřicí objemy byly zvoleny jako reprezentativní výběr těch nejpoužívanějších ve společnosti.

Tab 4) Tabulka doporučených limitních rozměrů zkušebních těles pro nejpoužívanější objektivy ve ŠKODA AUTO a.s. [25]

| Označení objektivu (MV) | Měřicí objem senzoru (délka x šířka x výška) [mm] | L _S | L ₀ | Zkoušené parametry | | | |
|-------------------------|---|--|---|------------------------------|-----------------------------|--|---|
| | | | | PF, PS, SD, E (pro ball bar) | | SD, E (pro ball bar) | |
| | | Prostorová úhlopříčka senzorem měřitelného objemu [mm] | Prostorová úhlopříčka měřicího objemu specifikovaná výrobcem (pro L _S *2) [mm] | Minimální průměr koule [mm] | Maximální průměr koule [mm] | Nejmenší zkoušená délka (pro L _S *2) [mm] | Minimální rozměr největší zkoušené délky (pro L _S *2) [mm] |
| 1400 | 1400 x 1050 x 1050 | 2041 | 4028 | 40,9 | 408,2 | 1400 | 2722 |
| 1000 | 1000 x 750 x 750 | 1458 | 2918 | 29,2 | 291,6 | 1000 | 1944 |
| 700 | 700 x 530 x 520 | 1021 | 2042 | 20,4 | 204,1 | 694 | 1361 |
| 560 | 560 x 420 x 420 | 817 | 1634 | 16,4 | 163,3 | 560 | 1089 |
| 320 | 320 x 240 x 240 | 467 | 934 | 9,4 | 93,3 | 320 | 623 |

5.1.1 Zkušební koule pro kalibraci snímacího systému (PF, PS)

Z výše uvedené tabulky je patrné, že pro kalibraci všech objektivů jsou nutné minimálně dvě zkušební koule. Z praktických důvodů byly zvoleny koule o průměrech 25 mm a 100 mm. Menší zkušební těleso bylo nutné sestavit z dle technického zadání zakoupené koule a interně vyrobeného stojanu (dřívku a základny).

Technické zadání na zkušební kouli o průměru 25 mm:

- Průměr 25 mm \pm 0,01 mm
- Tvarová odchylka max. 2 μ m se zanedbatelnou drsností povrchu
- Materiál: Keramika (matný povrch z důvodu snímání)
- Kalibrační protokol

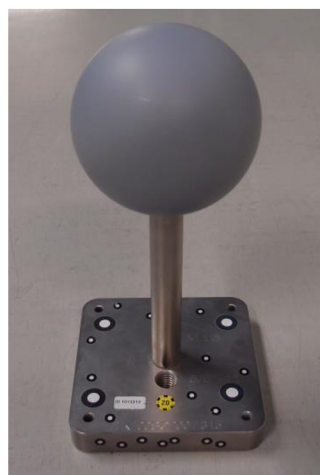
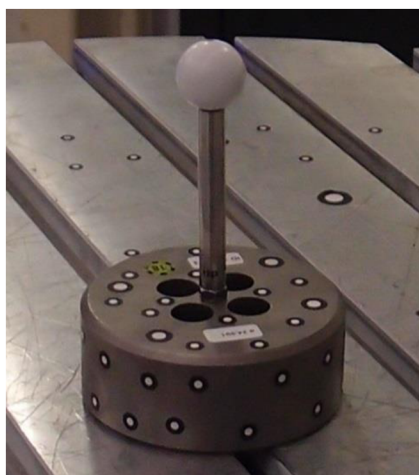
Koule byla zakoupena prostřednictvím firmy HHW-Hommel Hercules. Z důvodu možnosti optického snímání u přístrojů se spodním osvětlením (např. Werth VideoCheck UA) byly v základně úmyslně vyvrtány 4 otvory. Dřík a základnu zkušebního tělesa je z důvodu odlesku nutné před každou kalibrací zmatnit nástřikem oxidu titaničitého.

Větší koule byla součástí verifikační sady na laser trackery od firmy Leica, a proto postačila úprava vylepením nekódovaných referenčních bodů. Pravidla pro vylepování referenčních bodů jsou uvedena v kapitole 9 *Doporučení pro praxi*. Koule je opět vyrobena z keramiky, která vykazuje velmi nízkou odrazivost promítaných světelných vzorů. U tohoto zkušebního tělesa je stejně jako u koule o průměru 25 mm nutné před kalibrací zmatnit dřík i základnu.

Zkalibrované hodnoty obou použitých zkušebních těles jsou uvedeny v Tab 5. Vyrobená a upravená zkušební tělesa jsou znázorněna na Obr. 27 a) a 27 b).

Tab 5) Zkalibrované hodnoty použitých zkušebních těles – koulí [25]

| Zkušební těleso | Zkalibrovaný \varnothing [mm] | Nejistota kalibrace \varnothing [μ m] | Tvarová odchylka [μ m] | Nejistota kalibrace tvaru [μ m] |
|--|---------------------------------|--|-----------------------------|--------------------------------------|
| Koule \varnothing 25 mm | 24,993 | 0,15 | 1,58 | 0,08 |
| Koule \varnothing 100 mm | 100,0231 | 1,5 | 5,2 | 1,5 |



Obr. 27) Zkušební tělesa - koule pro kalibraci snímacího systému a) vlevo \varnothing 25 mm, b) vpravo \varnothing 100 mm [25]

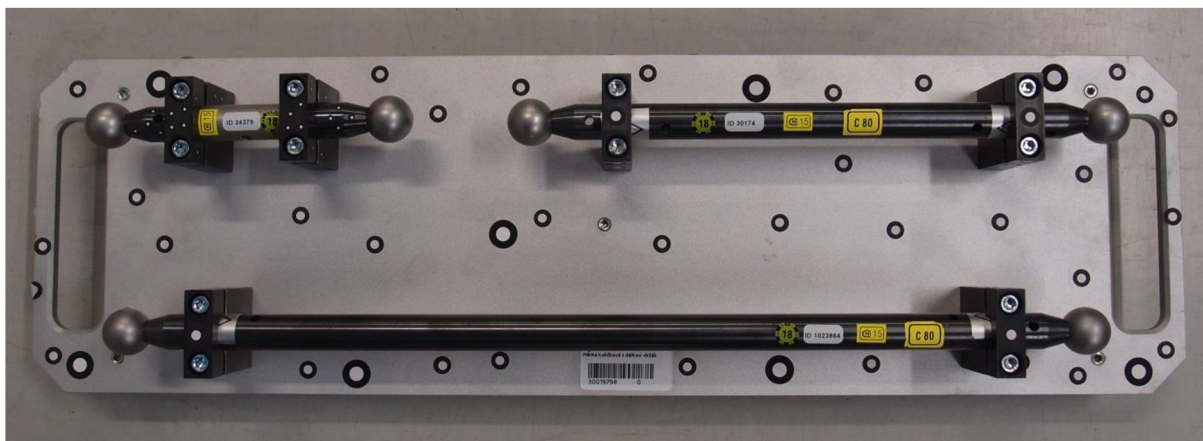
5.1.2 Ball bary pro kalibraci vzdáleností (SD, E)

Z Tab 5 je zřejmé, že pro kalibraci správného odměřování vzdáleností bylo nutné navrhnout několik zkušebních těles o různých délkách. V souladu s požadavky směrnice VDI/VDE 2634-3 [21] a v rámci maximální časové efektivity během kalibrace, bylo pro posouzení parametrů SD a E navrženo celkem šest různě dlouhých zkušebních těles typu ball bar. Z toho pět se dvěma koulemi a jedno s více koulemi. Na těchto tělesech se vyhodnocuje vzdálenost středů koulí (SD) a maximální vzdálenost površek koulí (E). Parametr E není možné z konstrukčních důvodů vyhodnocovat na zkušebním tělese s více koulemi (tzv. multi-ball baru).

Čtyři nejkratší tělesa byla dle technického zadání vyrobena firmou K.S. – prof. Ing. Karlem Studenovským, DrSc. Následně byla k těmto tělesům interně vyrobena základna, která byla polepena nekódovanými referenčními body. Hotová zkušební tělesa jsou znázorněna na obrázcích Obr. 28 a Obr. 29. Krátké ball bary byly vyrobeny pro kalibrace menších objektivů nebo fotogrammetrických přístrojů od jiných výrobců.

Technické zadání na ball bary:

- Minimální průměr koulí 25 mm
- Materiál koulí: korozivzdorná ocel
- Stupeň zmatnění (zvolená povrchová úprava) dle provedených testů ve společnosti
- Stupeň přesnosti koulí - G 40 dle ČSN ISO 3290:2000 [24]
- Zanedbatelná drsnost povrchu koulí
- Výroba čtyř těles o délkách 150 mm, 300 mm, 500 mm a 1000 mm
- Materiál distančních tyčí: korozivzdorná ocel s černěným povrchem
- Kalibrace v ČMI



Obr. 28) Ball bary o délkách 150mm, 300 mm a 500 mm [25]



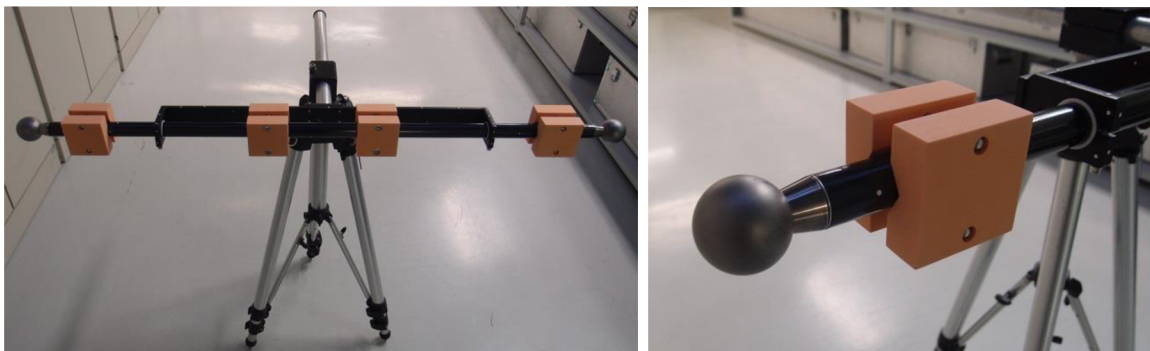
Obr. 29) Ball bar o délce 1000 mm [25]

Nejdelší zkušební těleso od firmy Steinbichler se dvěma koulemi již bylo k dispozici. Skládá se z koulí o průměrech 50 mm a uhlíkové distanční tyče. Celková délka zkušebního tělesa je 1140 mm. Opět byla nutná úprava vylepením referenčních bodů. Z důvodu nutnosti nalepení těchto bodů na rovnou plochu byly vyrobeny pomocné příložky. Ty jsou montovány na uhlíkovou distanční tyč. Složené těleso je vidět na Obr. 30.

Zkalibrované hodnoty ball barů se dvěma koulemi jsou uvedeny v Tab 6. U těchto těles zatím bohužel nebyly zkalibrovány průměry koulí ani jejich tvarové odchylky. Tento nedostatek bude odstraněn v rámci následující kalibrace. Nejdůležitější hodnotou těchto zkušebních těles jsou zkalibrované vzdálenosti středů koulí.

Tab 6) Zkalibrované hodnoty použitých zkušebních těles – ball barů se dvěma koulemi [25]

| Ball bar | Zkalibrovaná hodnota rozteče středů koulí [mm] | Nejistota kalibrace [μm] | Koeficient lineární teplotní roztažnosti distanční tyče [10^{-6} K^{-1}] |
|--------------------|--|---------------------------------------|--|
| L = 150 mm | 150,5022 | 1 | 9,9 |
| L = 300 mm | 300,9703 | 1,1 | 9,9 |
| L = 500 mm | 501,0135 | 1,2 | 9,9 |
| L = 1000 mm | 999,6381 | 4,2 | 9,9 |
| L = 1140 mm | 1140,0558 | 4,2 | 0,1 |



Obr. 30) Ball bar o délce 1140 mm (zatím bez vylepených nekódovaných referenčních bodů na pomocných příložkách) [25]

Nejdelším dostupným zkušebním tělesem je pětimetrový ball bar od firmy KOBAS jedenácti koulemi o průměru 30 mm a deseti uhlíkovými distančními tyčemi o délkách 500 mm – tzv. multi-ball ball bar, který byl upraven ze stávajícího tělesa pro kalibraci taktilních souřadnicových měřicích strojů. Úprava tělesa se skládala z následujících částí:

- Dokoupení matných koulí
- Výroba příložných destiček
- Vylepení nekódovaných referenčních bodů

Provedení sestaveného tělesa je patrné z kompilace fotografií na Obr. 31.

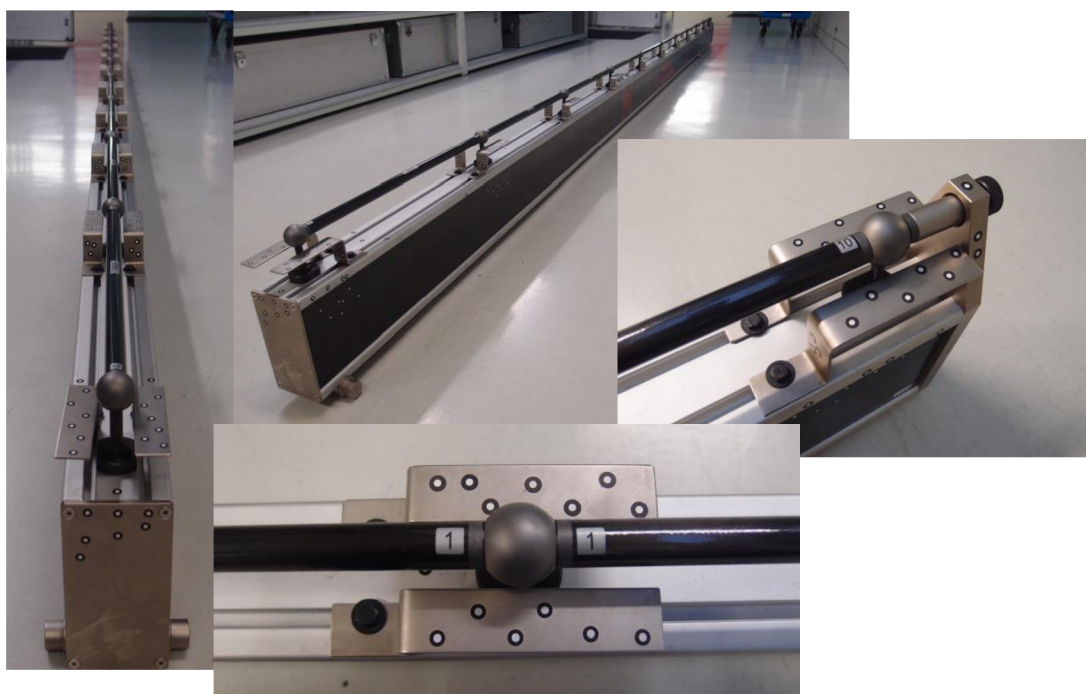
Na první pohled se může zdát, že toto zkušební těleso by se díky svým rozměrům dalo použít i pro kalibraci systému TRITOP, ovšem není tomu tak z následujících důvodů. Těleso je složeno z několika dílčích částí, proto při každé montáži vznikají odchylky, které by měly negativní vliv na výsledky kalibrací. Rám nosné části tělesa je vyroben z hliníku (velká

teplotní roztažnost) a skládá se ze třech hlavních částí. Vliv montáže v kombinaci s tepelnou roztažností tedy vylučují možnost vylepení a následného zkalibrování referenčních bodů na nosné části tělesa. Referenční body je tak možné aplikovat pouze na distanční tyče. Ty ovšem nemají dostatečnou délku a navíc společně nikdy neleží v ideální přímce.

Zkalibrované vzdálenosti středů koulí multi-ball ball baru jsou uvedeny v Tab 7. Koeficient lineární teplotní roztažnosti použitých uhlíkových distančních tyčí je $0,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Tab 7) Zkalibrované vzdálenosti středů koulí multi-ball bar baru [25]

| Označení vzdálenosti | Zkalibrovaná vzdálenost středů [mm] |
|----------------------|-------------------------------------|
| 0 - 1 | 500,1649 |
| 1 - 2 | 500,0531 |
| 2 - 3 | 500,0635 |
| 3 - 4 | 500,0241 |
| 4 - 5 | 500,1194 |
| 5 - 6 | 500,0538 |
| 6 - 7 | 500,0815 |
| 7 - 8 | 500,0589 |
| 8 - 9 | 500,1385 |
| 9 - 10 | 500,0544 |



Obr. 31) Upravené zkušební těleso od firmy KOBA [25]

5.2 Zkušební těleso pro kalibraci systému TRITOP

Pro kalibraci systému TRITOP bylo upraveno zkušební těleso typu scale bar od firmy UNIMETRIC (viz Obr. 32). Jedná se o jednodílné těleso vyrobené z uhlíkového kompozitu, na kterém je umístěno pět matných ocelových koulí o průměru 22 mm a devět kuželových misek o dvou průměrech, 8 mm a 12,7 mm. Těleso bylo upraveno vylepením celkem devíti nekódovaných referenčních bodů o průměru 5 mm, jejichž polohy (vzájemné vzdálenosti) byly zkalibrovány pomocí laser interferometru v ČMI. Výsledky kalibrace jsou uvedeny v Tab 8. Koeficient lineární teplotní roztažnosti scale baru je $0,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Tab 8) Zkalibrované vzdálenosti středů referenčních bodů na scale baru [25]

| Fotogrammetrické značky – č./poz. | Vzdálenost středů [mm] | Fotogrammetrické značky – č./poz. | Vzdálenost středů [mm] |
|-----------------------------------|------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| 1 – 2 | 200,0204 | 1 - 2 | 200,0204 |
| 2 – 3 | 200,0142 | 1 - 3 | 400,0346 |
| 3 – 4 | 200,0063 | 1 - 4 | 600,0408 |
| 4 – 5 | 200,0037 | 1 - 5 | 800,0445 |
| 5 – 6 | 200,0009 | 1 - 6 | 1000,0454 |
| 6 – 7 | 200,0121 | 1 - 7 | 1200,0574 |
| 7 – 8 | 199,9760 | 1 - 8 | 1400,0334 |



Obr. 32) Zkušební těleso typu scale bar s vylepenými referenčními body [25]

6 NÁVRH VHODNÉ INTERNÍ KALIBRAČNÍ METODIKY²

Tato kapitola se zabývá návrhem vhodné interní kalibrační metodiky. Diplomová práce je vystavěna tak, aby čtenáře nejprve seznámila s pojmy jejichž porozumění je klíčové pro následující text. Uvedený kalibrační postup byl vypracován dle vzoru a v souladu s veškerými souvisejícími interními předpisy společnosti ŠKODA AUTO a.s.

Podle interního vzoru musí každý kalibrační postup splňovat následující požadavky:

1. *Předmět kalibrace (kontroly měřidla)*
2. *Související normy a navazující předpisy*
3. *Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci*
4. *Názvosloví, definice*
5. *Měřidla a pomůcky potřebné ke kalibraci*
6. *Obecné podmínky kalibrace*
7. *Rozsah kalibrace*
8. *Předběžná kontrola a úprava měřidla*
9. *Zkouška měřidla*
 - 9.1 *Kontrola dodávky při vstupní přejímce*
 - 9.2 *Vizuální kontrola*
 - 9.3 *Funkční zkouška*
 - 9.4 *Měření metrologických parametrů*
10. *Vyhodnocení a rozhodnutí*
 - 10.1 *Vyhodnocení výsledků měření*
 - 10.2 *Stanovení nejistoty měření*
 - 10.3 *Rozhodnutí o výsledku kalibrace*
11. *Protokol o kalibraci*
12. *Převzetí měřidla ke kalibraci, předání zkalibrovaného měřidla*
13. *Péče o kalibrační postup*
14. *Rozdělovník, revize*
15. *Stanovení nejistoty kalibrace*

Všechny výše uvedené body jsou detailně rozpracovány v následujícím textu této kapitoly.

² Uvedená kapitola vychází z následujících zdrojů [14, 16, 20, 21, 22, 26, 27, není-li uvedeno jinak]

6.1 Předmět kalibrace

Tento kalibrační postup se vztahuje na kalibraci optických souřadnicových měřicích strojů (definice OCMM viz podkapitola 6.4) založených na principu projekce strukturovaného světla. Uvedený postup je primárně určen pro 3D OCMM ATOS od firmy GOM, které se zkouší pomocí hmotných etalonů rozměru. Principy těchto zkoušek i metody zjišťování technického stavu OCMM jsou použitelné i pro další konstrukční typy OCMM.

Kalibrace popsaná v tomto kalibračním postupu platí pro přejímky, tzn. vstupní kontroly (VK), prvotní kalibrace (PK), tak i rekalibrace během používání (RK).

6.2 Související normy, směrnice a navazující předpisy

| | |
|--------------------|---|
| ČSN EN ISO 10360-1 | GPS - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) Část 1: Slovník |
| VDI/VDE 2634-1 | Optické 3D měřicí systémy Zobrazovací systémy s bodovým snímáním |
| VDI/VDE 2634-2 | Optické 3D měřicí systémy Optické systémy založené na plošném skenování |
| VDI/VDE 2634-3 | Optické 3D měřicí systémy Vícepohledové systémy založené na plošném skenování |
| TNI 01 0115 | Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM) |
| EA-4/02 | Vyjadřování nejistot měření při kalibracích |
| ČSN EN ISO 14253-1 | GPS Část 1: Pravidla rozhodování o prokazování shody nebo neshody se specifikacemi |

6.3 Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci

Příslušní pracovníci musí být seznámeni s kalibračním postupem, normami a předpisy uvedenými v předchozí kapitole a s návody na obsluhu měřicích přístrojů používaných při kalibraci. Doporučuje se certifikace odborné způsobilosti těchto pracovníků.

6.4 Názvosloví, definice

Pro potřeby tohoto kalibračního postupu platí následující definice:

Kalibrace je provedení všech úkonů a zkoušek potřebných ke zjištění a definování vztahu mezi hodnotou reprezentovanou zkušebním tělesem (etalonem) a hodnotou naměřenou OCMM. Zahrnuje posouzení technického stavu (schopnosti měření) OCMM, zkoušky přesnosti včetně jejich zpracování a vyhodnocení, vystavení protokolu s výrokem o výsledku zkoušky a další kroky.

Optický souřadnicový měřicí stroj (OCMM – z anglického Optical Coordinate Measuring Machine) je měřicí zařízení schopné určovat prostorové souřadnice měřeného dílu. Při jeho užití je měřený objekt nasvícen buď aktivně (strukturovaným světlem) nebo pasivně („přirozeným“ světlem) a zachycen kamerou / kamerami. Z takto vytvořených snímků je pomocí vhodných matematických algoritmů SW vypočítán a složen skutečný tvar a poloha měřeného objektu.

Maximální dovolená chyba (např. MPE_E) je stanovena dodavatelem (PK,VK) nebo provozovatelem (RK) a je zpravidla vyjádřena buď jedinou hodnotou, nebo vztahem:

$$MPE_E = A + \frac{L}{K} \leq B \mu m \text{ (} L \text{ v mm)}, \text{ příp. } A + K \cdot L \leq B \mu m \text{ (} L \text{ v M)} \quad (2)$$

Kde:

- A je konstanta udaná výrobcem / uživatelem OCMM (v μm);
- K bezrozměrná konstanta udaná výrobcem / provozovatelem OCMM;
- L měřený rozměr;
- B největší dovolená hodnota MPE_E stanovená výrobcem / provozovatelem OCMM.

Chyba snímání tvaru (PF) je řadou radiálních vzdáleností jednotlivých naměřených bodů z vypočtené vepsané (proložené) koule. Vepsaná koule je definována metodou nejmenších čtverců s volným poloměrem.

Chyba snímání rozměru (PS) je rozdíl mezi naměřeným a zkalibrovaným průměrem zkušební koule.

Chyba rozteče koulí (SD) je rozdíl mezi naměřenou a kalibrovanou hodnotou vzdálenosti středů dvou koulí. Měřená rozteč je vypočítána z několika snímků každé z koulí.

Chyba měření délky (E) je chybou, se kterou může být délka měřeného materiálu určena měřicím systémem, pokud je měření prováděno obousměrným snímáním. Při měření se dva protilehlé body snímané z opačných směrů nacházejí na nominálních rovnoběžných plochách svislých k jedné ze dvou ploch. Vzdálenost mezi těmito body je zkoušenou délkou. V případě kdy nelze určit chybu měření délky tak, jak je popsáno výše, ale je nutné využít jiný způsob (např. vícebodové snímání koncových měrek nebo měření ball barů), musí být tato informace výslovně uvedena výrobcem.

Chyba měření délky (ET) je chybou získanou z rozdílu mezi naměřenými a zkalibrovanými vzdálenostmi mezi dvěma body. Vztahuje se na systémy TRITOP.

Provozovatel OCMM je koordinátor operátora / obsluhy OCMM – uživatele.

Další pojmy a definice jsou obsaženy v příslušných normách (kapitola 6.2), zejména v ČSN 01 0115 a směrnících řady VDI/VDE 2634.

6.5 Měřidla a pomůcky potřebné ke kalibraci

- Zkušební koule
- Měrky se dvěma koulemi - ball bary
- Měrka s více koulemi - multi-ball ball bar
- Tyč s kuželi / koulemi
- Čistící prostředky (čistý benzín, líh, izopropylalkohol, mul, utěrka...)
- Teploměr s příslušným rozsahem a dělením stupnice (min. 0,2 °C)

6.6 Obecné podmínky kalibrace

Kalibrace OCMM se provádí obvykle za těchto referenčních podmínek:

teplota prostředí: $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, ($22\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$)
 $5,0\text{ °C} / 8\text{ hod}$ $0,5\text{ °C} / 1\text{ hod}$, $0,5\text{ °C} / \text{m}$

Teplotní rozdíl mezi OCMM a zkušební tělesem (etalonem) max. $0,5\text{ °C}$.

Zkušební tělesa se v prostoru OCMM temperují. Min. doba temperace je stanovena na 8 hodin a závisí na povaze a teplotní setrvačnosti každého zkušební tělesa. Teplota se zjišťuje před, po skončení, popřípadě i v průběhu kalibrace.

Prostředí v dílenských podmínkách musí umožňovat provedení kalibrace a korektnost výsledků měření (vyžaduje se stabilita teploty, minimální prašnost a chvění, atd.).

Pokud podmínky prostředí neodpovídají specifikaci dodavatele, smí se provést početní korekce naměřených hodnot. V ostatních případech se korekce použít pouze pokud jsou používány i při běžném měření.

6.7 Rozsah kalibrace

- Předběžná a vizuální kontrola (viz kapitola 6.8)
- Kontrola dodávky při přejímce (viz kapitola 6.9.1)
- Příprava ke kalibraci (viz kapitola 6.9.2 a 6.9.3)
- Měření metrologických parametrů (viz kapitola 6.9.4)

6.8 Předběžná a vizuální kontrola

Povrch objektivů a funkční plochy kvalifikačních normalů nesmí být zjevně poškozeny nebo poškrábány. Pokud má OCMM aretační zařízení, tak musí být funkční a dostatečně tuhé.

Zkontroluje se označení měřidla evidenčním číslem a správnost (shoda) aktuálních údajů s dokumentací (jinými slovy se jedná o porovnání evidenčního čísla s dokladem měřidla). (RK)

6.9 Zkouška měřidla

6.9.1 Kontrola dodávky při vstupní přejímce

Provádí se dle smluvní dohody v souladu s metrologickým řádem a interními předpisy, u dodaného kalibračního protokolu se prověřuje obsahová úplnost (dodání všech požadovaných dokladů), formální správnost, oprávněnost k vystavení protokolu, ...

6.9.2 Příprava ke kalibraci

- Příprava dokladu měřidla, popřípadě i technické dokumentace
- Zajištění kvalifikované obsluhy a provozních podmínek OCMM
- Spuštění OCMM a uvedení do optimálního provozního stavu
- Konfigurace a kvalifikace systému, samokalibrace
- Příprava / sestavení zkušebních těles do blízkosti OCMM – temperování
- Očištění (kontrola čistoty) použitých zkušebních těles
- Zadání příslušných parametrů a koeficientů pro měření
- Vytvoření / výběr příslušného programu měření
- Kontrola teplotní stability OCMM a zkušebního tělesa

6.9.3 Metody měření / rozsah zkoušek

Přejímka OCMM (PK, VK) se přednostně provádí dle (a v rozsahu) směrnic VDI/VDE 2634, nebo v rozsahu předem sjednaném. Je nutné přesně specifikovat předpisy, dle nichž budou zkoušky provedeny (nebo jejich části a verze).

Například požadavek provedení zkoušek dle VDI/VDE 2634-1, nebo dle požadavků a rozsahu VDI/VDE 2634-3, nebo dle vybraných částí z obou předpisů. (Specifikace zvláštních požadavků pro způsob použití ve společnosti ŠKODA AUTO a.s. a výklad pojmů!)

Rozsah zkoušek při recalibraci (RK) určuje pracovník provádějící kalibraci na základě požadavku provozovatele a dle způsobu používání OCMM.

6.9.4 Měření metrologických parametrů

Kalibrace se skládá ze tří kroků:

- a) Kalibrace snímacího systému (ATOS) – Chyba snímání tvaru (*PF*) a chyba snímání rozměru (*PS*)
- b) Kalibrace pomocí měrek s koulemi – ball barů (ATOS) – Chyba rozteče koulí (*SD*) a chyba měření délky (*E*)
- c) Kalibrace pomocí tyče s kuželi / koulemi (TRITOP) – Chyba měření délky (*ET*)

Volba vhodných zkušebních těles (koulí a ball barů) je závislá na kalibrovaném měřicím objemu (viz Tab 4 kapitola 5.1 *Zkušební tělesa pro kalibraci systému ATOS*).

Kalibrace OCMM musí být provedena v co nejkratším časovém úseku a měření jednotlivých úloh / poloh musí následovat v jednom sledu za sebou.

a) Kalibrace snímacího systému (ATOS) – Chyba snímání tvaru (*PF*) a chyba snímání rozměru (*PS*)

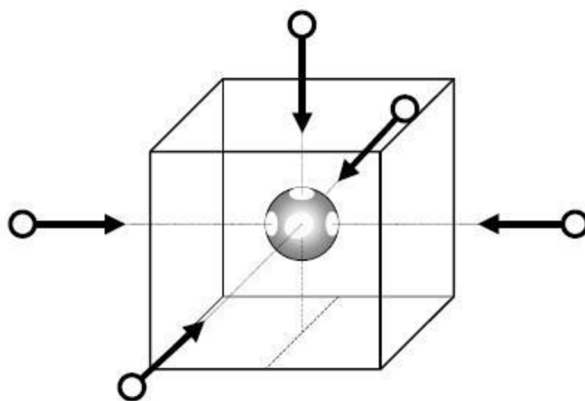
Chyba snímání popisuje chování měřicího systému v malé části měřicího objemu. Posuzuje se schopnost měřicího systému transformovat několik jednotlivých snímků pořízených nezávisle na sobě do společného souřadnicového systému.

Chyba snímání se v podstatě skládá ze dvou vlivů: na jedné straně chyby jednoho měření v měřicím objemu samotného snímače optického měřicího systému a na straně druhé, chyby v důsledku transformace jednotlivých měření. Rozlišuje se mezi chybou snímání tvaru (*PF*) a chybou snímání rozměru (*PS*).

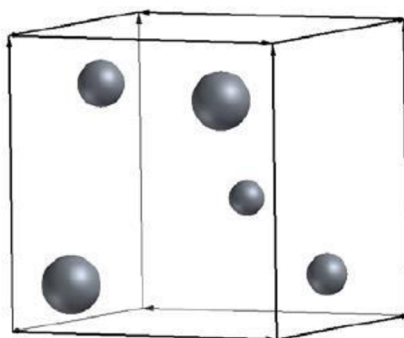
Pro společné stanovení chyb snímání tvaru a velikosti (*PF* a *PS*) se měří zkušební koule na základě náhodného výběru v nejméně třech libovolných pozicích v měřicím objemu.

Zkušební koule musí být skenována z různých směrů. To může být provedeno změnou polohy měřicího systému a / nebo objektu, který má být měřen (jak je to realizováno i v praxi). Povrch koule by měl být naskenován co nejúplněji.

V každé poloze je třeba kouli měřit nejméně z pěti různých poloh sensoru (viz Obr. 33). Do té míry do jaké to je s měřicím systémem možné, musí zkušební koule ležet v různých místech měřicího objemu sensoru (viz Obr. 34). Dále musí být uvedeny parametry použitých filtrů, případně algoritmy pro redukci mimo ležících bodů. V ideálním případě by se tyto parametry měly shodovat s tím, jak jsou využívány při měření v praxi.



Obr. 33) Příklady směrů snímání zkušební koule [22]

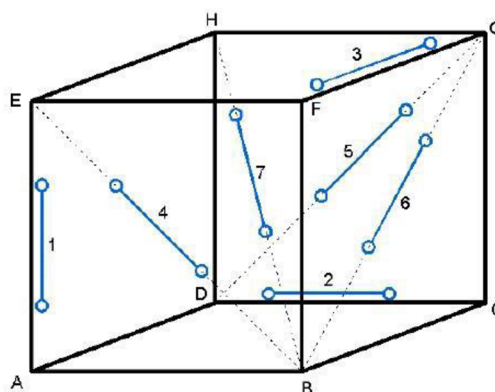


Obr. 34) Příklad různých pozic stejné zkušební koule v měřicím objemu sensoru (zorném poli senzoru) [22]

b) Kalibrace pomocí měrek s koulemi – ball barů (ATOS) – Chyba rozteče koulí (SD) a chyba měření délky (E)

Chyba rozteče koulí (SD) a chyba měření délky (E) jsou parametry, které slouží k otestování schopnosti měřicího systému k provádění délkových měření z několika různých jednotlivých snímků. Chyba snímání není obsažena v chybě rozteče koulí, ovšem pro stanovení chyby měření délky je s ní třeba počítat.

Chyba rozteče koulí SD musí být dodržena v celém měřicím objemu pro jakékoliv polohy zkušební tělesa – ball baru. Její stanovení se provádí na základě náhodného výběru v sedmi různých polohách. Zkušební těleso se doporučuje uspořádat a měřit tak, jak je znázorněno na Obr. 35.



Obr. 35) Doporučené uspořádání zkušební tělesa – ball baru při určování chyby rozteče koulí [22]

Pokud to měřicí systém umožňuje, tak by zkoušky měly být prováděny v měřicím prostoru ve tvaru kvádrů, který je větší než měřicí objem senzoru. Prostorová úhlopříčka měřicího objemu by měla mít alespoň dvojnásobnou délku měřicího objemu senzoru. Největší zkoušená délka musí mít alespoň 2/3 délky prostorové úhlopříčky měřicího objemu. Nejmenší zkoušená délka, by neměla být menší než 2/3 nejkratší délky strany měřicího objemu.

Pokud je to možné, tak je třeba vyvarovat se snímání obou koulí zkušební tělesa v jednom snímku. Výsledné nasnímané koule by měly být co nejúplnější. Dále musí být uvedeny parametry použitých filtrů, případně algoritmy pro redukci mimo ležících bodů. V ideálním případě by se tyto parametry měly shodovat s tím, jak jsou využívány při měření v praxi.

Chyba měření délky (E) popisuje vznik (chování) trojrozměrné chyby měřicího systému v celém měřicím rozsahu. Tato chyba vzniká v důsledku překrývání různých jednotlivých chyb. Jsou jimi například: nekorigované systematické chyby, nastavovací chyby při propojování různých obrazů z měřeného objektu a chyby náhodné. Chyba měření délky se liší od chyby rozteče koulí popsané výše. K délkovým chybám měření, které jsou vypočítány z více, než dvou nasnímaných bodů na délku je totiž nutné samostatně připočítat podíl chyb snímání.

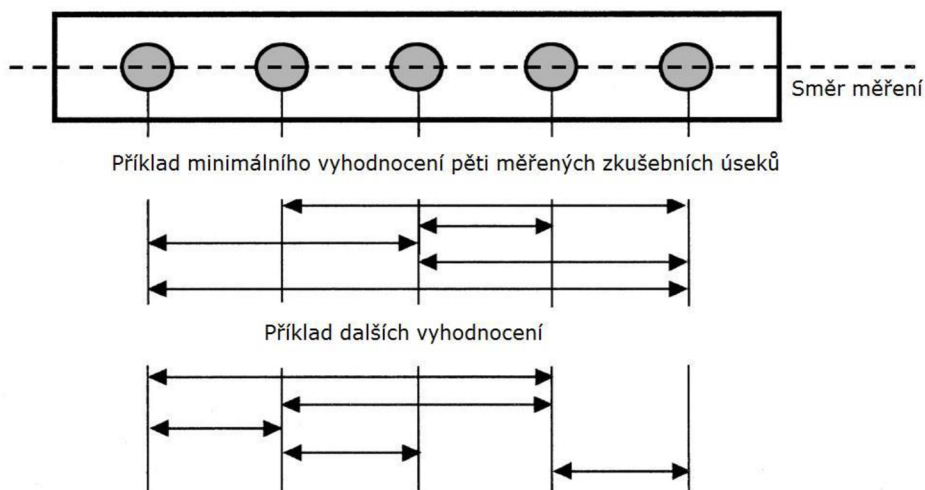
Stanovení chyby měření délky probíhá z již výše uvedené chyby rozteče koulí po připočtení chyby snímání, není tedy nutné provádět další měření jiných zkušebních těles.

V případě použití ball baru se dvěma koulemi se měřená délka vyhodnocuje ze dvou jednotlivě naměřených bodů na každé z koulí, nikoliv z STL modelu vytvořené koule. Tyto body jsou zvoleny tak, aby jejich vzdálenost od přímky vedoucí skrz středy koulí ball baru byla co nejmenší.

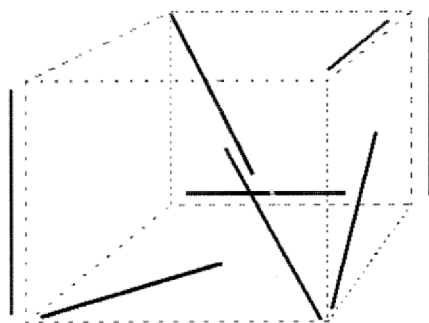
Při měření zkušební tělesa typu multi-ball ball bar není možné tuto chybu vyhodnocovat z důvodu konstrukce tělesa. Proto nebude u tohoto tělesa vyhodnocována.

c) Kalibrace pomocí tyče s kuželi / koulemi (TRITOP) – Chyba měření délky (ET)

Na upraveném zkušebním tělese se měří vzdálenosti vylepených referenčních bodů. Těleso je měřeno v sedmi různých polohách v měřicím objemu. Pro účel přejímky se doporučuje měřicí objem o rozměrech 2000 mm × 2000 mm × 1500 mm (délka × šířka × výška). Jiné měřicí objemy jsou samozřejmě přípustné. V každé měřicí poloze musí být vyhodnoceno nejméně pět měřených délek (viz Obr. 36). Nejdelší měřená délka v každé měřicí poloze musí být alespoň tak dlouhá, jako nejkratší strana měřicího objemu. Nejdelší zkoušená délka by měla měřit alespoň 2/3 z prostorové úhlopříčky měřicího objemu. Nejsou-li k dispozici dostatečně dlouhá zkušební tělesa, může být tato délka reprezentována dvěma překrývajícími se zkušebními tělesy. Na Obr. 37 jsou znázorněny doporučené varianty uspořádání zkušební tělesa v měřicím objemu.



Obr. 36) Příklad vyhodnocení délek na zkušebním tělese typu scale bar [20]



Obr. 37) Doporučené varianty uspořádání zkušební tělesa typu scale bar v měřicím objemu [20]

6.10 Vyhodnocení a výrok o kalibraci

6.10.1 Vyhodnocení výsledků měření

Rozsah prováděných zkoušek, metoda kalibrace, požadavky na prověření ve směrnici definovaných parametrů i způsob vyhodnocení zjištěných hodnot, musí být předem dohodnut s dodavatelem (PK,VK) nebo s provozovatelem OCMM (RK).

a) Kalibrace snímacího systému (ATOS) – Chyba snímání tvaru (PF) a chyba snímání rozměru (PS)

Pro jednotlivé polohy zkušební koule je společná vepsaná koule vypočítána ze všech jednotlivých snímků metodou nejmenších čtverců. Rozsah radiálních odchylek je pak chybou snímání tvaru (PF).

Rozdíl mezi vepsaným průměrem D_a a kalibrovaným průměrem D_r zkušební koule je chybou snímání rozměru (PS):

$$PS = D_a - D_r \quad (3)$$

b) Kalibrace pomocí měrek s koulemi – ball barů (ATOS) – Chyba rozteče koulí (SD) a chyba měření délky (E)

Pro stanovení chyby rozteče koulí jsou pozice středů snímaných koulí vypočítány pro každou zkoušenou délku ze všech snímaných bodů všech jednotlivých snímků vepsané metodou nejmenších čtverců s volným poloměrem.

Chyba rozteče koulí SD je získána jako rozdíl mezi naměřenou hodnotou L_{ka} a kalibrovanou hodnotou L_{kr} zkoušené délky dle vzorce:

$$SD = L_{ka} - L_{kr} \quad (4)$$

Chyba měření délky E je získána z chyby rozteče koulí plus korekce E_K vypočítané ze vzdáleností R_1 a R_2 dvou vybraných bodů měřených od středu koule a zkalibrovaných průměrů D_{r1} a D_{r2} obou koulí:

$$E = SD + E_K \quad (5)$$

$$E_K = \left(R_1 - \frac{D_{r1}}{2} \right) + \left(R_2 - \frac{D_{r2}}{2} \right) \quad (6)$$

c) Kalibrace pomocí tyče s kuželi / koulemi (TRITOP) – Chyba měření délky (ET)

Chyba měření délky ET se získá z rozdílu mezi naměřenou hodnotou l_m a zkalibrovanou hodnotou l_k zkoušené délky dle vzorce:

$$ET = l_m - l_k \quad (7)$$

OCMM vyhovuje, pokud naměřené hodnoty všech posuzovaných parametrů (*PF, PS, SD, E, ET*) nepřekročí související specifikované limitní hodnoty (MPE_{PF} , MPE_{PS} , MPE_{SD} , MPE_E , MPE_{ET}) na žádném ze zkušebních těles v žádné měřicí poloze s přihlédnutím k nejistotě měření ve smyslu ČSN EN ISO 14253-1 následovně:

Přejímka OCMM / externí kalibrace:

Naměřené hodnoty musí ležet v pásmu prokázané shody:

$$|xx| \leq |MPE_{xx}| - U \text{ pro dodavatele / výrobce}$$

Interní re/kalibrace:

Naměřené hodnoty musí ležet v pásmu specifikace:

$$|xx| \leq |MPE_{xx}| + U \text{ pro zákazníka}$$

Kde:

- xx* je posuzovaný parametr (*PF, PS, SD, E, ET*);
- MPE_{xx} maximální mezní chyba daného parametru (MPE_{PF} , MPE_{PS} , MPE_{SD} , MPE_E , MPE_{ET}) specifikovaná výrobcem nebo uživatelem OCMM;
- U* rozšířená / uvažovaná nejistota kalibrace (blíže v podkapitole 6.10.2).

Mezní hodnota daného parametru musí být dodržena za všech okolností povolených výrobcem, příp. při recalibraci uživatelem.

Je-li tato mezní hodnota překročena maximálně jednou, musí být příslušné měření třikrát opakováno, a v těchto třech měřeních nesmí být mezní hodnota překročena.

V ostatních případech výsledek kalibrace (dle kapitoly 6.10.3.) nevyhovuje, nebo vyhovuje s omezením.

6.10.2 Stanovení nejistoty měření při kalibraci

Vzhledem k univerzálnosti OCMM, k časové neúměrnosti zkoušek při kalibraci (objem měřicího prostoru, počet používaných objektivů a měřicích rozsahů, atd.) lze od výpočtu nejistoty kalibrace OCMM upustit. Ta je již zohledněna ve specifikaci chyb OCMM.

Nejvýznamnější příspěvky nejistoty ovlivňující výsledek kalibrace (nejistota zkušebního tělesa a teplota při kalibraci) jsou zohledněny při vyhodnocení a jsou uvedeny i v protokolu.

Pro potřeby uživatele i odběratele měřicích služeb má větší vypovídací schopnost způsobilost OCMM.

Nejistota kalibrace OCMM se v Protokolu o kalibraci dle interních předpisů uvádí formou:

- a) Rozšířené nejistoty kalibrace použitého zkušebního tělesa U_E z Kalibračního protokolu zkušebního tělesa a uvedení podmínek prostředí během kalibrace
- b) Maximální dovolené chyby etalonu použitého při kalibraci zkušebního tělesa (např. MPE_E) a uvedení podmínek prostředí během kalibrace
- c) Výpočtu rozšířené nejistoty při kalibraci dle EA-4/02

6.10.3 Výrok o výsledku kalibrace

Na základě vyhodnocení zkoušek (uvedených v kapitolách 6.8 a 6.9) rozhodne pracovník provádějící kalibraci, zda kalibrovaný OCMM vyhovuje požadavkům. Výsledek kalibrace OCMM se zanesse do dokladu měřidla a do protokolu o kalibraci.

| | |
|----------------------------|---|
| Vyhovuje | Parametry jsou dle zásad pro vyhodnocení v toleranci. |
| Nevyhovuje | Parametry nevyhovují specifikaci dodavatele (PK,VK), nebo požadavkům provozovatele (RK). |
| Vyhovuje s omezením | Některý ze specifikovaných parametrů OCMM nebyl dodržen (nebo nebyl hodnocen), ale tato skutečnost nebrání měření plánovaných úloh. Důvod omezení musí být uveden v dokladu měřidla i v protokolu, který (na důkaz souhlasu) musí svým podpisem potvrdit i provozovatel OCMM. |

6.11 Protokol o kalibraci, označení měřidla

6.11.1 Náležitosti protokolu

Obsah, forma a úprava protokolu o kalibraci je dána interním předpisem.

6.11.2 Kalibrační protokol

Originál kalibračního protokolu se předá objednavateli, popř. zadavateli kalibrace. Kopii kalibračního protokolu si ponechá interní kalibrační místo, zadá ji do evidenčního programu PALSTAT a archivuje ji po dobu minimálně pěti let.

6.11.3 Jiné kalibrační záznamy

Výsledky kalibrace se zanesou do dokladu měřidla.

6.12 Převzetí měřidla ke kalibraci, předání zkalibrovaného měřidla, reklamace

6.12.1 Převzetí měřidla ke kalibraci: neprovádí se

6.12.2 Předání měřidla po kalibraci: neprovádí se

6.12.3 Reklamace

V případě, že objednatel kalibrace podá stížnost na provedenou kalibraci, přebírá tuto stížnost koordinátor interního kalibračního místa.

6.13 Péče o kalibrační postup

Originál kalibračního postupu je uložen v papírové i v elektronické podobě (v QSD).

6.14 Rozdělovník, úprava a schválení, revize

6.14.1 Rozdělovník, úprava a schválení

Tento kalibrační postup je v majetku oddělení GQM/24, v elektronické podobě je v QSD a jako vzorový v systému PALSTAT.

6.14.2 Revize

Tento kalibrační postup je revidován 1x za dva roky.

6.15 Stanovení nejistoty kalibrace

Teoretický postup pro stanovení nejistot kalibrace je uveden v kapitole 7 *Návrh pro stanovení nejistot kalibrace*.

7 NÁVRH PRO STANOVENÍ NEJISTOT KALIBRACE

Historicky se problematika výpočtu nejistot v metrologii začala psát již v roce 1977, kdy byl – Mezinárodní úřad pro míry a váhy - BIMP (Bureau International des Poids et Mesures) prověřen řešením tohoto úkolu. První vydání Pokynu pro vyjadřování nejistot měření - GUM [28] (Guide to the expression of uncertainty in measurement) vyšlo v roce 1993. Výpočet nejistot při kalibraci reprezentuje nejsložitější část každého kalibračního postupu. V případě optických skenerů je tato problematika dále komplikována skutečností, že mnoho zdrojů nejistot není známých a nelze je jednoduše odvodit. V takovémto případě nezbyvá nic jiného, než se uchýlit k experimentálním metodám pro zjištění a kvantifikování těchto zdrojů. S ohledem na komplexnost tohoto úkonu je v následujícím textu popsán návrh pro výpočet nejistot při kalibraci, nikoliv konkrétní vypočtené hodnoty.

Nejistoty kalibrace je nutné stanovit pro všechny měřené parametry (PF , PS , SD , E a ET). Jako základ může posloužit Příloha ke směrnici VDI/VDE 2634-2 [21], která poskytuje krátký návod pro stanovení nejistoty při jednosnímkovém skenování. Pro potřeby kalibrace přístrojů ATOS uvádí směrnice dva základní vzorce (nejistotu chyby snímání a nejistotu chyby rozteče koulí).

Nejistota chyby snímání

Stanovení chyby snímání je v podstatě ovlivněno odchylkou tvaru použité zkušební koule F a nejistotou odchylky tvaru $u(F)$, které jsou uvedeny v kalibračním protokolu. V souladu s uvedeným je nejistota chyby snímání $u(P)$ vypočtena ze vztahu [21]:

$$u(P) = \sqrt{\left(\frac{F}{2}\right)^2 + u^2(F)} \quad (8)$$

V protokolech je zpravidla uváděna nejistota rozšířená $U(F)$, ale pro výpočet standardní nejistoty třeba tuto nejistotu podělit o koeficient rozšíření k (např.: $u(F) = U(F) / k$, obvykle se používá $k = 2$). Toto je jeden z dílčích příspěvků nejistot, který by měl být použit ve většině případů.

Nejistota chyby rozteče koulí

Určení chyby rozteče koulí SD je v podstatě ovlivněno:

- Nejistotou kalibrace zkušební tělesa $u(\varepsilon_{cal})$
- Nejistotou vlivu koeficientu teplotní roztažnosti zkušební tělesa $u(\varepsilon_\alpha)$
- Nejistotou vlivu teploty zkušební tělesa $u(\varepsilon_t)$
- Nejistotou pro nastavení a montáž zkušební tělesa $u(\varepsilon_{fixt})$

Na základě těchto vlivů je pak nejistota $u(SD)$ chyby rozteče koulí vypočtena jako:

$$u(SD) = \sqrt{u^2(\varepsilon_{cal}) + u^2(\varepsilon_\alpha) + u^2(\varepsilon_t) + u^2(\varepsilon_{fixt})} \quad (9)$$

Přičemž standardní nejistota kalibrace zkušební tělesa je dána jako:

$$u(\varepsilon_{cal}) = \frac{U_{cal}}{k} \quad (10)$$

Kde:

U_{cal} je rozšířená nejistota kalibrace zkušebního tělesa uvedená v kalibračním protokolu;

k koeficient rozšíření.

Nejistota koeficientu teplotní roztažnosti zkušebního tělesa:

$$u(\varepsilon_\alpha) = L \cdot (|t - 20^\circ\text{C}|) \cdot u(\alpha) \quad (11)$$

Kde:

L je rozměr zkušebního tělesa;

t teplota zkušebního tělesa při měření;

20°C referenční teplota;

$u(\alpha)$ standardní nejistota koeficientu teplotní roztažnosti zkušebního tělesa.

Nejistota vlivu teploty zkušebního tělesa:

$$u(\varepsilon_t) = L \cdot \alpha \cdot u(t) \quad (12)$$

Kde:

L je rozměr zkušebního tělesa;

α koeficient teplotní roztažnosti zkušebního tělesa;

$u(t)$ standardní nejistota teploty zkušebního tělesa.

Nejistota pro nastavení a montáž zkušebního tělesa $u(\varepsilon_{fixt})$ musí být individuálně posouzena a vyhodnocena. K tomuto účelu může být použita např. norma ISO/TS 23165 [29].

Jednoduchý model pro určení nejistoty $u(SD)$ poskytuje zkoušejícímu rady o možných vlivech na nejistotu. Jednoduchý model bude ve většině případů poskytovat dostatečně spolehlivé údaje o nejistotě zkoušky. [21]

Jelikož jsou výše uvedené vzorce aplikovatelné pouze pro zjednodušený výpočet nejistot při jednosnímkovém skenování, je při kalibraci dle VDI/VDE 2634-3 [22] nutné zohlednit další zdroje nejistot.

Mezi tyto zdroje patří:

- Nejistota způsobená transformací jednotlivých snímků do společného souřadného systému
- Nejistota způsobená vlivem osvětlení (barvou a intenzitou dopadajícího světla na měřený objekt)
- Nejistoty způsobené počtem, velikostí, rozmístěním a úhlem snímání (deformace tvaru) jednotlivých referenčních bodů
- Nejistoty způsobené „měřením v čase“ (změny prostředí – např. teplota, chvění, kolísání intenzity světla, apod.)
- Nejistoty způsobené počtem a rozmístěním referenčních tyčí a křížů (pro kombinaci systémů ATOS a TRITOP)

Vlivy výše uvedených nejistot je nutné experimentálně vyzkoumat. Takovéto experimenty budou vyžadovat rozsáhlé a časově náročné zkoušení a posuzování, které je z důvodu kapacitní vytíženosti měřicích strojů ve společnosti ŠKODA AUTO a.s. proveditelné pouze v dlouhodobém časovém horizontu. Z uvedeného důvodu se bude autor diplomové práce zabývat touto problematikou i v budoucnu. V současné době se ve společnosti ŠKODA AUTO a.s. výpočet nejistot výše uvedených zkoumaných parametrů nezohledňuje.

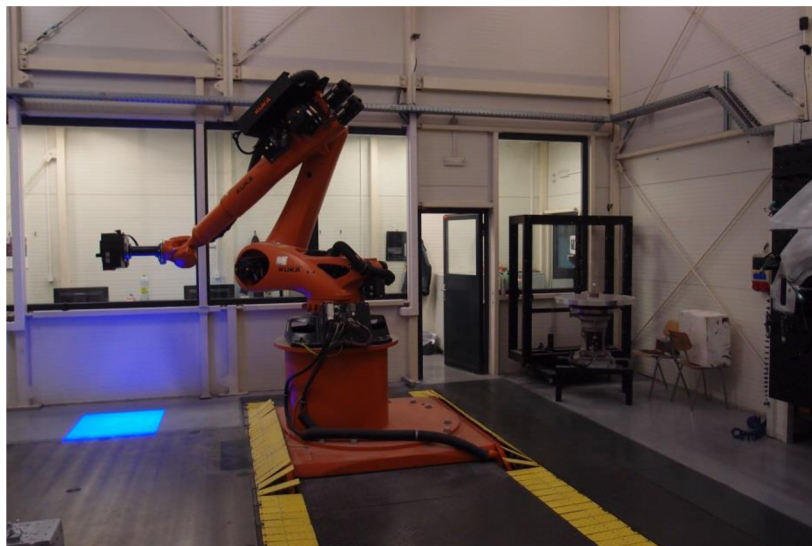
Významný vliv na stanovení dílčích nejistot pro jednotlivé posuzované parametry má nejistota kalibrace použitého zkušební tělesa, ta by proto měla být co nejmenší. Pro navržená zkušební tělesa typu ball bar o délkách 150 mm, 300 mm, 500 mm a 1 000 mm je při zjišťování parametru E ideální tato tělesa zkalibrovat na délkoměru jako dlouhou koncovou měрку.

U ball baru o délce 1140 mm je z důvodu magnetického upínání koulí nutné zohlednit i tvarovou odchylku těchto koulí a nejistotu způsobenou upnutím (např. z důvodu nečistot dosedacích ploch).

Po kvantifikaci výše uvedených nejistot bude proveden jejich rozpočet v souladu s pokynem EA-4/02 [26].

8 OVĚŘENÍ KALIBRAČNÍHO POSTUPU V PRAXI

V souladu s navrženým kalibračním postupem byla provedena kalibrace na OCMM ATOS III Triple Scan připevněném na robotické paži. Zvolen byl měřicí objem MV 560. Zkušební těleso bylo měřeno s využitím přidavného otočného stolu (viz Obr. 38).



Obr. 38) Sestava použitá pro kalibraci [25]

Uživatel u zvoleného objektivu stanovil *MPE* pro všechny posuzované parametry na 60 μm .

Kalibrace OCMM proběhla dle všech tří kroků navržených v kalibračním postupu s následujícími výsledky:

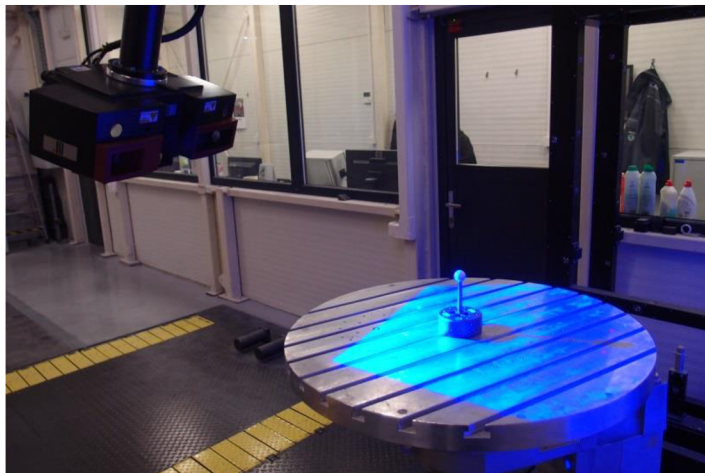
8.1 Kalibrace snímacího systému

Operátor OCMM provedl měření zkušební koule o průměru 25 mm (viz Obr. 39). Zkušební koule byla umístěna na otočném stole ve čtyřech různých polohách – výsledky (viz Tab 9). Pro podložení byla použita přesná podložka o výšce 80 mm. Koule byla v každé poloze měřena deseti snímky. Z důvodu odlesků byla základna a dřík zkušebního tělesa zmatněna nástřikem oxidu titaničitého. Měrové protokoly jsou uvedeny v Příloze A této diplomové práce.

Tab 9) Výsledné hodnoty parametrů *PF* a *PS* pro jednotlivé polohy zkušebního tělesa [25]

| Pozice koule | <i>PS</i> [μm] | <i>PF</i> [μm] |
|--|-----------------------------|-----------------------------|
| 1. ve středu otočného stolu bez podložení | 27 | 118,42 |
| 2. ve středu otočného stolu s podložním | 7 | 138,42 |
| 3. mimo osu otočného stolu bez podložení | 17 | 118,42 |
| 4. mimo osu otočného stolu s podložním | 17 | 108,42 |

Výsledek kalibrace: Maximální hodnota parametru PS je $27 \mu\text{m}$, proto lze konstatovat, že kalibrace tohoto parametru vyhovuje. Parametr PF byl zhruba dvojnásobně překročen, proto je kalibrace tohoto parametru nevyhovující. Daná skutečnost byla pravděpodobně způsobena lesklým povrchem otočného stolu, který odrazil promítané světelné vzory na zkušební kouli. Velká tvarová odchylka (červená místa) je patná z měrových protokolů uvedených v příloze. Výsledky kalibrace snímacího systému jsou nevyhovující, při následné recalibraci doporučuje autor zmatnění otočného stolu křídovým nástřikem, nebo nástřikem oxidem titaničitým. Opravná měření nebyla uskutečněna z kapacitních důvodů.



Obr. 39) Měření zkušební koule při kalibraci snímacího systému ATOS [25]

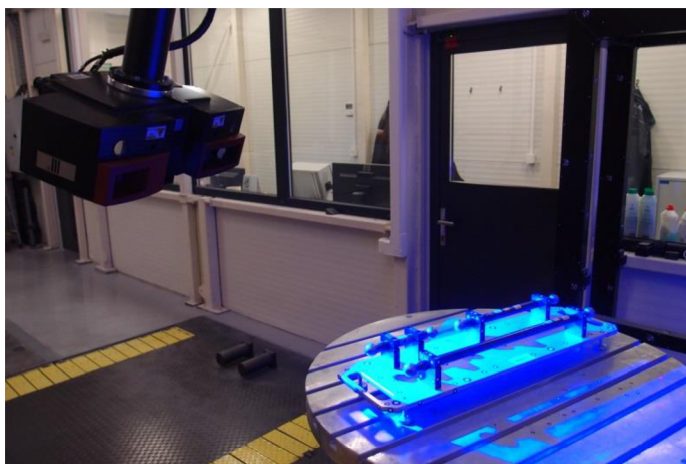
8.2 Kalibrace pomocí měrek s koulemi

Bylo měřeno zkušební těleso typu ball bar se dvěma koulemi ($L = 500 \text{ mm}$). Z důvodu měření na otočném stole nebylo možné použít vhodné (delší) zkušební těleso (dle Tab 4 uvedené v kapitole 5.1 *Zkušební tělesa pro kalibraci systému ATOS*). S přihlédnutím ke kalibrační metodice výrobce (celkový měřicí objem = měřicí objem senzoru), je zkušební těleso svými rozměry vyhovující. Zkušební těleso bylo opět měřeno ve čtyřech polohách na otočném stole a každá z koulí byla v jednotlivých polohách měřena deseti snímky. Výsledky jsou uvedeny v Tab 10. Měrové protokoly jsou taktéž uvedeny v Příloze B této diplomové práce.

Tab 10) Výsledné hodnoty parametru SD a naměřené hodnoty délky (pro vyhodnocení parametru E) v jednotlivých polohách zkušebního tělesa [25]

| Pozice ball baru | SD [μm] | Naměřená délka (pro vyhodnocení parametru E) [mm] |
|---|---------------------------|---|
| 1. ve středu otočného stolu bez podložení | 30,5 | 526,044 |
| 2. ve středu otočného stolu s podložním | 29,5 | 526,014 |
| 3. mimo osu otočného stolu bez podložení | -23,5 | 525,960 |
| 4. mimo osu otočného stolu s podložním | -38,5 | 525,933 |

Výsledek kalibrace: Maximální odchylka parametru SD je $-38,5 \mu\text{m}$, proto lze konstatovat, že kalibrace vyhovuje. Parametr E bohužel není možné vyhodnotit, protože nebyla provedena kalibrace tvarů a průměrů snímaných koulí. Tento nedostatek bude odstraněn při následné recalibraci zkušebního tělesa.



Obr. 40) Měření ball baru (L = 500 mm) při kalibraci systému ATOS [25]

8.3 Kalibrace pomocí tyče s kuželi / koulemi (TRITOP)

Na zkušební tělese byly měřeny a vyhodnocovány vzdálenosti referenčních bodů (viz Tab 7 v kapitole 5.2 *Zkušební těleso pro kalibraci systému TRITOP*). Poloha jednotlivých bodů byla vyhodnocena ze šedesáti snímků zkušební tělesa. Výsledky jsou uvedeny v Tab 11. Stejně jako v předchozích podkapitolách se měrové protokoly nacházejí v Příloze C této diplomové práce.

Tab 11) Výsledky parametru *ET* pro zkalibrované vzdálenosti referenčních bodů zkušební tělesa [25]

| Fotogrammetrické značky – č./poz. | <i>ET</i> [μm] | Fotogrammetrické značky – č./poz. | <i>ET</i> [μm] |
|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|
| 1 – 2 | -1,4 | 1 - 2 | -1,4 |
| 2 – 3 | -16,2 | 1 - 3 | -17,6 |
| 3 – 4 | 8,7 | 1 - 4 | -8,8 |
| 4 – 5 | -11,7 | 1 - 5 | -20,5 |
| 5 – 6 | 11,1 | 1 - 6 | -9,4 |
| 6 – 7 | -11,1 | 1 - 7 | -20,4 |
| 7 – 8 | 4,0 | 1 - 8 | -17,4 |

Výsledek kalibrace: Maximální odchylka parametru *ET* je -20,5 μm, proto lze konstatovat, že kalibrace vyhovuje. Z výsledků je zároveň patrné, že systém TRITOP dokáže snímky transformovat do společného systému velmi přesně a s poměrně malými chybami odměřování vzdáleností.

9 DOPORUČENÍ PRO PRAXI

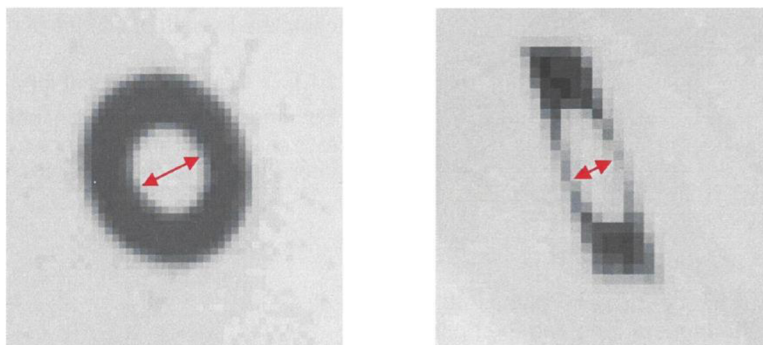
Z hlediska doporučení nejen pro kalibrace, ale i pro praktická měření na přístrojích GOM ATOS a TRITOP je klíčovým prvkem dostatek času. Přístroj samotná měření provádí v řádech vteřin, příp. minut, ale příprava objektu pro měření, jeho očištění, vylepení referenčních bodů a v případě robotizovaného měření i naprogramování jednotlivých pohybů robota zaberou několik desítek minut až hodin. Časově nejnáročnější je ovšem úprava naměřených dat a jejich vyhodnocení, které zkušenému operátorovi zaberou i několik hodin.

Při vylepování referenčních bodů je nutné uvědomit si hned několik věcí. Systém musí vždy zachytit minimálně tři body pro skládání jednotlivých snímků, jinak není schopen správně interpretovat a následně vyhodnotit polohu měřeného objektu v prostoru. S vyšším počtem vylepených a systémem zachycených bodů se zvyšuje přesnost měření. Dalším důležitým prvkem je vhodně zvolená velikost těchto bodů dle použitého měřicího objemu, jejich rozmístění / umístění (ideálně na rovnou plochu) a počet vylepených bodů vzhledem k úhlům snímání. Při snímání referenčních bodů totiž dochází ke zkreslování a systém tak kruhovou značku zachytí jako oválnou. Výrobce doporučuje, aby byl střed každého referenčního bodu v obraze tvořen minimálně deseti pixely (viz Obr. 41).

U přístrojů ATOS je výrobcem doporučováno nechat je před každým měřením dostatečně zahřát. Před samotným měřením je s přihlédnutím k měřenému objektu, jeho velikosti a vlastnostem povrchu nutné zvolit vhodnou strategii snímání (např. kombinovat měření se systémem TRITOP). Po vylepení referenčních bodů na měřený objekt je nutné posoudit, příp. vyzkoušet, zda je snímáný povrch dostatečně matný. Pokud není, je nutné ho zmatnit vhodným nástřikem. Přístroj pracuje s kontrastem, proto se doporučuje, aby pozadí bylo tmavé.

Pro systémy TRITOP platí, že v každém obraze by mělo být zaznamenáno alespoň pět kódovaných referenčních bodů. Každý z těchto bodů by měl systém zachytit minimálně na třech různých snímcích. Při přechodu ze světla do tmy totiž vzniká mnoho odstínů šedi a systém tak nemusí zaznamenat některé referenční body. Měřený objekt by neměl být přeexponován, či podexponován. Na snímáný objekt nebo do jeho blízkého okolí se doporučuje umístit vždy minimálně dvě referenční tyče o přibližně stejné délce jakou má měřený objekt a dostatečný počet kódovaných referenčních bodů - čím více, tím lépe.

Při snímání měřeného objektu by operátor měl postupovat v souladu s pokyny a dle metodiky výrobce. Ušetří si tím čas potřebný pro případné korekce nebo další měření.



Obr. 41) Příklad dobrého a) vlevo (označený průměr cca 10 pixelů) a špatného b) vpravo (označený průměr cca 3 pixely) snímání nekódovaného referenčního bodu [11]

10 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá kalibrací přístrojů GOM ATOS a TRITOP, jmenovitě pak návrhem vhodných zkušebních těles a interního kalibračního postupu. Z důvodu významnosti, vysokého počtu těchto přístrojů ve společnosti ŠKODA AUTO a.s. a finančních nároků na kalibrace bylo strategicky rozhodnuto, že se firmě vyplatí investovat do potřebného kalibračního vybavení a know-how vlastních zaměstnanců.

V přehledu současného stavu poznání je čtenáři vysvětlen princip triangulace, který výše uvedené přístroje využívají pro 3D digitalizaci měřených objektů. V kapitole je dále uvedeno základní rozdělení 3D metod používaných pro rekonstrukci měřených objektů a souvisejících druhů vzorů strukturovaného světla. Jsou zde detailněji popsány metody temporální, prostorové a přímé kodifikace. Kapitola je dále doplněna o druhy a specifikace matricích prášků, které jsou využívány ke zmatnění lesklých a transparentních povrchů měřených objektů.

První cíl práce stanoven zadáním, popis konstrukce a funkce přístrojů GOM ATOS a TRITOP je naplněn ve třetí kapitole. Jsou zde rozebrány hlavní části obou zmíněných systémů a představeny kódované i nekódované referenční body. Tyto body systémy využívají k transformaci jednotlivých snímků do společného souřadného systému a následného digitalizování měřeného objektu.

Pro pochopení následného textu bylo ve čtvrté kapitole pojednáno o problematice kalibrací těchto přístrojů. V textu byla autorem navržena jednotná terminologie, která je udržována v celé diplomové práci. Kapitola dále pojednává o problematice samokalibrace těchto přístrojů, kalibrační metodice a zkušebních tělesech využívaných výrobcem – firmou GOM.

Významným bodem této práce je návrh a realizace vhodných zkušebních těles, která budou ve společnosti ŠKODA AUTO a.s. využívána ke kalibraci obou výše zmíněných systémů. Autor v této kapitole dle zadání diplomové práce navrhl a zrealizoval několik zkušebních těles. Všechna tělesa byla navržena v souladu s řadou směrnic VDI/VDE 2634, která je v současné době jedinou použitelnou odbornou literaturou pro kalibrace těchto přístrojů. S přihlédnutím k nejpoužívanějším měřícím objemům ve společnosti ŠKODA AUTO a.s. bylo pro účely kalibrací nutné vyrobit celkem pět zkušebních těles a další čtyři upravit.

Primární cíl práce je detailně popsán v šesté kapitole. Tímto cílem je návrh vhodné interní kalibrační metodiky. Uvedený kalibrační postup byl vypracován dle vzoru a v souladu s veškerými souvisejícími interními předpisy společnosti ŠKODA AUTO a.s. a požadavky již uvedené řady směrnic VDI/VDE 2634.

Další cíl diplomové práce, stanovení nejistot kalibrace je popsán v sedmé kapitole. Z důvodu komplexnosti, experimentálního charakteru a s tím související časové náročnosti byl v této kapitole uveden pouze návrh pro výpočet nejistot kalibrace. Autor bude i nadále v rámci své pracovní náplně této problematice věnovat.

V osmé kapitole byl navržený kalibrační postup ověřen v praxi na robotizovaném pracovišti. Z posuzovaných parametrů (*PF*, *PS*, *SD*, *E* a *ET*) nevyhověl pouze parametr chyby snímání tvaru zkušební koule (*PF*). Daná skutečnost byla pravděpodobně způsobena lesklým povrchem otočného stolu, který odrážel promítané světelné vzory na zkušební kouli, což vedlo k naměření nesprávných hodnot. Tento nežádoucí efekt lze jednoduše eliminovat aplikací matného prášku na povrch otočného stolu. Opravná měření však nebyla z kapacitních důvodů zrealizována. V rámci posuzovaných parametrů dále nebylo možné vyhodnotit chybu měření délky (*E*). Důvodem byly nekalibrované parametry tvarů a průměrů snímaných koulí. Jedná se o nedostatek, který bude odstraněn při následné recalibraci zkušebního tělesa (ŠKODA AUTO a.s. zpravidla provádí recalibrace těchto zkušebních těles jednou ročně). Ostatní posuzované parametry vyhověly. Z výsledků vyhodnocení parametru *ET* lze zároveň konstatovat, že systém TRITOP dokáže snímky transformovat do společného souřadného systému velmi přesně. Na pracovišti toto vedlo k překvapivému zjištění, neboť tento výsledek nebyl očekáván.

V poslední kapitole stanovené zadáním diplomové práce autor shrnul základní požadavky a především své poznatky související s kalibrací.

Závěrem lze konstatovat, že z výsledků uvedených v diplomové práci vyplynul značný potenciál ke zlepšení kalibrační procedury.

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KOŠŤÁK, O. *3D metody bezkontaktního měření*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2012. 73 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Václav Chmelík, CSc.
- [2] MOONS, T. 3D Reconstruction from Multiple Images Part 1: Principles. *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision* [online]. 2008, 4(4), 287-404 [cit. 2017-05-23]. DOI: 10.1561/06000000007. ISSN 1572-2740. Dostupné z: <http://www.nowpublishers.com/article/Details/CGV-007>
- [3] ČERMÁK, J. *Metody 3D skenování objektů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Marada, Ph.D.
- [4] SHENGYONG, C., et al. *Active sensor planning for multiview vision tasks*. Berlin: Springer, 2008. ISBN 9783540770718. Dostupné z: http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9783540770718-c2.pdf?SGWID=0-0-45-494886-p173786413
- [5] GOTHI, S.S. a P. RASTOGI. Fringe Projection Techniques: Whither we are?. *Optics and lasers in engineering* [online]. 2010, roč. 48, č. 2, s. 133-140 [cit. 2017-05-05]. ISSN 0143-8166. Dostupné z: <http://infoscience.epfl.ch/record/140745/files/OLEN.pdf>
- [6] DOKOUPIL, F. *Stanovení odchylek měření 3D optického skeneru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 71 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Paloušek, Ph.D.
- [7] *MCAE Systems*. [online], [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/>
- [8] *ATOS User Manual: ATOS v6*, 2006. Braunschweig.
- [9] *Capture 3D: ATOS Triple Scan. Blue Light 3D Scanner* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.capture3d.com/3d-metrology-solutions/3d-scanners/atos-triple-scan>
- [10] *GOM*. [online], [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.gom.com/>
- [11] *TRITOP User Manual: TRITOP v5.4.1*, 2005. Braunschweig.
- [12] *Mentel*. [online], [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://mentel.co.th/th/wp-content/uploads/2016/01/HD5-1580x585-e1452824987401-1024x491.jpg>
- [13] *Tekniker*. [online], [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.tekniker.es/media/uploads/equipamiento/xES Sistema Medicion Fotogrametria Tritop 680x480px.jpg.pagespeed.ic.8BCSegcQac.jpg>
- [14] TNI 01 0115, *Mezinárodní metrologický slovník: Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)*, 2009.
- [15] SKOPAL, M. J. a A. FIALA, *Metrologická návaznost, kalibrace a ověření kalibrace* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: http://www.mzds.cz/P21_T&C.pdf.pdf
- [16] ČSN EN ISO 10360-1, *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přijímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM): Část 1: Slovník*, 2001.
- [17] *Optické měření se senzorem ViSCAN na RDS na měřicím stroji O-INSPECT a F25: Návod k obsluze*, 2011. Oberkochen.
- [18] *Quick Image*. [online], [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: http://www.quick-image.de/sites/default/files/pictures/ViSCAN_300.png

- [19] *Certificate for Calibration Object: Optical Calibration panel No. 111121/CP40/100/30288*, 2011. Braunschweig
- [20] VDI/VDE 2634 Blatt 1. *Optische 3D-Messsysteme: Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung*. 2002. Düsseldorf
- [21] VDI/VDE 2634 Blatt 2. *Optische 3-D-Messsysteme: Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung*. 2012. Düsseldorf
- [22] VDI/VDE 2634 Blatt 3. *Optische 3-D-Messsysteme: Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung in mehreren Einzelansichten*. 2008. Düsseldorf
- [23] GOM Acceptance test GOM MBH. *GOM Acceptance Test: Acceptance/Reverification Based on VDI/VDE 2636, Part 3*. Germany, 2012.
- [24] ČSN ISO 3290, *Valivá ložiska - Kuličky: Rozměry a tolerance*, 2000.
- [25] Interní zdroje ŠKODA AUTO a.s.
- [26] EA - 4/02 -M, *Dokument EA: Vyjádření nejistoty měření při kalibraci*, 2013.
- [27] ČSN EN ISO 14253-1, *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Zkoušení obrobků a měřidel měřením: Část 1: Pravidla rozhodování o prokazování shody nebo neshody se specifikacemi*, 2000.
- [28] JCGM 100:2008 GUM 1995 WITH MINOR CORRECTIONS, *Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement*, 2008.
- [29] ISO/TS 23165, *Geometrical product specifications (GPS): Guidelines for the evaluation of coordinate measuring machine (CMM) test uncertainty*, 2006.

12 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

12.1 Seznam tabulek

| | | |
|---------|--|----|
| TAB 1) | TABULKA ZÁKLADNÍCH VLASTNOSTÍ SYSTÉMU ATOS III TRIPLE SCAN | 29 |
| TAB 2) | TABULKA MĚŘICÍCH OBJEMŮ A DOPLŇKOVÝCH INFORMACÍ KE SPRÁVNÉMU NASTAVENÍ SYSTÉMU ATOS III TRIPLE SCAN | 29 |
| TAB 3) | KRITÉRIA PRO VÝBĚR VHODNÉHO OBJEKTIVU ZEISS VISCAN | 36 |
| TAB 4) | TABULKA DOPORUČENÝCH LIMITNÍCH ROZMĚRŮ ZKUŠEBNÍCH TĚLES PRO NEJPOUŽÍVANĚJŠÍ OBJEKTIVY VE ŠKODA AUTO A.S. | 39 |
| TAB 5) | ZKALIBROVANÉ HODNOTY POUŽITÝCH ZKUŠEBNÍCH TĚLES – KOULÍ | 40 |
| TAB 6) | ZKALIBROVANÉ HODNOTY POUŽITÝCH ZKUŠEBNÍCH TĚLES – BALL BARŮ SE DVĚMA KOULEMI | 42 |
| TAB 7) | ZKALIBROVANÉ VZDÁLENOSTI STŘEDŮ KOULÍ MULTI-BALL BAR BARU | 43 |
| TAB 8) | ZKALIBROVANÉ VZDÁLENOSTI STŘEDŮ REFERENČNÍCH BODŮ NA SCALE BARU | 44 |
| TAB 9) | VÝLEDNÉ HODNOTY PARAMETRŮ <i>PF</i> A <i>PS</i> PRO JEDNOTLIVÉ POLOHY ZKUŠEBNÍHO TĚLESA | 61 |
| TAB 10) | VÝLEDNÉ HODNOTY PARAMETRU <i>SD</i> A NAMĚŘENÉ HODNOTY DÉLKY (PRO VYHODNOCENÍ PARAMETRU <i>E</i>) V JEDNOTLIVÝCH POLOHÁCH ZKUŠEBNÍHO TĚLESA | 62 |
| TAB 11) | VÝLEDKY PARAMETRU <i>ET</i> PRO ZKALIBROVANÉ VZDÁLENOSTI REFERENČNÍCH BODŮ ZKUŠEBNÍHO TĚLESA | 63 |

12.2 Seznam obrázků

| | | |
|----------|--|----|
| OBR. 1) | TRIANGULAČNÍ TROJÚHELNÍK | 17 |
| OBR. 2) | TAXONOMIE OPTICKÝCH METOD POUŽÍVANÝCH PRO REKONSTRUKCI 3D TVARU OBJEKTŮ | 18 |
| OBR. 3) | ZJEDNODUŠENÝ MODEL STEREOVIZNÍHO SYSTÉMU | 19 |
| OBR. 4) | PRACOVNÍ POSTUP U PROFILOMETRIE STRUKTUROVANÉHO SVĚTLA | 20 |
| OBR. 5) | ZÁKLADNÍ ČLENĚNÍ PROMÍTANÝCH VZORŮ DLE STRUKTURY | 21 |
| OBR. 6) | PRINCIP BINÁRNÍHO A) VLEVO A ŠEDÉHO B) VPRAVO KÓDOVÁNÍ | 22 |
| OBR. 7) | VZORY S N-ÁRNÍM KÓDEM | 22 |
| OBR. 8) | KOMBINACE ŠEDÉHO KÓDU S LINIOVÝM FÁZOVÝM POSUNEM | 23 |
| OBR. 9) | KÓDOVÁNÍ VZORŮ NA HRANICÍCH PRUHŮ | 23 |
| OBR. 10) | PŘÍKLAD VZORU NEFORMÁLNÍ KODIFIKACE | 24 |
| OBR. 11) | PŘÍKLAD PROJEKCE DE BRUIJNOVA VZORU | 24 |
| OBR. 12) | PRINCIP TVORBY MATICOVÝCH VZORŮ Z BAREVNÝCH ZNAČEK | 25 |
| OBR. 13) | PRINCIP TERNÁRNÍHO KÓDOVÁNÍ VZORŮ | 25 |
| OBR. 14) | SYSTÉM ATOS III TRIPLE SCAN | 27 |
| OBR. 15) | ZÁKLADNÍ POPIS PŘÍSTROJE ATOS III TRIPLE SCAN A POUŽÍVANÝCH POJMŮ | 28 |
| OBR. 16) | PALETA DOTYKOVÝCH SOND GOM TOUCH PROBE | 30 |
| OBR. 17) | SYSTÉM ATOS III TRIPLE SCAN DOPLNĚNÝ O ATOS PLUS (NAD PROJEKTOREM) | 30 |
| OBR. 18) | PRINCIP MĚŘENÍ SE SYSTÉMEM TRITOP | 31 |
| OBR. 19) | HLAVNÍ ČÁSTI SYSTÉMU TRITOP | 31 |
| OBR. 20) | NEKÓDOVANÉ (A) A KÓDOVANÉ (B) ZNAČKY A REFERENČNÍ TYČE (C) | 32 |
| OBR. 21) | KVALIFIKAČNÍ NORMÁLY POUŽÍVANÉ PRO SAMOKALIBRACI PŘÍSTROJŮ ATOS | 34 |
| OBR. 22) | POLOHY KVALIFIKAČNÍHO NORMÁLU A NATOČENÍ KAMER PŘI SAMOKALIBRACI PŘÍSTROJŮ ATOS | 35 |
| OBR. 23) | 2D OPTICKÁ SNÍMACÍ HLAVA VISCAN OD FIRMY ZEISS | 36 |
| OBR. 24) | SNÍMEK NEKÓDOVANÉHO REFERENČNÍHO BODU O PRŮMĚRU 5 MM ZE SYSTÉMU VISCAN | 36 |
| OBR. 25) | PŘÍKLAD KALIBRACE VZDÁLENOSTI VYBRANÝCH BODŮ NA KVALIFIKAČNÍM NORMÁLU TYPU PANEL | 37 |

| | | |
|----------|--|----|
| OBR. 26) | FIRMOU GOM NAVRŽENÁ ZKUŠEBNÍ TĚLESA PRO KALIBRACI PŘÍSTROJŮ ATOS | 38 |
| OBR. 27) | ZKUŠEBNÍ TĚLESA - KOULE PRO KALIBRACI SNÍMACÍHO SYSTÉMU A) VLEVO Ø 25 MM, B) VPRAVO Ø 100 MM | 40 |
| OBR. 28) | BALL BARY O DÉLKÁCH 150MM, 300 MM A 500 MM | 41 |
| OBR. 29) | BALL BAR O DÉLCE 1000 MM | 41 |
| OBR. 30) | BALL BAR O DÉLCE 1140 MM | 42 |
| OBR. 31) | UPRAVENÉ ZKUŠEBNÍ TĚLESO OD FIRMY KOBÁ | 43 |
| OBR. 32) | ZKUŠEBNÍ TĚLESO TYPU SCALE BAR S VYLEPENÝMI REFERENČNÍMI BODY | 44 |
| OBR. 33) | PŘÍKLADY SMĚRŮ SNÍMÁNÍ ZKUŠEBNÍ KOULE | 50 |
| OBR. 34) | PŘÍKLAD RŮZNÝCH POZIC STEJNÉ ZKUŠEBNÍ KOULE V MĚŘICÍM OBJEMU SENZORU | 50 |
| OBR. 35) | DOPORUČENÉ USPOŘÁDÁNÍ ZKUŠEBNÍHO TĚLESA – BALL BARU PŘI URČOVÁNÍ CHYBY ROZTEČE KOULÍ | 51 |
| OBR. 36) | PŘÍKLAD VYHODNOCENÍ DÉLEK NA ZKUŠEBNÍM TĚLESE TYPU SCALE BAR | 52 |
| OBR. 37) | DOPORUČENÉ VARIANTY USPOŘÁDÁNÍ ZKUŠEBNÍHO TĚLESA TYPU SCALE BAR V MĚŘICÍM OBJEMU | 52 |
| OBR. 38) | SESTAVA POUŽITÁ PRO KALIBRACI | 61 |
| OBR. 39) | MĚŘENÍ ZKUŠEBNÍ KOULE PŘI KALIBRACI SNÍMACÍHO SYSTÉMU ATOS | 62 |
| OBR. 40) | MĚŘENÍ BALL BARU (L = 500 MM) PŘI KALIBRACI SYSTÉMU ATOS | 63 |
| OBR. 41) | PŘÍKLAD DOBRÉHO A) VLEVO A ŠPATNÉHO B) VPRAVO SNÍMÁNÍ NEKÓDOVANÉHO REFERENČNÍHO BODU | 65 |

12.3 Seznam zkratek

| | |
|---------|---|
| ATOS | Advanced Topometric Sensor, pokročilý topometrický snímač; označení pro měřicí přístroj od společnosti GOM |
| BIPM | Bureau International des Poids et Mesures, mezinárodní úřad pro míry a váhy |
| CAD | Computer Aided Design, počítačem podpořený návrh |
| CCD | Charge Coupled Device, zařízení s nábojovou vazbou; označení pro optickou součástku používanou v kamerách a fotoaparátech pro snímání obrazu |
| ČMI | Český metrologický institut |
| ČSN | Česká technická norma |
| EN | Evropská norma |
| ISO | International Organization for Standardization, mezinárodní organizace pro standardizaci |
| GOM | Gesellschaft für Optische Messtechnik, společnost pro optickou měřicí techniku |
| GUM | Guide to the expression of uncertainty in measurement, pokyn pro vyjadřování nejistot měření |
| OCMM | Optical Coordinate Measuring Machine, optický souřadnicový měřicí stroj |
| PCMCIA | Personal Computer Memory Cards international Association, mezinárodní sdružení pro paměťové karty personálních počítačů; specifikace rozhraní a technologie přídavných zařízení (původně jen paměťových karet) velikosti kreditní karty. Nyní jen PC karta. |
| PSA | Probing / Spacing Artifact, zkušební těleso používané výrobcem pro kalibrace přístrojů ATOS |
| QSD | Modul systému PALSTAT CAQ sloužící k vytváření, schvalování, verzování a management dokumentů v elektronické podobě |
| RDS | Označení pro otočnou hlavu firmy ZEISS používanou u taktálních souřadnicových měřicích strojů |
| STL | Datový formát polygonální síť |
| SW | Software |
| TRITOP | Označení pro fotogrammetrický měřicí systém od společnosti GOM |
| VDI/VDE | Verein Deutscher Ingenieure / Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik, sdružení německých inženýrů / sdružení pro elektrotechniku, elektroniku a informační techniky; také označení oborových norem vydávaných touto organizací |

13 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A

Kalibrace snímacího systému.

Použitý měřicí objem MV 560.

Měřena koule o průměru 25 mm:

- A.1 Ve středu otočného stolu bez podložení
- A.2 Ve středu otočného stolu s podložním
- A.3 Mimo osu otočného stolu bez podložení
- A.4 Mimo osu otočného stolu s podložním

Příloha B

Kalibrace pomocí měrek s koulemi.

Použitý měřicí objem MV 560.

Měřen ball bar o délce 500 mm:

- B.1 Ve středu otočného stolu bez podložení
- B.2 Ve středu otočného stolu s podložním
- B.3 Mimo osu otočného stolu bez podložení
- B.4 Mimo osu otočného stolu s podložním

Příloha C

Kalibrace pomocí tyče s kuželi / koulemi (TRITOP).

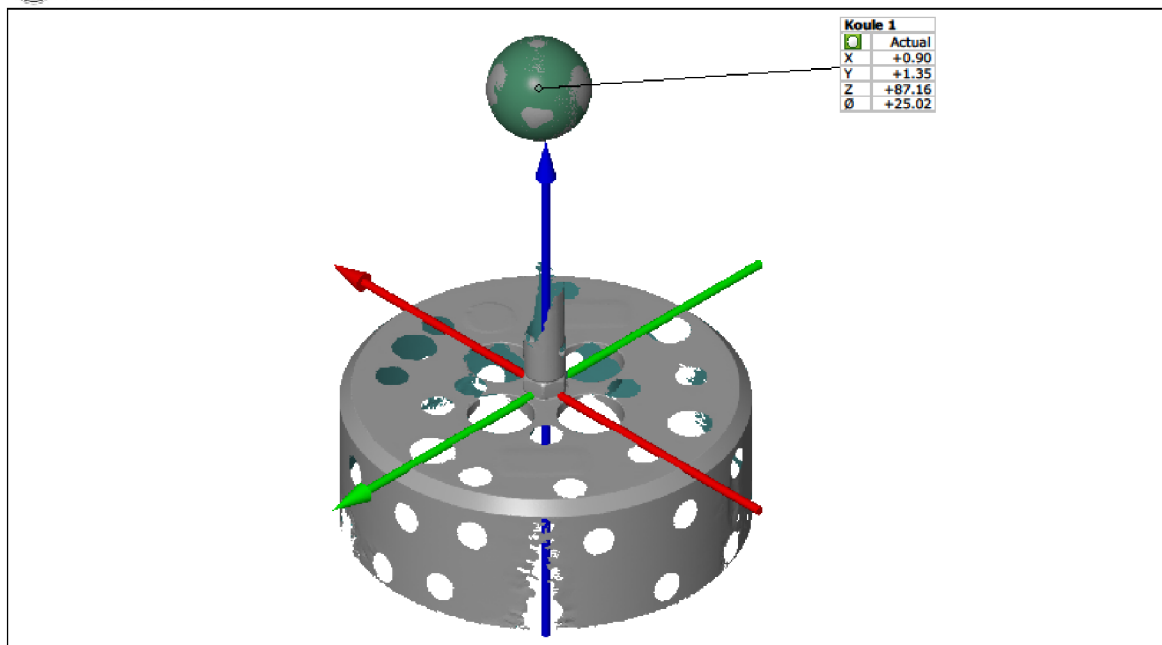
Měřena tyč s kuželi / koulemi o délce 1400 mm.

PŘÍLOHA A.1

 **SKODA**

Měrový protokol

Souřadnice středu koule



| | | |
|-------------------------------|---|------------------------------------|
| Typ: Kalibrace | Stroj / Přesnost: Atos III MV560 / 0.00127mm | Datum: 9.5.2017 |
| Číslo dílu: | Teplota: 24.7°C | MĚŘI: Sotona |
| Číslo nástroje: Koule | Tolerance: Ne | Číslo protokolu: |
| Název dílu (OP): 25mm | Offset / Smrštění: Ne / Ne | Vyrovnání: Plane-line-point |
| Rozsah měření: Komplet | Číslo dat: | Poznámka: Střed |

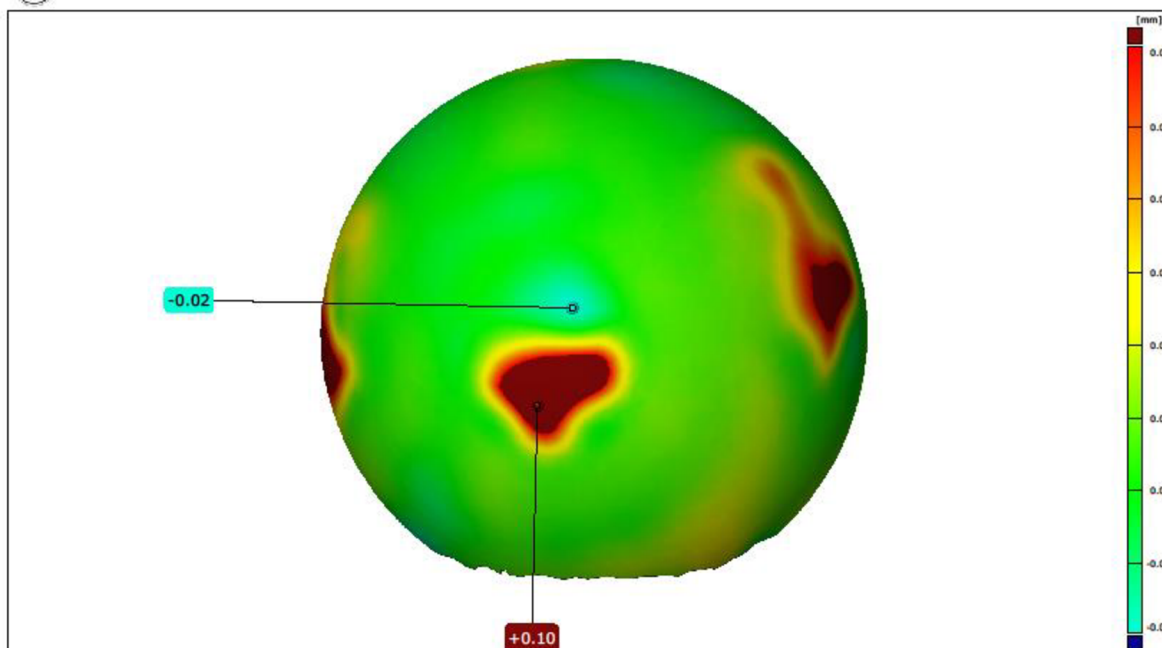
Fig. 7. / For file: PSMW00127... ŠKODA AUTO a.s., T.Ú. Ústava Komety 859, 295 60 Mladá Boleslav, Česká republika

1/2

 **SKODA**

Měrový protokol

Min., max. odchylka



| | | |
|-------------------------------|---|------------------------------------|
| Typ: Kalibrace | Stroj / Přesnost: Atos III MV560 / 0.00127mm | Datum: 9.5.2017 |
| Číslo dílu: | Teplota: 24.7°C | MĚŘI: Sotona |
| Číslo nástroje: Koule | Tolerance: Ne | Číslo protokolu: |
| Název dílu (OP): 25mm | Offset / Smrštění: Ne / Ne | Vyrovnání: Local best-fit 1 |
| Rozsah měření: Komplet | Číslo dat: | Poznámka: Střed |

Fig. 7. / For file: PSMW00127... ŠKODA AUTO a.s., T.Ú. Ústava Komety 859, 295 60 Mladá Boleslav, Česká republika

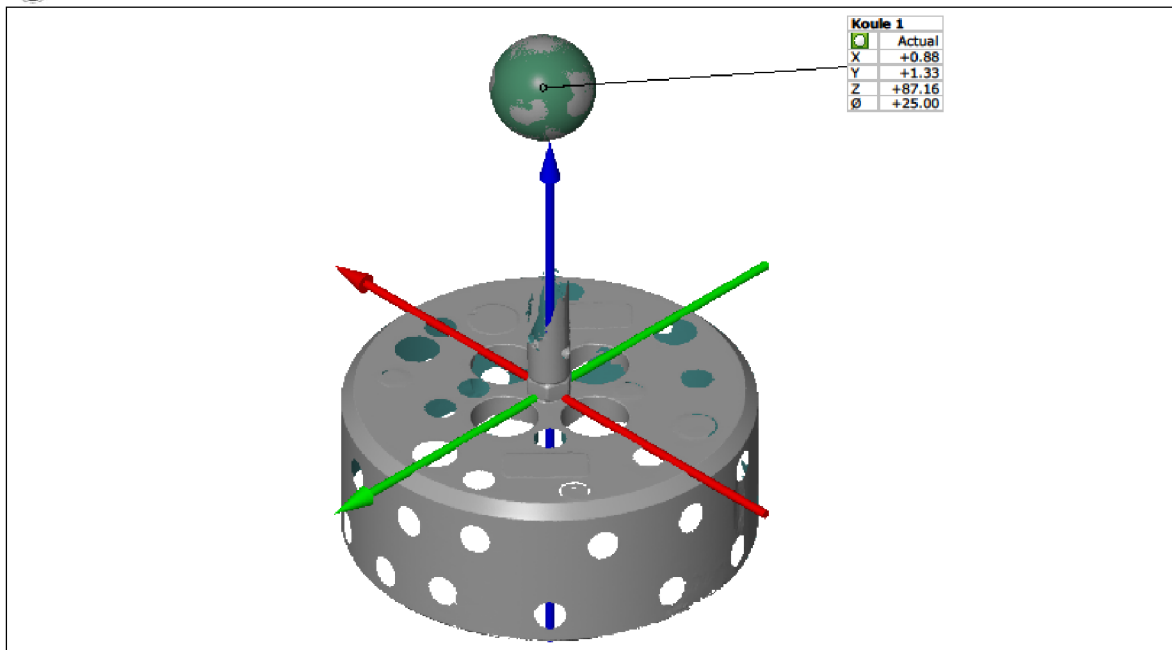
2/2

PŘÍLOHA A.2



Měrový protokol

Souřadnice středu koule



| | | |
|-------------------------------|--|------------------------------------|
| Typ: Kalibrace | Stroj / Přesnost: Atos III MV560 / 0.0095mm | Datum: 9.5.2017 |
| Číslo dílu: | Teplota: 24.7°C | Měří: Sotona |
| Číslo nástroje: Koule | Tolerance: Ne | Číslo protokolu: |
| Název dílu (OP): 25mm | Offset / Smrštění: Ne / Ne | Vyrovnání: Plane-line-point |
| Rozsah měření: Komplet | Číslo dat: | Poznámka: střed - podloženo |

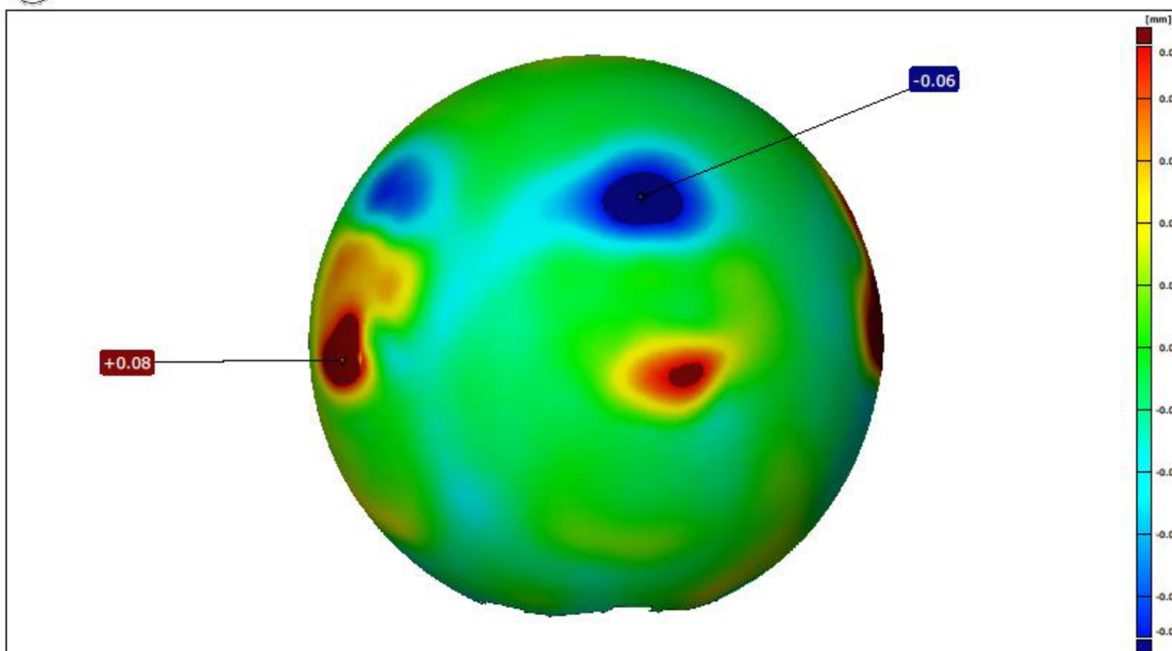
Fig. 7.7 / Povrch: PSW000001 ŠKODA AUTO a.s., Tř. Čáslavská, Komořany 859 297 60 Kladno, Republika Česká

1/2



Měrový protokol

Min., max. odchylka



| | | |
|-------------------------------|--|------------------------------------|
| Typ: Kalibrace | Stroj / Přesnost: Atos III MV560 / 0.0095mm | Datum: 9.5.2017 |
| Číslo dílu: | Teplota: 24.7°C | Měří: Sotona |
| Číslo nástroje: Koule | Tolerance: Ne | Číslo protokolu: |
| Název dílu (OP): 25mm | Offset / Smrštění: Ne / Ne | Vyrovnání: Local best-fit 1 |
| Rozsah měření: Komplet | Číslo dat: | Poznámka: střed - podloženo |

Fig. 7.7 / Povrch: PSW000001 ŠKODA AUTO a.s., Tř. Čáslavská, Komořany 859 297 60 Kladno, Republika Česká

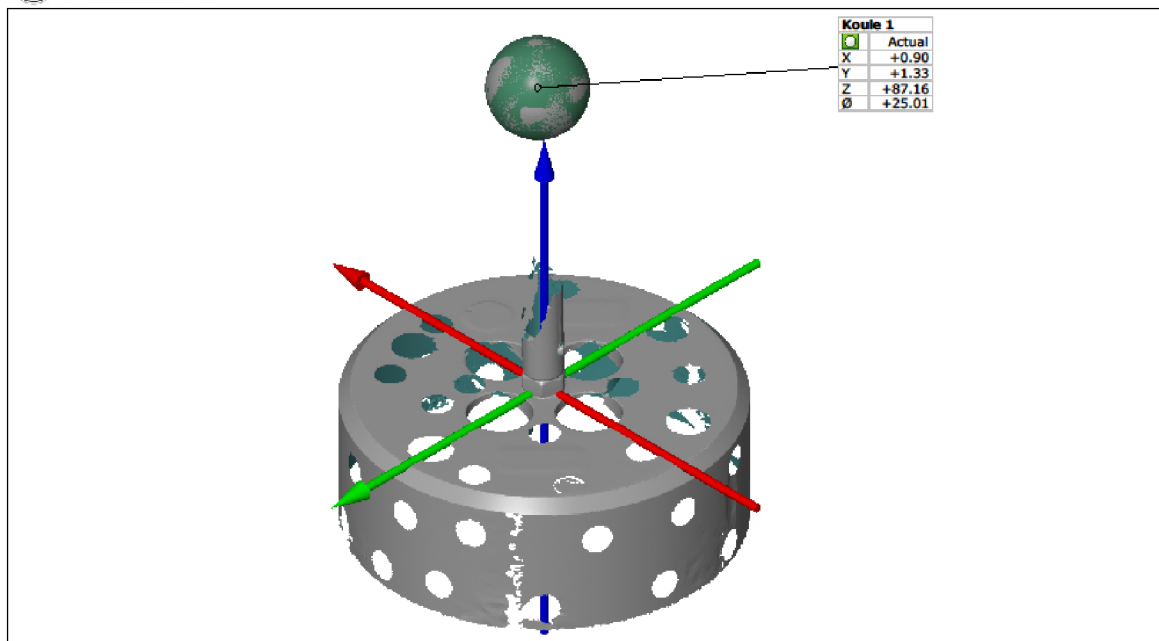
2/2

PŘÍLOHA A.3



Měrový protokol

Souřadnice středu koule



| | | |
|-------------------------------|---|------------------------------------|
| Typ: Kalibrace | Stroj / Přesnost: Atos III MV560 / 0.00137mm | Datum: 9.5.2017 |
| Číslo dílu: Koule | Teplota: 24.7°C | Měří: Sotona |
| Číslo nástroje: Koule | Tolerance: Ne | Číslo protokolu: |
| Název dílu (OP): 25mm | Offset / Smrštění: Ne / Ne | Vyrovňání: Plane-line-point |
| Rozsah měření: Komplet | Číslo dat: | Poznámka: mimo střed |

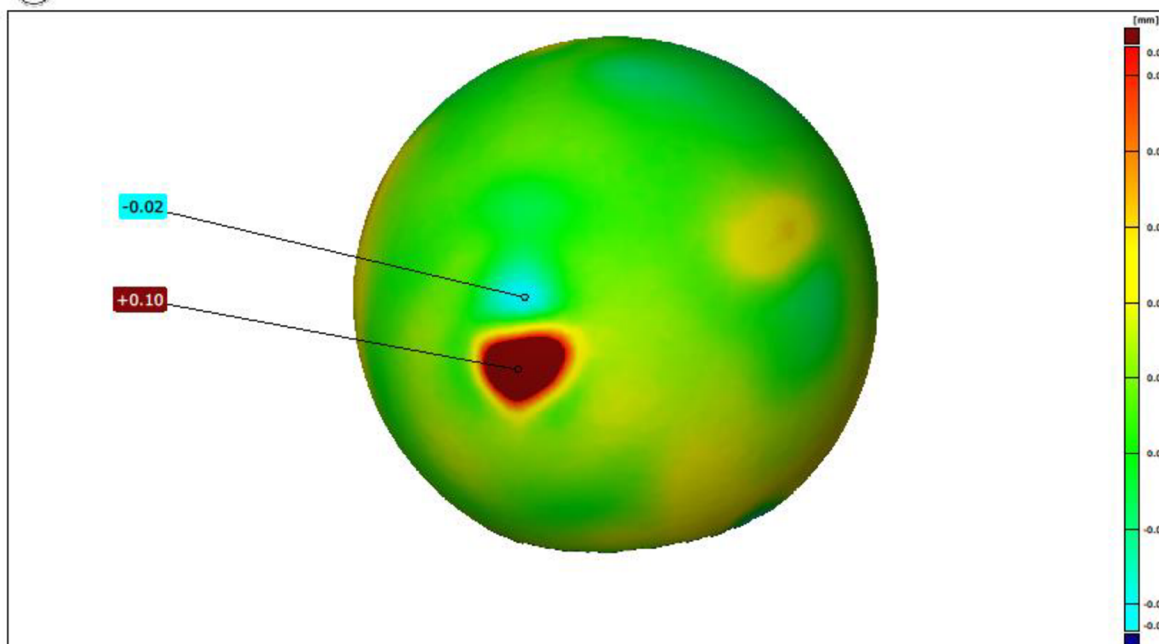
Fig. 7. / Forth. PSM/02/03 ŠKODA AUTO a.s., Tř. Čáslava-Kometa 819, 293 60 Mladá Boleslav, Škoda rep. s.r.o.

1/2



Měrový protokol

Min., max. odchylka



| | | |
|-------------------------------|---|------------------------------------|
| Typ: Kalibrace | Stroj / Přesnost: Atos III MV560 / 0.00137mm | Datum: 9.5.2017 |
| Číslo dílu: Koule | Teplota: 24.7°C | Měří: Sotona |
| Číslo nástroje: Koule | Tolerance: Ne | Číslo protokolu: |
| Název dílu (OP): 25mm | Offset / Smrštění: Ne / Ne | Vyrovňání: Local best-fit 1 |
| Rozsah měření: Komplet | Číslo dat: | Poznámka: mimo střed |

Fig. 7. / Forth. PSM/02/03 ŠKODA AUTO a.s., Tř. Čáslava-Kometa 819, 293 60 Mladá Boleslav, Škoda rep. s.r.o.

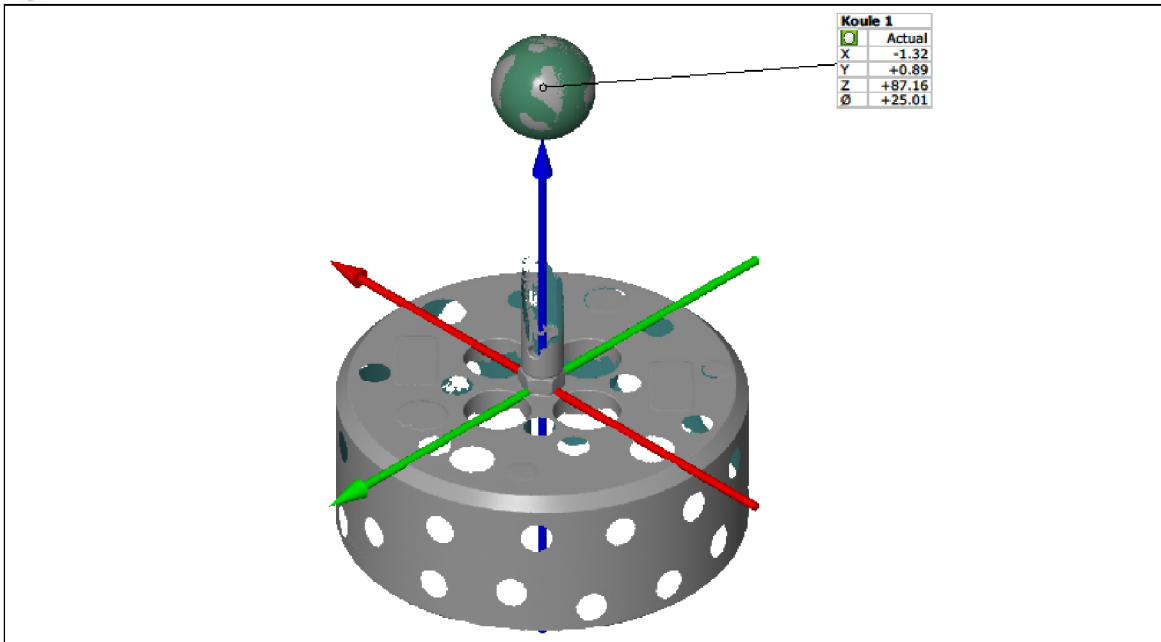
2/2

PŘÍLOHA A.4



Měřový protokol

Souřadnice středu koule



| | | | | | |
|------------------|-----------|--------------------|---------------------------|------------------|------------------------|
| Typ: | Kalibrace | Stroj / Přesnost: | Atos III MV560 / 0.0085mm | Datum: | 9.5.2017 |
| Číslo dílu: | | Teplota: | 24.7°C | Měřil: | Sotona |
| Číslo nástroje: | Koule | Tolerance: | Ne | Číslo protokolu: | |
| Název dílu (OP): | 25mm | Offset / Smrštění: | Ne / Ne | Vyrovnání: | Plane-line-point |
| Rozeah měření: | Komplet | Číslo dat: | | Poznámka: | mimo střed - podloženo |

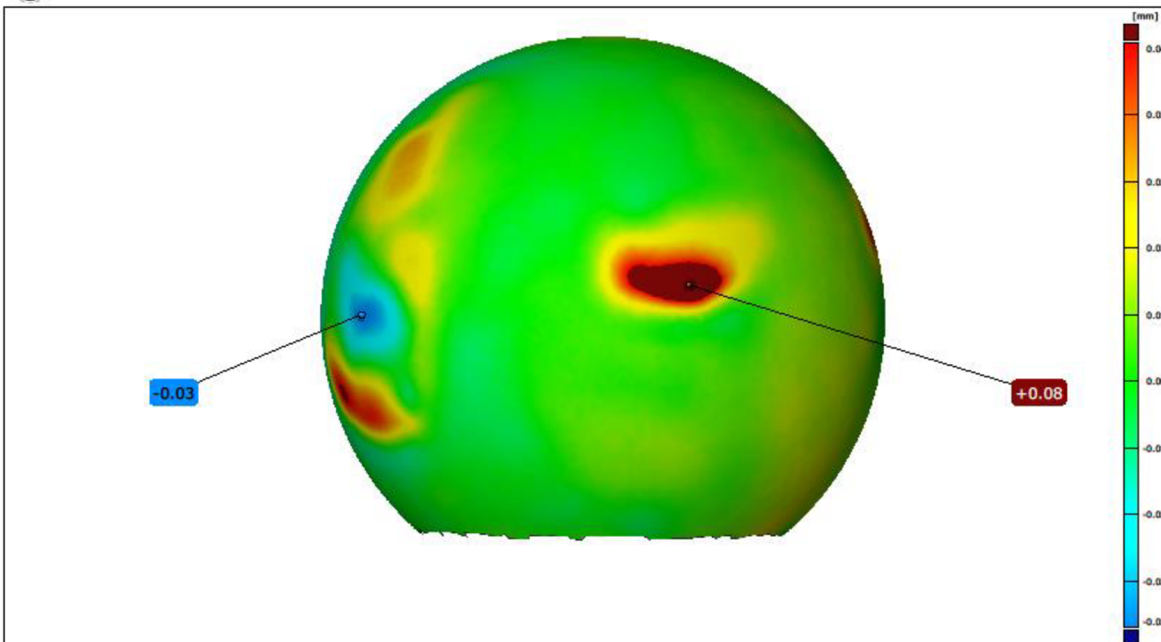
Fig. 1. / Part: PSW00001 / ŠKODA AUTO a.s., T.Ú. Výzk. a Vývoj. 859, 293 60 Mladá Boleslav, Česká rep. / Čes.

1/2



Měřový protokol

Min., max. odchylka

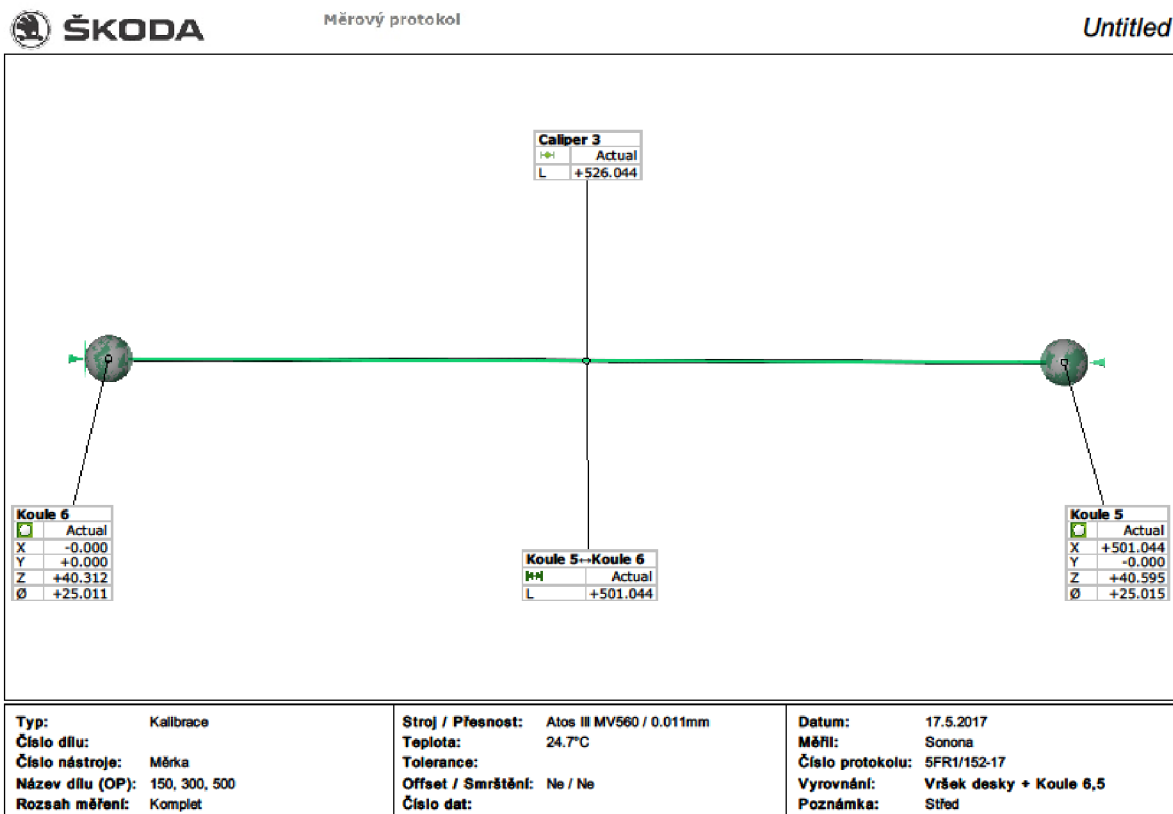


| | | | | | |
|------------------|-----------|--------------------|---------------------------|------------------|------------------------|
| Typ: | Kalibrace | Stroj / Přesnost: | Atos III MV560 / 0.0085mm | Datum: | 9.5.2017 |
| Číslo dílu: | | Teplota: | 24.7°C | Měřil: | Sotona |
| Číslo nástroje: | Koule | Tolerance: | Ne | Číslo protokolu: | |
| Název dílu (OP): | 25mm | Offset / Smrštění: | Ne / Ne | Vyrovnání: | Local best-fit 1 |
| Rozeah měření: | Komplet | Číslo dat: | | Poznámka: | mimo střed - podloženo |

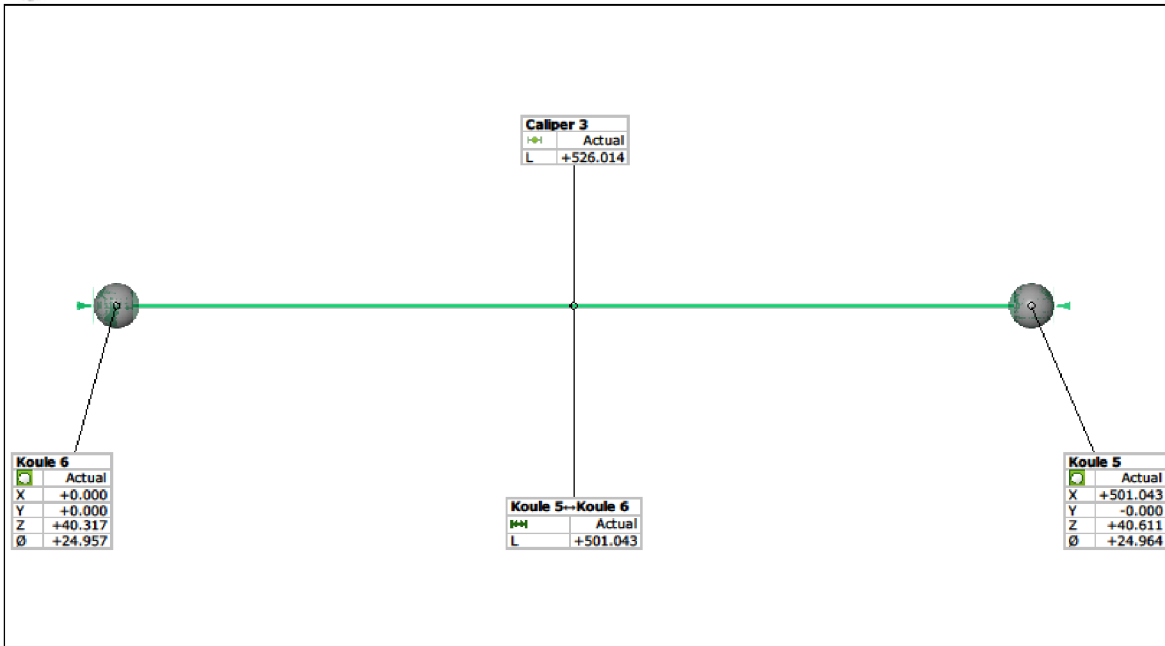
Fig. 1. / Part: PSW00001 / ŠKODA AUTO a.s., T.Ú. Výzk. a Vývoj. 859, 293 60 Mladá Boleslav, Česká rep. / Čes.

2/2

PŘÍLOHA B.1

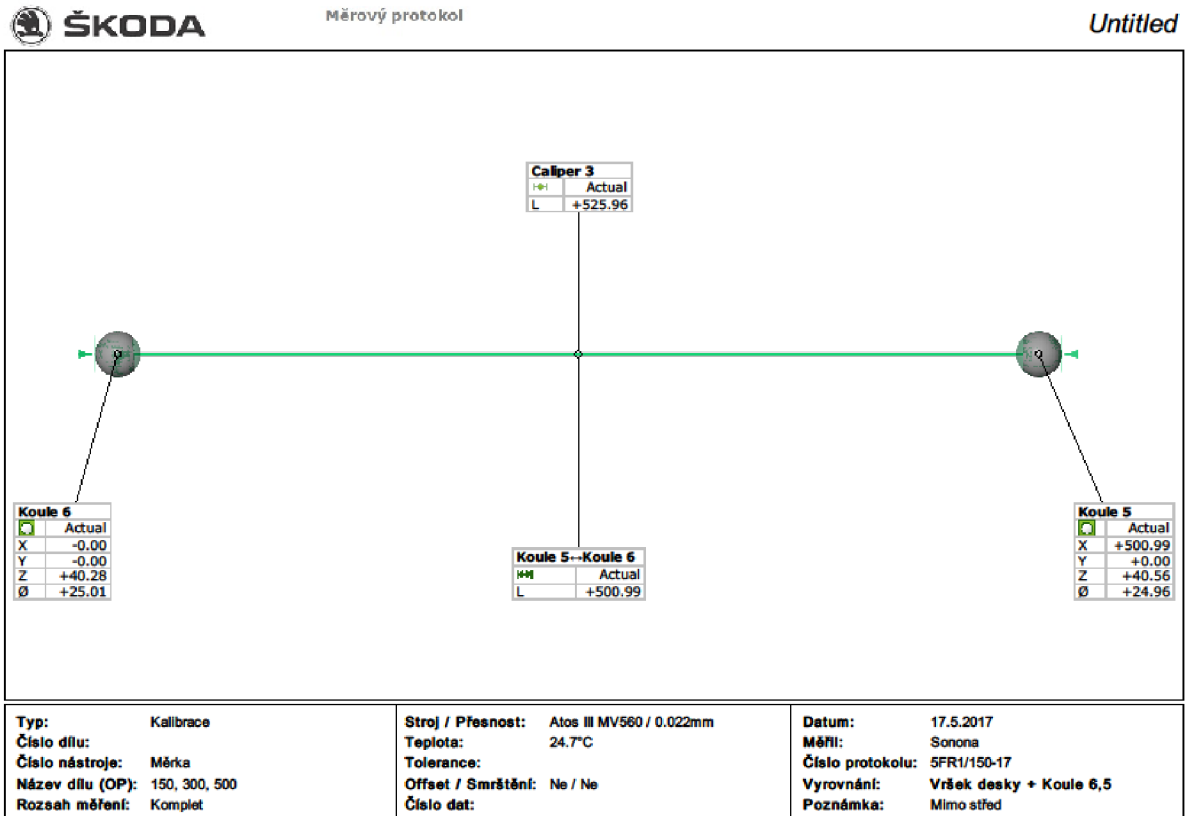


PŘÍLOHA B.2



| | | |
|---|---|---|
| Typ: Kalibrace Číslo dílu: Číslo nástroje: Měrka Název dílu (OP): 150, 300, 500 Rozsah měření: Komplet | Stroj / Přesnost: Atos III MV560 / 0.02mm Teplota: 24.7°C Tolerance: Offset / Smrštění: Ne / Ne Číslo dat: | Datum: 17.5.2017 Měřil: Sonona Číslo protokolu: 5FR1/153-17 Vyrovnání: Vršek desky + Koule 6,5 Poznámka: Střed podloženo |
|---|---|---|

PŘÍLOHA B.3



PŘÍLOHA B.4



Měrový protokol

Untitled

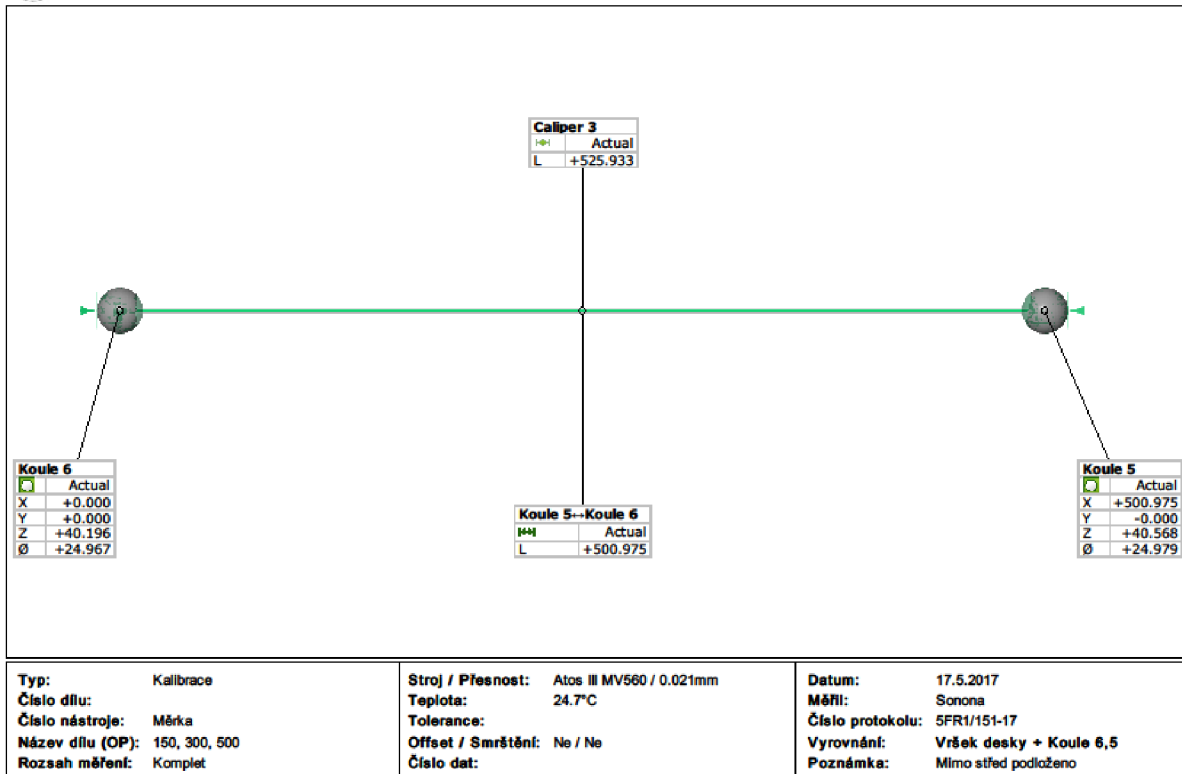


Fig. 7.1 / Fig. 10.15W322222

ŠKODA AUTO a.s., Tl. Václav Klementa 858, 295 60 Mladá Boleslav, 5. úroveň dílny

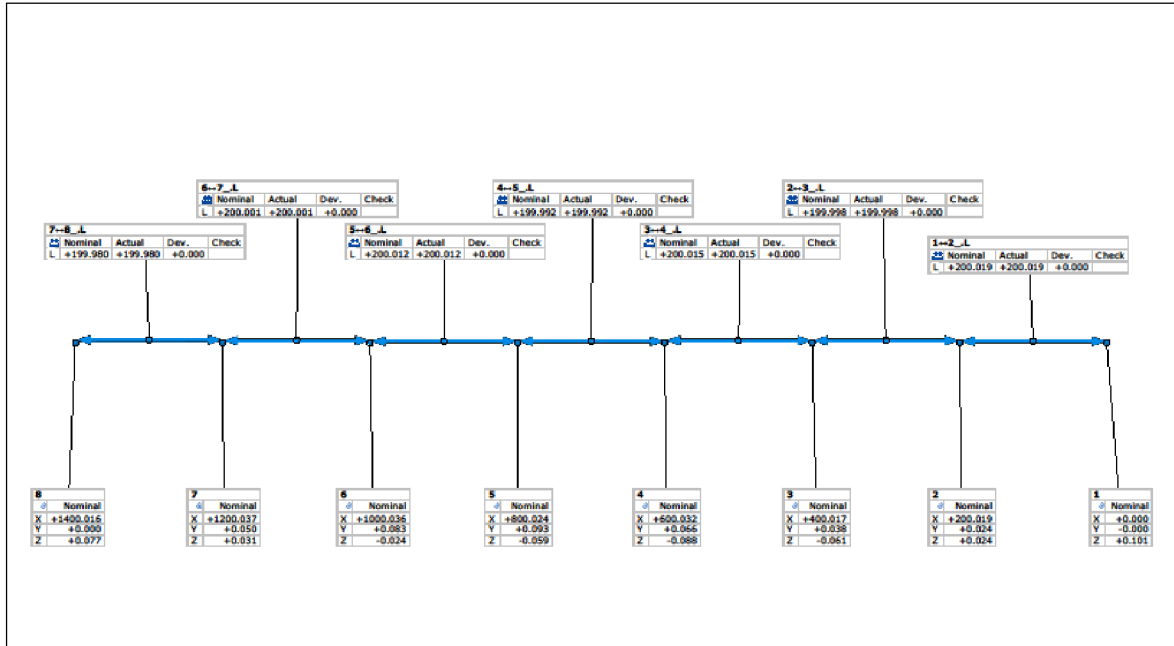
2/2

PŘÍLOHA C



Měrový protokol

Vzdálenosti



| | | |
|-----------------------------------|--|-------------------------------------|
| Typ: Kalibrace | Stroj / Přesnost: Atos III+ MV560 / 0.013mm | Datum: 24.5.2017 |
| Číslo dílu: | Teplota: 27°C | Měří: Musil |
| Číslo nástroje: Měrka 1400 | Tolerance: Ne | Číslo protokolu: 5FR1/172-17 |
| Název dílu (OP): Trítrop | Offset / Smrštění: Ne / Ne | Vyrovnaní: 3-2-1 alignment 1 |
| Rozsah měření: Vzdálenosti | Číslo dat: | Poznámka: |

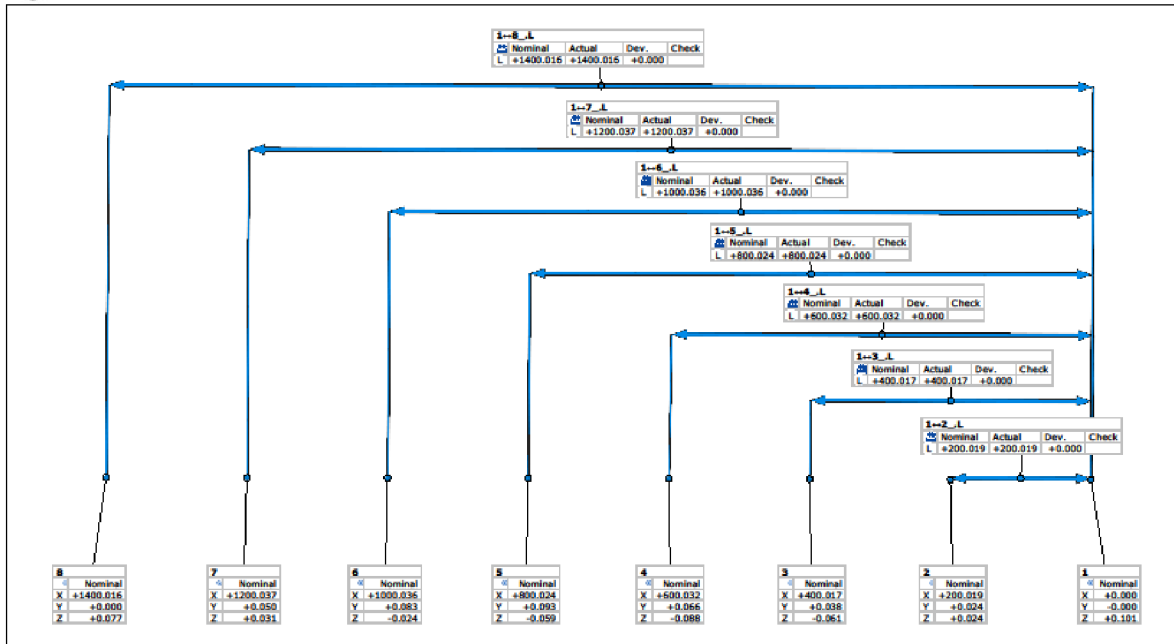
Fig. 7. / Vyř. št. PSW/.../... ŠKODA AUTO a.s., Tř. Čáslava, Křižovatka 889, 295 60 Klatov, Republika ČR

1/2



Měrový protokol

Vzdálenosti



| | | |
|-----------------------------------|--|-------------------------------------|
| Typ: Kalibrace | Stroj / Přesnost: Atos III+ MV560 / 0.013mm | Datum: 24.5.2017 |
| Číslo dílu: | Teplota: 27°C | Měří: Musil |
| Číslo nástroje: Měrka 1400 | Tolerance: Ne | Číslo protokolu: 5FR1/172-17 |
| Název dílu (OP): Trítrop | Offset / Smrštění: Ne / Ne | Vyrovnaní: 3-2-1 alignment 1 |
| Rozsah měření: Vzdálenosti | Číslo dat: | Poznámka: |

Fig. 7. / Vyř. št. PSW/.../... ŠKODA AUTO a.s., Tř. Čáslava, Křižovatka 889, 295 60 Klatov, Republika ČR

2/2