

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Porovnání měřicích metod pro kontrolu kvality dílů

Measuring Methods Comparison for Part Quality Control

Student:

Bc. Jakub Návrat

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Robert Čep, Ph.D.

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jakub Návrat**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Téma: **Porovnání měřicích metod pro kontrolu kvality dílů**
Measuring Methods Comparison for Part Quality Control

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky.
2. Rozdělení měřicích metod.
3. Chyby a nejistoty měření.
4. Popis konstrukce a funkce použitých přístrojů.
5. Experimentální měření a jejich vyhodnocení.
6. Diskuze a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

ČEPOVÁ, L.; PETŘKOVSKÁ, L. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011. 100 s. ISBN 978-80-248-2514-4.

PETŘKOVSKÁ, L.; ČEPOVÁ, L. *Metrologie a řízení kvality*. Ostrava: VŠB-TUO, 2012. 142 s. ISBN 978-80-248-2771-1. Dostupné na <http://projekty.fs.vsb.cz/459/?ucebni-opory>.

TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie, část 1*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2006. 104 s. ISBN 80-248-0671-

PERNIKÁŘ, J.; TYKAL, M.; VAČKÁŘ, J. *Jakost a metrologie, Část metrologie*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1997-0.

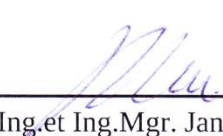
CHRISTOPH, R.; NEUMANN, H. J. *Multisenzorová souřadnicová měřicí technika*. Uherské Hradiště : L. V. Print Uherské Hradiště, D-80992 München, 2008. 106 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Robert Čep, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V práci jsem použil interní údaje o měřicím přístroji získané od firmy Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o., firma s jejich zveřejněním souhlasí.

V Ostravě dne 20. května 2019.

.....

Podpis studenta

Prohlášení spolupracující osoby

Souhlasím se zveřejněním diplomové práce Porovnání měřicích metod pro kontrolu kvality dílů studenta Jakuba Návrata dle požadavků čl. 6, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských studijních programech VŠB-TU Ostrava.

Společnost:

Název: Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o.

Sídlo: Hlubočky – Mariánské Údolí, Nádražní 400, PSČ 783 65

IČO: 25384961

Jméno a příjmení konzultanta: Ing. Dušan Slimařík, Ph.D.

Jméno a příjmení oprávněné osoby: Mgr. Edita Krejčí Vinklerová

V Hlubočkách-Mariánském Údolí dne 16. května 2019.


.....
Podpis oprávněné osoby

Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o.
33
Nádražní Mariánské Údolí
IČ: 25384961 DIČ: CZ25384961
585 128 111

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. května 2019

.....
Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Jakub Návrat

Adresa trvalého pobytu autora práce: Luběnice 148, Luběnice 783 46

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

NÁVRAT, J. Porovnání měřících metod pro kontrolu kvality dílů: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2019, 85 s. Vedoucí práce: Čep, R.

Diplomová práce se zabývá problematikou měření optickým měřícím systémem ATOS Triple Scan 16M a souřadnicovým měřícím strojem Wenzel LH 65 – X3M Premium. V teoretické části je rozdělení měřících systémů, kde je především kladen důraz na rozdělení optických systémů. Dále jsou, zde popsány souřadnicové měřící stroje. Praktická část práce se zabývá porovnáním těchto systémů, kde u každého z nich byla provedena série měření z nich, se poté vypočítal výběrový průměr a celková nejistota pro každý stroj. Výsledky se následně porovnal a z nich vyplynula využitelnost daného měřícího systému.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

NÁVRAT, J. Measuring Methods Comparison for Part Quality Control: Diploma Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2019, 85 s. Thesis head: Čep, R.

Master thesis is focus on measurement of optical measuring system ATOS Triple Scan 16M and coordinate measuring machine Wenzel LH 65 - X3M Premium. In the theoretical part there is a division of measuring systems, where the emphasis is mainly on the division of optical systems. Furthermore, there are described coordinate measuring machines. The practical part is focus on the comparison between these systems, where a series of measurements was made for each of them, then the sample mean and the total uncertainty for each machine were calculated. Subsequently, the results were compared and the usability of the measuring system emerged.

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	10
1 ÚVOD.....	11
2 ROZDĚLENÍ MĚŘICÍCH METOD	12
2.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ REFLEXNÍCH OPTICKÝCH MĚŘICÍCH SYSTÉMŮ	12
2.1.1 <i>Pasivní metody</i>	13
2.1.2 <i>Aktivní metody</i>	14
2.2 STRUKTUROVANÉ SVĚTLO	14
2.3 DRUHY VZORŮ STRUKTUROVANÉHO SVĚTLA	16
2.3.1 <i>Temporální kodifikace</i>	17
2.3.2 <i>Prostorová kodifikace</i>	20
2.3.3 <i>Přímá kodifikace</i>	22
2.4 PŘESNOST MĚŘENÍ OPTICKÝCH MĚŘICÍCH SYSTÉMŮ.....	23
2.4.1 <i>Experimentální zjišťování nejistot optických skenerů</i>	24
2.5 MATNICÍ PRAŠKY OPTICKÝCH MĚŘICÍCH PŘÍSTROJŮ	27
2.6 SOUŘADNICOVÉ MĚŘICÍ STROJE	28
2.6.1 <i>Typy konstrukcí CMM</i>	29
2.6.2 <i>Snímací systémy</i>	30
2.6.3 <i>Odměřovací systémy</i>	33
3 CHYBY A NEJISTOTY MĚŘENÍ	35
3.1 CHYBY MĚŘENÍ.....	35
3.1.1 <i>Chyby hrubé</i>	35
3.1.2 <i>Chyby systematické</i>	36
3.1.3 <i>Chyby náhodné</i>	37
3.2 NEJISTOTA MĚŘENÍ.....	37
3.2.1 <i>Standartní nejistota typu A (u_a)</i>	38
3.2.2 <i>Standardní nejistota typu B (u_b):</i>	38
3.2.3 <i>Kombinovaná standartní nejistota</i>	39
3.2.4 <i>Rozšířená nejistota</i>	39
4 POPIS KONSTRUKCE A FUNKCE POUŽITÝCH PŘÍSTROJŮ	40
4.1 POPIS KONSTRUKCE A FUNKCE WENZEL LH 65 – X3M PREMIUM	41
4.1.1 <i>Princip odměřování</i>	41
4.2 POPIS KONSTRUKCE A FUNKCE SYSTÉMU ATOS III TRIPLE SCAN 16M	43

5	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A JEJICH VYHODNOCENÍ.....	45
5.1	MĚŘENÁ SOUČÁST	45
5.2	PRŮBĚH MĚŘENÍ U PŘÍSTROJE ATOS TRIPLE SCAN 16M.....	46
5.2.1	<i>Kalibrace skeneru</i>	46
5.2.2	<i>Příprava povrchu měřeného objektu</i>	48
5.2.3	<i>Měření objektu</i>	49
5.2.4	<i>Zpracování naměřených dat</i>	50
5.2.5	<i>Naměřená data</i>	52
5.3	PRŮBĚH MĚŘENÍ U PŘÍSTROJE WENZEL LH 65 – X3M PREMIUM.....	55
5.3.1	<i>Kalibrace snímacího systému</i>	55
5.3.2	<i>Vyrovnaní</i>	56
5.3.3	<i>Průběh měření</i>	57
5.3.4	<i>Naměřené hodnoty</i>	57
5.4	STATICKÉ ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT	59
5.5	GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VÝSLEDKŮ	63
6	DISKUZE A ZÁVĚR	66
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	68
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	74
	SEZNAM TABULEK	75
	SEZNAM PŘÍLOH	76

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Název
α	koeficient délkové roztažnosti
ε_{STV}	systematická teplotní chyba
π_1, π_2	Rovina 1 a 2
1D	Lineární zobrazení
2D	Plošné zobrazení
3D	Prostorové zobrazení
BGW	Barevný model
C_2H_{24}	Cyklodekan
$CaCO_3$	Uhličitan vápenatý
CCD	Elektornická součást pro záznam obrazu
CMM	Souřadnicový měřicí stroj
DMD	Druh čipu u projektorů
F_1, F_2	Bod 1 a 2
f_1, f_2	Ohnisková vzdálenost 1 a 2
GOM	Název společnosti
H_2	Kritérium pro určení hrubé chyby
H_n	Kritérium pro určení hrubé chyby
l	Přímka
L	Naměřená hodnota délkové rozměru
LED	Polovodičový světelný zdroj (Light-Emitting Diode)
m	Počet promítaných vzorů
m_d	Hmotnost granitového stolu
MV	Měřicí objem (Measuring volume)
n	Počet měření
p	Pravděpodobnost
P_0, P_1, P_2	Bod 0, 1 a 2
PC	Počítač (Personal Computer)
RGB	Barevný model
$S(x)$	Výběrová směrodatná odchylka
STL	Datový formát souboru (Standart Triangulation Language)
T	Teplota, při které se provádí měření
TiO_2	Oxid titaničitý
T_o	Referenční teplota
U	Rozšířená nejistota
u_a	Standartní nejistota typu A
u_b	Standartní nejistota typu B
u_c	Kombinová standartní nejistota

VDI/VDE	Název německé instituce, která vydává normy
\bar{x}	Výběrový průměr
x_i	Jednotlivé naměřené veličiny x
z_0	Osa 0
z_2	Osa 1

1 Úvod

Ve většině výrobních podniků panuje obrovský konkurenční boj. V dnešní ekonomické situaci převyšuje poptávka nad výrobou. Tato skutečnost tlačí firmy, aby usilovaly o snížení výrobních časů, jelikož by se časem staly méně konkurence schopnými. Firmy mají několik možností, jak snížit výrobní čas. Těmi jsou například zavedení třisměnného provozu, zvětšení výrobního závodu anebo uchýlení se k moderním metodám výroby.

Mezi společnostmi, které se snaží využívat inovativních moderních metod jednoznačně patří Honeywell Aerospace Olomouc, v Hlubočkách - Mariánském Údolí. Je to podnik, který je špičkou ve výrobě součástí motorů letadel. Výrobky jsou využity především v dopravních, nákladních a vojenských letadlech. Ve firmě je využita veliká škála moderních metod, jak přímo ve výrobě, například hydroforming, laserové řezání a vrtání, elektroerozivní obrábění, plazmové postřikování, tak i ke kontrole vyráběných dílů. Mezi využívané moderní měřicí metody ve společnosti patří CMM (coordinate measuring machine – souřadnicové měřicí stroje) a rentgenové měření. Nicméně jeden z nejnovějších měřících přístrojů je 3D skener ATOS Triple Scan 16M od firmy GOM. Přístroj disponuje měřicí technologií modrého světla, které není závislé na okolních světelných podmínkách. Tento typ skeneru se využívá především ke kontrole kvality výrobku, v reverzním inženýrství, rychlé kontrole prototypů a ke kontrole kolizí dílů. Firmy, které tuto technologii využívají, mají sériovou nebo hromadnou výrobu, jako například automotive nebo zmiňovaná společnost Honeywell.

V první kapitole práce se zabývá rozdělením měřících metod, a to především optických a CMM. U optických metod se práce především soustředí na aktivní metody měření, kde do této metody spadá i strukturované světlo. Proto se práce zabývá i jednotlivými druhy kódováním strukturovaného světla. Dále jsou v kapitole rozebrány jednotlivé druhy nepřesností měření u optických skenerů. Na závěr této kapitoly jsou zde popsány jednotlivé systémy u CMM.

Druhá kapitola se zabývá nepřesnostmi měření a chybami. V této kapitole jsou i jednotlivé vzorce pro výpočty chyb a nepřenosností měření.

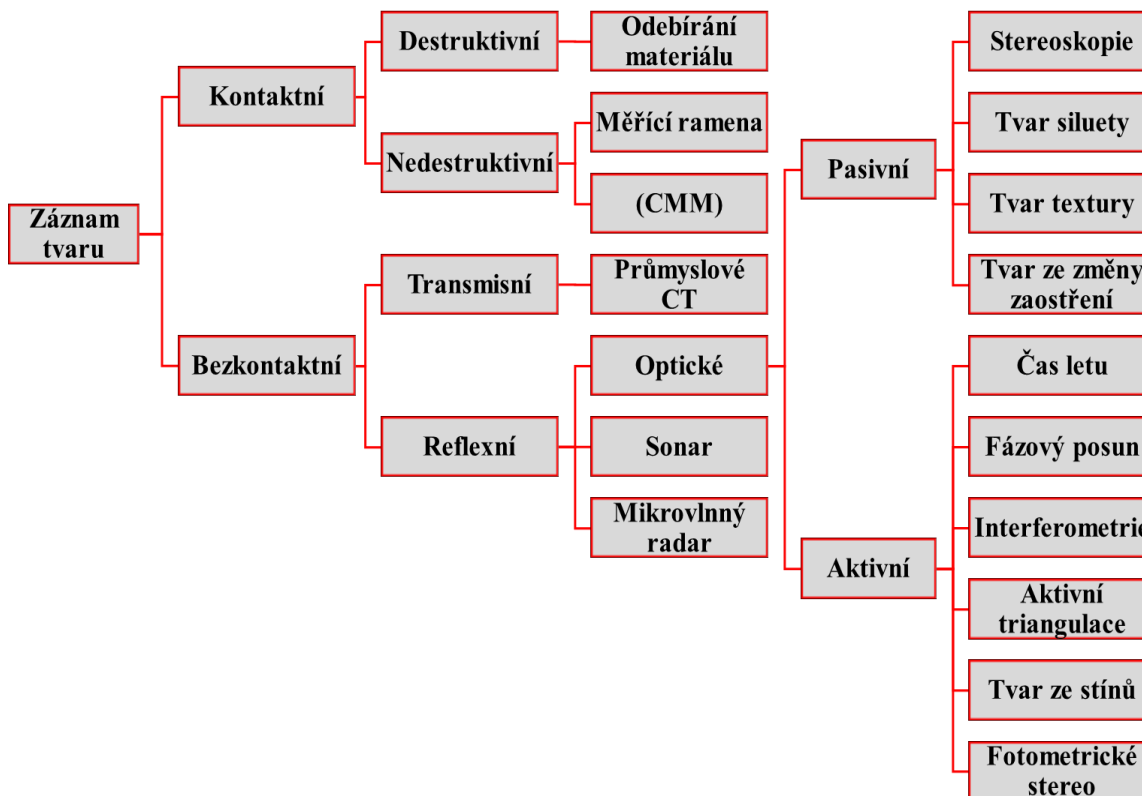
Třetí kapitola se zabývá detailnějším popisem měřících strojů, kde jsou zmíněny hlavní technické části každého stroje a popsány jejich funkce a možnosti měření.

Čtvrtá kapitola se věnuje praktické části práce, kde se zkoumala přesnost daných přístrojů a velikost jejich nepřesností.

V závěru práce jsou následně srovnány metody měření a zhodnoceny výsledky měření.

2 Rozdělení měřících metod

Existuje celá řada možností, jak lze dělit digitální metody pro získání informací o třírozměrném objektu. Jedna z nich je uvedena v knize od autora Thomase Luhmanna, kde autor rozděluje metody podle velikosti objektu a přesnosti získávání dat. Dále je zde rozdělení podle použití vlnové délky senzorů, a to na mikrovlny, světelné nebo ultrazvukové vlny. Autor se v publikaci výhradně zaměřuje na bezkontaktní metody. Nejpoužívanější rozdělení měřících metod je však zobrazeno na obrázku 2.1. Toto rozdělení je uvedeno v knize od Francesca Bellocchio, kde autor rozděluje metody záznamu obrazu na kontaktní a bezkontaktní. Ve strojírenství, kde je kladen důraz na přesnost měření, je nejpoužívanější metoda kontaktního měření za pomoci CMM. Z bezkontaktních metod měření je nejvíce využívána metoda aktivní triangulace, která se postupem času dostává do popředí měřících metod^{2, 23, 27, 34}.



Obrázek 2.1 - Rozdělení metod pro získání informací o trojrozměrném objektu ²

Každá metoda pro získání informací o rozměru má svá pro a proti, nicméně v této kapitole jsou blíže popsány pouze metody optického měření a měření za pomoci CMM.

2.1 Základní rozdělení reflexních optických měřících systémů

Jak je patrné z obrázku 1.1, metody optického měření lze rozdělit do dvou kategorií, a to na pasivní a aktivní. Každá z nich má svá omezení (limity) a vhodnost pro měřenou součást. V praxi můžeme narazit na obě uvedené metody ³⁴.

2.1.1 Pasivní metody

Pasivní snímání je takové, u kterého není zahrnut zdroj osvětlení, což znamená, že se neuvažuje s přesným umístěním světelného zdroje v systému pro snímání (systém paprsky pouze přijímá, ale neprobíhá emitační) ².

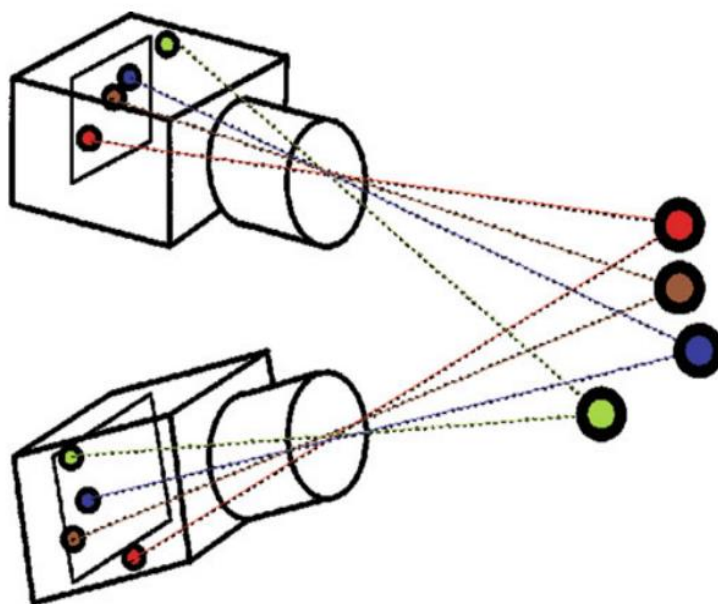
Podstatou je zachycení dvou snímků, a to z různého pohledu nebo změny scény. Využívají se tři základní typy systémů:

- s více kamer, které mají danou orientaci nebo disponují samokalibrací,
- s jednou kamerou v různých polohách,
- kamera, která zachycuje pohybující se objekt ¹⁹.

Základní rozdělení pasivních metod dle obrázku 2.1 je:

- stereovidění,
- tvar siluety,
- tvar z textury,
- tvar ze změny zaostření.

Ze všech těchto metod má však největší uplatnění právě stereoskopický systém, který je založen na principu zaznamenání obrazu párem kamer, viz obrázek 2.2. Každá z kamer zachytí obraz z jiného úhlu. Geometrie předmětu se získá z odlišných pozic zachycených bodů kamerami a jejich orientací. Výhodami této metody jsou nízká pořizovací cena, schopnost zachycení geometrie a textury a mobilita, bohužel tato metoda nemá až tak velké rozlišovací schopnosti, tudíž přesnost měření není vysoká ².



Obrázek 2.2 - Znárodnění stereoskopických systémů ²

2.1.2 Aktivní metody

Aktivní metody oproti pasivním emitují na měřený povrch určitý druh elektromagnetického vlnění, jako například, infračervenou nebo viditelnou mřížku a tento obraz je na měřeném povrchu zachycen příslušným snímačem. Zdrojem světla jsou lasery, diody a projektory. Zde nalézají uplatnění optické metody, které se využívají například v průmyslovém odvětví. Optické skenery, které zde patří, jsou založeny na třech různých měřicích principech a těmi jsou čas letu, fázový posun a aktivní triangulace^{2,19}.

Aktivní triangulace je nejvíce využívána u běžných měřicích přístrojů v průmyslovém odvětví. Dělí se podle druhu osvětlovacího paprsku na tyto typy:

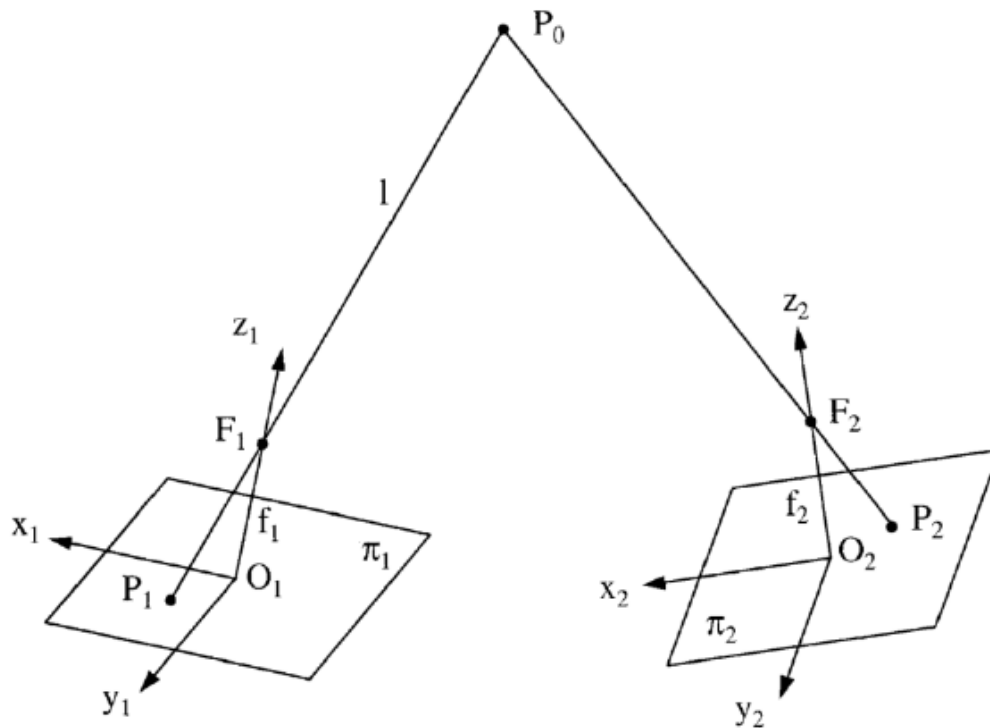
- Světelný paprsek (1D triangulace),
- Světelný pruh (2D triangulace),
- Strukturovaný světelný svazek (3D triangulace)¹⁹.

Mezi výhody aktivní triangulace patří přesnost a spolehlivost. Tato metoda je však cenově nákladnější ve srovnání s pasivní metodou.

2.2 Strukturované světlo

V průběhu posledních let se využití metody projekce strukturovaného světla stalo jednou z nejpoužívanějších, a to díky rychlosti skenování. Našlo například uplatnění při skenování částí člověka, v herním a uměleckém odvětví a strojním průmyslu. V průmyslu slouží k měření součástí, a dále se uplatňuje v reverzním inženýrství. Hlavní předností této bezkontaktní metody je rychlost nabírání (naskenování) dat měřeného objektu a získání celoplošné trojrozměrné rekonstrukce objektu, a to ve velkém rozlišení. Klasický měřicí přístroj využívající strukturované světlo se skládá z projekční jednotky (projektoru), jednotky pro získání záznamu obrazu (CCD kamery) a procesní a analyzační jednotky (PC)¹¹.

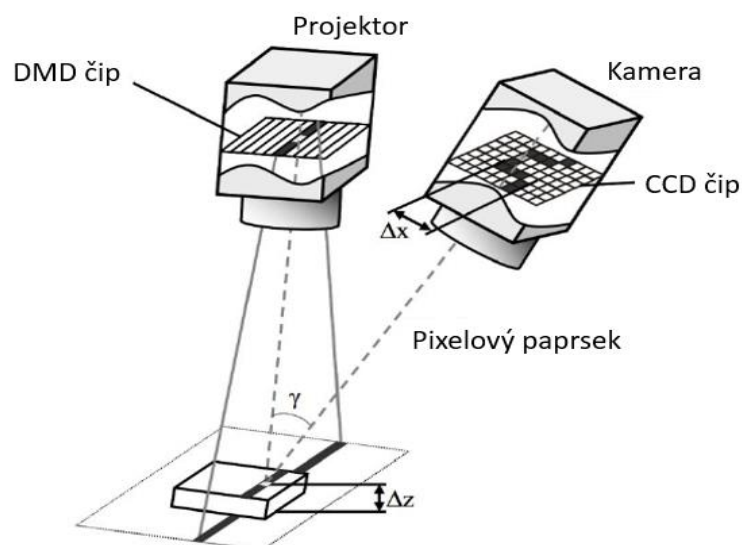
Metoda strukturovaného světla je založena na principu triangulace, která vychází ze známé vzdálenosti mezi dvěma body (kamerami) a úhlu od přímky mezi nimi. Princip triangulace je zobrazen na obrázku 2.3. Zde jsou znázorněny roviny π_1 a π_2 , které symbolizují kamerové roviny. Pozice kamer jsou známé. Na kamerových rovinách jsou body P_1 a P_2 , které znázorňují promítnutí bodu P_0 . Na osách z_1 a z_2 jsou body F_1 a F_2 . Tyto body jsou v ohniskové vzdálenosti (f_1, f_2) kamer. Bod P_1 je projektovaný bod P_0 do roviny π_1 podél přímky l . Bod P_0 může být libovolně daleko na přímce l a v rovině π_2 není pozice bodu P_2 zřejmá. Dalo by se říci, že P_2 leží v rovině, která je definována třemi body F_1, F_2 a P_1 . V případě pruhové projekce je zapotřebí přesnou pozici určit za pomoci promítnutí daného vlnění světla a pomoci kódování určit daný bod²¹.



Obrázek 2.3 - Obecný vztah dvou optických senzorů ¹

Celý proces pro sběr dat z měřeného objektu pomocí pruhové projekce se uskutečňuje v několika krocích, viz obrázek 2.4 ¹¹.

- Promítnutí vzoru strukturovaného světla na měřený objekt.
- Zachycení kamerami zdeformovaný vzoru.
- Počítačová kalkulace za pomoci algoritmu k vyhodnocení zachycených informací a vytvoření takzvaného mračna bodů.
- Úprava mračna bodů a zpracování naměřených dat.



Obrázek 2.4 - Proces získání informace pomocí strukturovaného ¹⁵

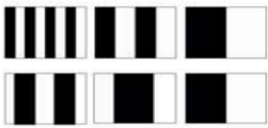
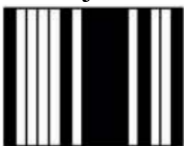
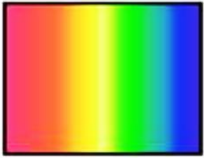

Za pomoci strukturovaného světla, lze zaznamenávat i pohybující se objekty. Bohužel to vede k snížení měřicí kvality. Proto je potřeba složitějších promítacích vzorů u pohybujících se objektů, aby se dosáhlo uspokojujících výsledků. Při skenování statických součástí je v některých případech zapotřebí zajistit stabilizaci objektu, a to za pomoci upínacího zařízení, aby došlo k dostačující fixaci. To umožňují řady upínačů, kleštin nebo svěráků¹⁸.

Hlavní nevýhodou této metody je skenování lesklých nebo transparentních povrchů. U těchto povrchů dochází k nesprávnému zachycení strukturovaného vzoru, jelikož paprsky se na těchto površích mohou odrazit pod chybným úhlem nebo projít materiálem. U měřených materiálů by měla být zajištěna dostatečná difúzní odrazivost, ta je zajišťována matnými prášky.

2.3 Druhy vzorů strukturovaného světla

Z důvodů lepší přesnosti a rychlosti se vyvinuly různé vzory promítaných obrazců pro měření za pomoci strukturovaného světla, které napomáhají lepší analýze objektu. Každý z níže uvedených vzorů má své klady, zápory a vhodnosti využití. Vzor je složen ze skupiny pixelů, jež mají odlišné kódovací znaky, které jsou zaznamenávány díky rozdílné úrovni šedi, barevných nebo geometrických znaků. Přesnost měření je právě určena množstvím těchto promítaných vzorů na plochu a jejich složitostí. Což znamená, že pokud bude vyšší počet promítaných vzorů na objekt, dalo by se říci, že měření bude přesnější. Jednotlivé druhy promítaných vzorů jsou znázorněny v tabulce 1³¹.

Tabulka 1 - Rozdělení vzorů pro strukturované světlo³¹

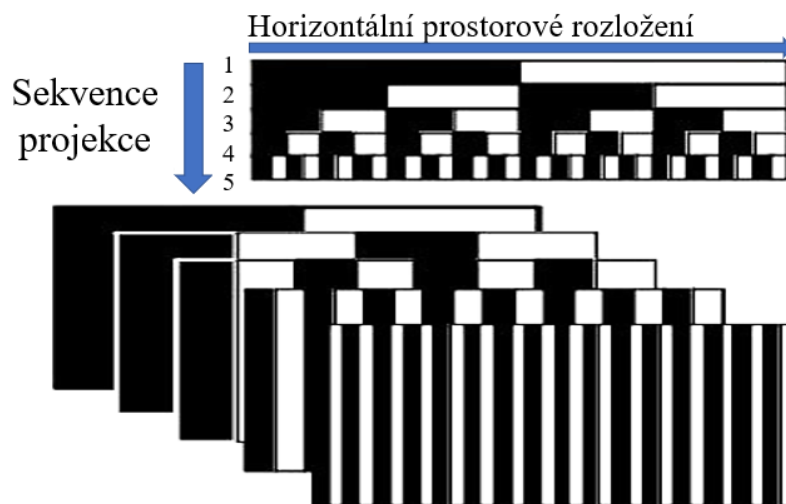
Temporální kodifikace	Prostorová kodifikace	Přímá kodifikace
Binární kódy 	Neformální kódování	Vzory s úrovní šedé
N-ární kódy	De Bruij sekvence 	Barevné vzory 
Kombinace šedého kódu a fázového posuvu	M-pole (maticová pole) 	
Hybridní metody		

2.3.1 Temporální kodifikace

Pomocí sekvenční projekce vzorů dochází v temporální kodifikaci k posloupnému přiřazení hodnot jednotlivým kódovaným bodům. Vzorem u této kodifikace jsou proužky, které mění svoji šířku v závislosti na čase. Tato kodifikace má výhody, kterými jsou vysoká přesnost, rozlišení (dosahuje přesnosti v řádu μm) a vhodnost při skenování barevných objektů. Avšak nevýhodami jsou nemožnost skenování pohybujících se objektů a při skenování s důrazem na přesnější měření se výrazně prodlužuje čas měření, protože se promítá více vzorů na objekt ³¹.

- **Vzory s binárním kódem**

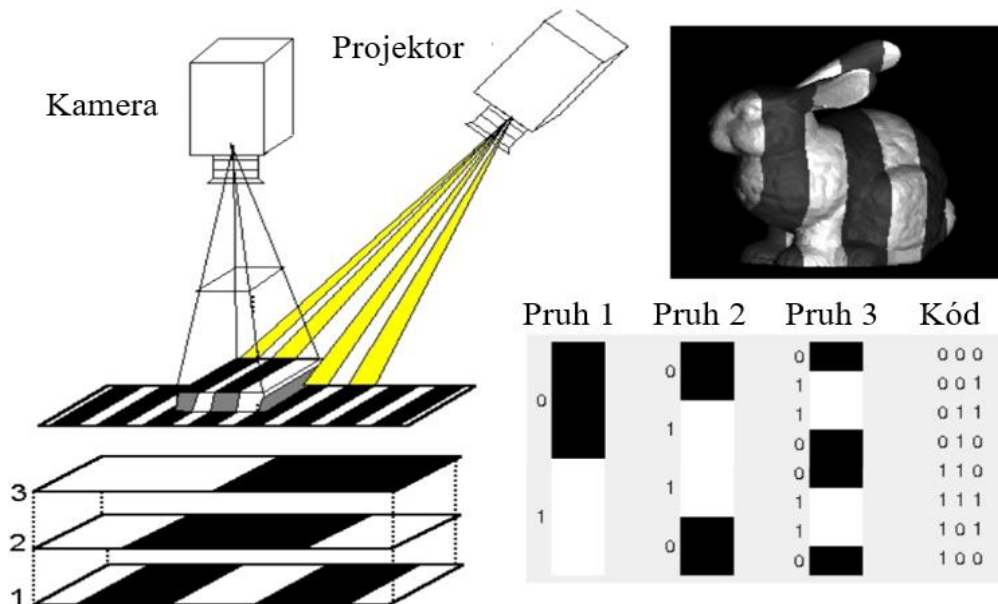
Toto kódování vychází ze sekvenčních vzorů, kterými jsou černobílé pruhy. Tyto vzory jsou promítány pouze v jednom směru (horizontálně nebo vertikálně) ²⁹. J. Pages a J. Salvi vymysleli sekvenční projekci vzorů m , při zakódování 2^m pruhů. K zakódování jednotlivých bodů využili binární kódování, kde k identifikaci bodů se dospěje pomocí jeho intenzity. Ke každému zaznamenanému vzoru jsou přiřazena kódová slova za pomoci jedniček a nul, které jsou získány ze senzorů na kameře. Představme si pěti bitovou projekci, ze které vznikne 32 oblastí (viz obrázek 2.5) a každá tato oblast je kódovaná jiným popisovým vzorem. Tyto vzory udávají rozlišovací přesnost projektoru v pixelech. Avšak neplatí, že udává měřicí přesnost ^{10, 29}.



Obrázek 2.5 - 5-bitové kódování ²⁹

Měřicí přesnost nám udávají zaznamenávací kamery, na kterých je uvedena rozlišovací přesnost v pixelech. Z důvodu menší rozlišovací schopnosti kamer se maximální možný projektovaný vzor neuplatňuje. U tohoto promítaného vzoru dochází ke vzniku šedých pásem, která jsou obtížně rozpoznatelná a hůře definují kódovaný bod, proto Inokuchi toto kódování v roce 1984 vylepšil na šedé kódování, které se využívá až doposud. Provedla se řada pokusů o nalezení lepšího řešení, ale všechny pokusy shledali šedý kód za robustní

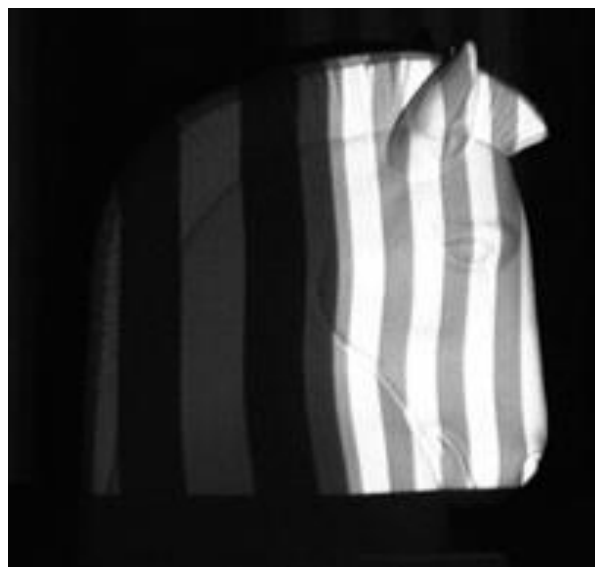
a přesný pro statické zaznamenávání obrazu. V roce 2001 Rocchini představil drobnou změnu v přenosu černobílých pruhů. Vymyslel projekci modrých a červených pruhů se zelenou hranicí mezi jednotlivými pruhu. Tato metoda má, ale jednu nevýhodu, kterou je velké množství nasbíraných dat při měření. V dnešní době to však již není takový problém, vzhledem k vysoké úrovni výpočetních systémů. Ukázka temporálního kódování je na obrázku 2.6^{30, 32}.



Obrázek 2.6 - Ukázka binárního kódování³⁰

- Vzory s n-árním kódem

Tento typ kódování vznikl z důvodu snížení promítacích vzorů za využití binárního kódování. RGB modelem došlo k rozšíření šedého kódu o abecedu n symbolů. Každý znak z abecedy je kódovaný pomocí RGB metody. Ukázka využití vzorů s n-árním kódováním je na obrázku 2.7^{5, 10, 17}.

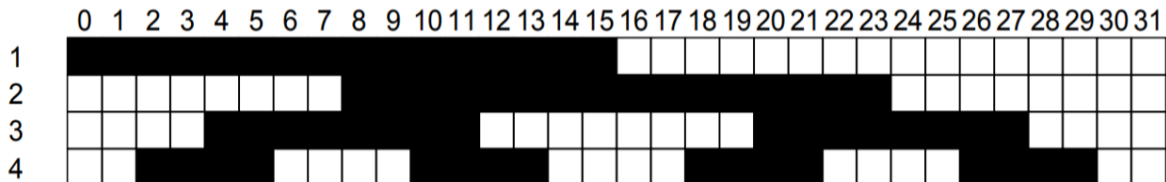


Obrázek 2.7 - Ukázka n-árního kódování¹⁰

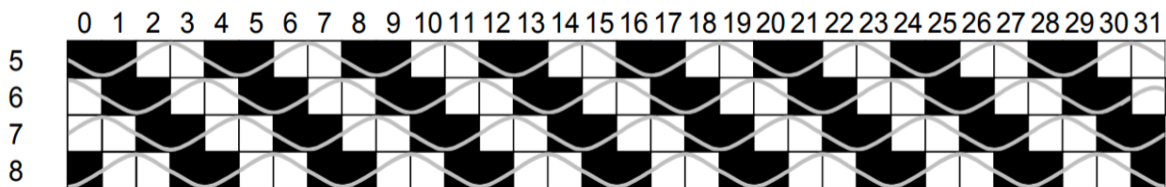
- **Kombinace šedého kódu a fázového posunu**

Další z temporální kodifikace je kombinace šedého a fázového posunu. Fázový posun se využívá kvůli lepší rozlišovací přesnosti kamer, kde projekce sinusových vzorů pomáhají zvýšit rozlišovací přesnost v řádu subpixelů. Danou kombinací se zvýší robustnost kodifikace a rozlišení, a také nedochází ke dvojznačnosti, ale tímto se zvýší počet promítaných vzorů, viz obrázek 2.8 ¹³.

Kódování s využití šedého vzoru a fázového posunu



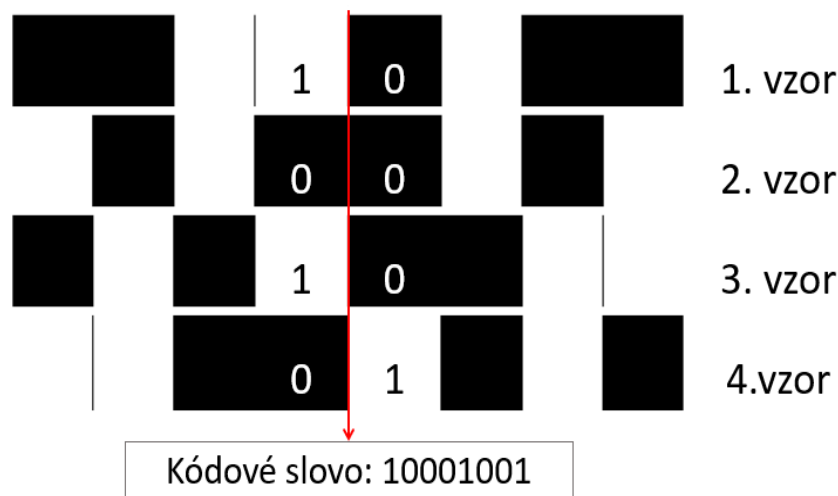
Fázový posun



Obrázek 2.8 - Kombinace šedého kódu a fázového posuvu ¹³

- **Hybridní metody**

U této metody je dosaženo nejmenšího počtu promítaných vzorů u metod temporální kodifikace. O. Hall-Holt a S. Rusinkiewicz využili speciální sekvenční projekce, která obsahovala 4 vzory. Měření u této metody probíhalo pouze v místě hranice dvou pruhů, u kterých byl největší gradient intenzity světla. V hraničním místě byli zaznamenány vzory a k nim připsán 8-bitový kód. Tento princip je znázorněn na obrázku 2.9 ¹⁴.



Obrázek 2.9 - Ukázka hybridního kódování ¹⁴

2.3.2 Prostorová kodifikace

Touha po měření dynamické scény a snížení počtu měřících snímků byla natolik velká, že to vedlo k nalezení odlišného typu kódování, kterým je prostorová kodifikace. Dynamická scéna může být změřena jen za splnění jedné podmínky, a to kódování pozice bodů za pomoci jednoho snímku, aby mohlo dojít k identifikaci bodů (dosáhnutí potřebné rozlišovací schopnosti) musí se zvýšit počet promítaných vzorů do jednoho snímku. Běžným způsobem je právě využití sousedního prostoru jednotlivých pixelů, z čehož vychází prostorová kodifikace. Kódování pixelů vychází z informací o barvě a intenzitě pixelů v jeho okolí ¹⁰.

Výhody:

- Měření pohybující se scény.
- Možnost snížení kodifikace do unikátního vzoru.

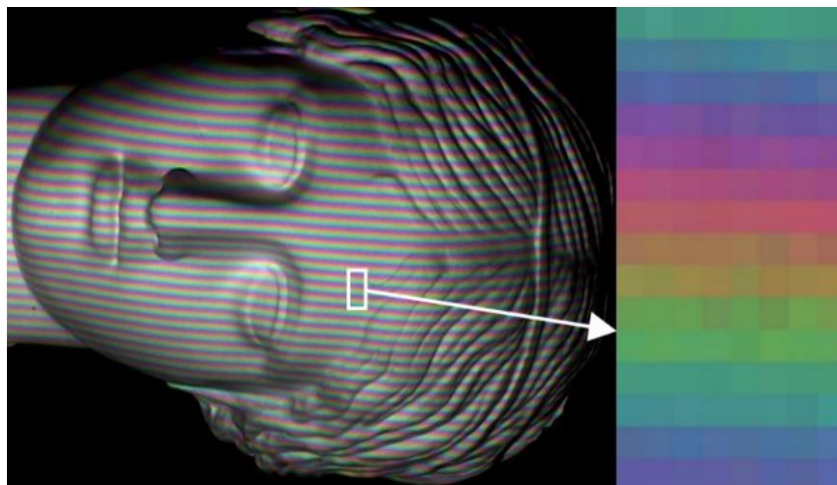
Nevýhody:

- U měření nespojitého povrchu nastává problém s nespojitostí promítaného vzoru, což způsobí chybné dekodování.
- Čím vyšší je počet použitých barev, tím je obtížnější správně identifikovat neutrální plochy.
- Nedá se dosáhnout maximální rozlišení, tak jako u temporální kodifikace ¹⁰.

- **Neformální kódování**

Základem neformálního kódování je využití speciálních vzorů, jež nevyužívají dřívější matematické základy. Kódovaná slova jsou zde členěna do drobných segmentů. Neformálním kódováním se zabývalo několik autorů, a každý z nich přišel se svým vlastním kódovacím segmentem. M. Maruyama a S. Abe využili segmentů, které vycházely z přerušovaných čar. Jelikož tyto čáry se postupně se vzdalujícím se objektem zvětšují měla, tato metoda využití pouze u měření na krátké vzdálenosti ²⁴. Další publikace zabývající se vzorem segmentů je An improved structured light, kde autoři využívají kódování BGW, které vychází z promítání černých (B), šedých (G) a bílých (W) horizontálních pruhů. Tyto pruhy mají přesně stanovenou posloupnost. U těchto segmentů nastává problém při měření nespojitého povrchu, protože dojde k narušení posloupnosti kódovacích segmentů ⁸. Nejpropracovanější metodiku měli však K. L. Boyer a A. C. Kak, kteří využili vertikálních barevných pruhů (červená, modrá a zelená). Jednotlivé podoblasti obsahují přesně stanovený počet pruhů. Autoři však zaznamenali nepřesnosti měření u nespojitých ploch, a proto separátně vyvinuli k dekodování těchto vzorů software, který je schopný při absenci segmentů správně dekodovat promítaný vzor. Bohužel i tato metoda s využitím software má

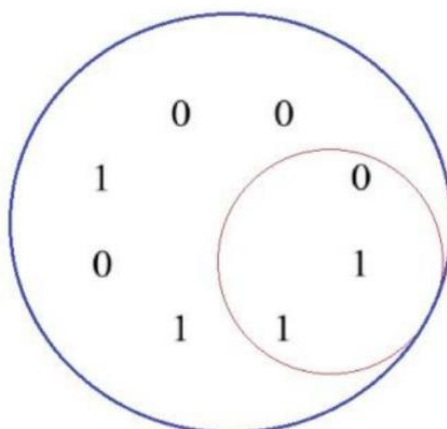
nedostatky. Ty nastávají při skenování poměrně hodně zabarvených povrchů, kde dojde k nesprávné identifikaci barevného segmentu ³. Tento druh segmentů je znázorněn na obrázku 2.10 ²³.



Obrázek 2.10 - Nefornální kódování ²³

- **De Bruijnovy vzory**

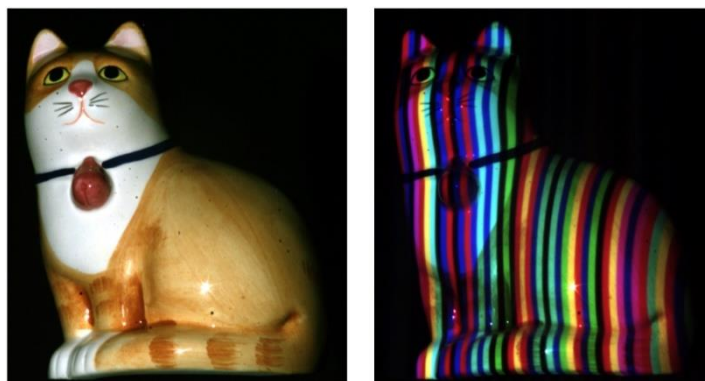
Další technikou nefornální kodifikace je promítání De Bruijnových vzorů. Toto promítání vychází z poznatků De Bruijnovi posloupnosti, která předpokládá, že kódovaná slova mají takovou posloupnost, při které nedojde k opakování stejného kódovaného slova ve vzoru. Pro lepší představu je tato posloupnost znázorněna na obrázku 2.11, kde jsou dva kruhy. Ve větším kruhu jsou vypsány hodnoty. Menší kruh se odvaluje po vnitřní straně kruhu a vždy obsahuje jen tři cifry. Jelikož se jedná o De Bruijnovu posloupnost, žádné kódované slovo zde není obsaženo dvakrát. Kódovaná slova jsou pouze (101, 010, 100, 000, 001, 011, 111, 110) ³¹.



Obrázek 2.11- De Bruijnova posloupnost ¹⁰

Hledáním vzorů pro tento druh kodifikace se zabývali Li Zhang, B. Curless a S.M. Seitz, kde se snažili dosáhnout toho, aby v měřicí scéně byl každý z pruhů specifický. Proto přišli s návrhem barevných pruhů, které byly složeny z červené, modré a zelené barvy. Touto

metodou se jim podařilo poskládat 125 různobarevných pruhů, viz obrázek 2.12. Avšak také narazili na problém chybějících pruhů na nesouvislém povrchu, a proto vyvinuli pokročilejší dynamické programování, které využívalo i časovou kodifikaci s několika posuvy promítaných vzorů ²².



Obrázek 2.12 - Promítání De Bruijnových pruhů ²²

- **M-Pole**

Další metoda prostorové kodifikace využívá matematických vlastností matic, a z toho plyne její název M-pole. Základem je vytvoření pseudonáhodných vzorů. Podle promítaného vzoru lze tuto kategorii rozdělit do dvou skupin. První skupina využívá projekce barevných teček. Každá tečka obsahuje jeden ze symbolů kódované abecedy, přičemž měření se provádí složením jednotlivých podoken promítaných vzorů. Toto měření se využívá jak u barevných, tak i černobílých scén. Bohužel se touto metodou dá zaznamenávat pouze statická scéna. Druhá skupina je založena na promítání geometrických vzorů na měřené těleso. Kde každý geometrický tvar reprezentuje daný kódový znak. Těmito znaky se zabývali autoři v publikaci ¹².

2.3.3 Přímá kodifikace

Tento druh kodifikace využívá promítání velkého spektra barev a intenzit. Díky tomu dojde ke kódování jednotlivých pixelů. Ke snazší identifikaci jednotlivých bodů, je zde využito vlnové délky a projekčních úhlů. Jelikož je promítaný vzor dostatečně složitý, uplatňuje se zde měření hodnot pouze z jednoho snímku.

Výhody:

- Malý počet projekčních vzorů.
- Teoreticky zde může dojít k vysoké rozlišovací přesnosti.

Nevýhody:

- Nutnost využití nestandardních projekčních jednotek a kamer.
- Přesnost měření v řádech milimetrů ³¹.

2.4 Přesnost měření optických měřících systémů

U měřících přístrojů všech typů jsou největší nároky na přesnost měření. Čím větší jsou, tím rostou požadavky na podmínky měření (teplota, světlo, vlhkost), to platí i u optických měřících systémů, kde je zapotřebí rozdílný typ snímané scény.

U každého takového typu stroje udává dodavatel list s přípustnými nepřesnostmi měření. Pokud u měření dojde k překročení těchto nepřesností, mělo by dojít k ověření přístroje, anebo ke kalibraci. Výrobce GOM uvádí ve svém návodu, že může dojít k ovlivnění měření několika faktory, které jsou rozděleny na vnější a vnitřní ⁴⁴.

Vnitřní faktory:

- Druh osvětlení a jeho intenzita
- Měřicí objem
- Doba zaznamenávání snímku (scény)

Vnější faktory:

- Příprava měřeného objektu
- Teplota a její gradient
- Vlhkost vzduchu
- Vibrace
- Druh okolního osvětlení
- Prach
- Elektromagnetické záření

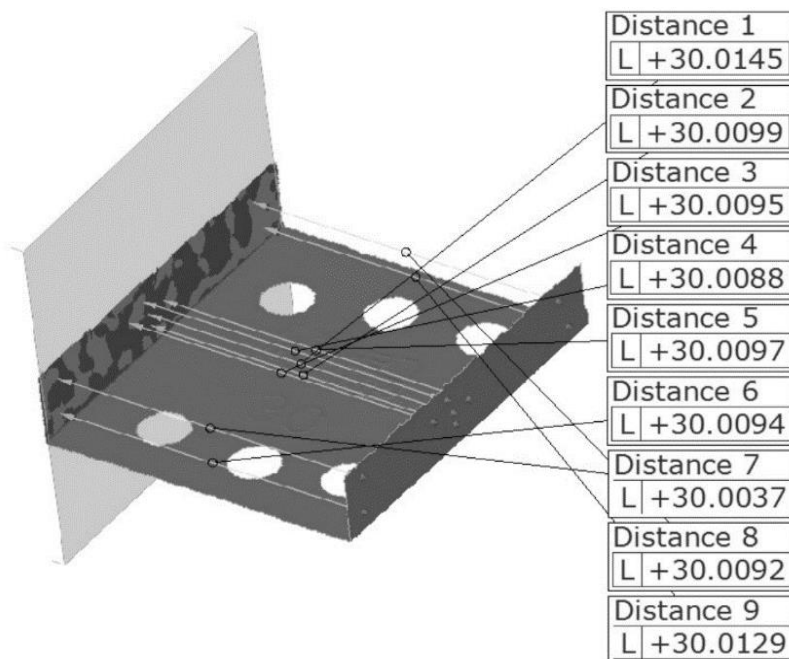
Vzniklé odchylky při měření jsou zapříčiněny celým procesem měření. U každého takového měřícího zařízení je jiný typ senzoru a podmínky při měření jsou rozdílné. Z tohoto důvodu nelze jednoznačně stanovit nejistotu měření pro optické skenery. Každý výrobce těchto zařízení má vlastní předpisy, jak ověřit, zda daný přístroj měří v rámci udávaných tolerancí. Zatím neexistuje mnoho druhů norem, které by popisovaly, jak má probíhat ověření skenerů. Existují pouze německé směrnice VDI/VDE 2634, které ještě nejsou závazné pro dodavatele optických skenerů. Tyto směrnice uvádí měření objektů, které jsou geometricky velmi jednoduché, ale tvarově přesné. Tato směrnice uvažuje porovnání výsledků z jednoho záběru scény a až v poslední části přihlíží na skládání snímků.

Tato směrnice VDI/VDE 2634 se dělí do následujících tří částí:

1. VDI/VDE 2634 část 1:2002-05 – zobrazovací systémy s měřením diskrétních bodů
2. VDI/VDE 2634 část 2:2012-08 – optické systémy založené na plošném měření
3. VDI/VDE 2634 část 3:2008-12 – systémy založené na plošném měření s více snímky

2.4.1 Experimentální zjišťování nejistot optických skenerů

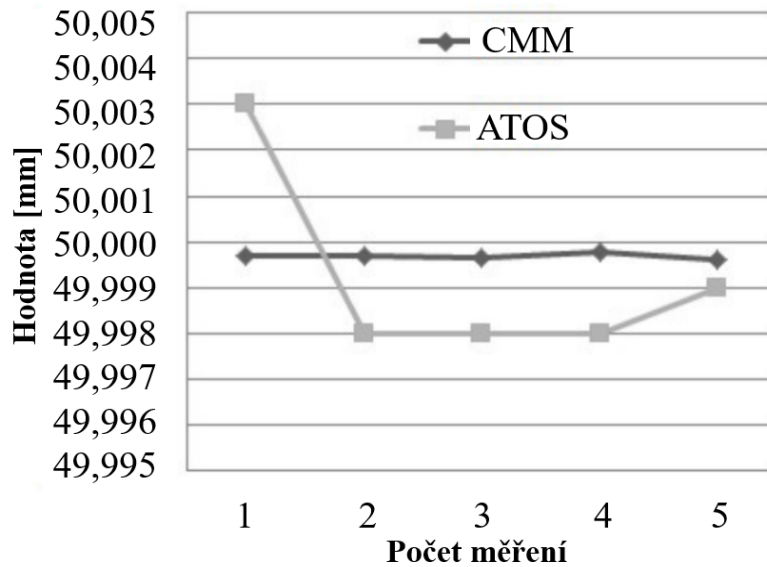
Pro zjišťování nejistot u optických skenerech byla provedena řada experimentů. Brajlih a kolektiv se zabývali měřením obrobených dílů pomocí skeneru ATOS II. Pro porovnání a zjištění nejistot měření si stanovili dva druhy měřených součástí (kouli a koncovou měрку). Pro zmenšení chyby měření si určili pouze dvě scény (snímky). Měřili nejmenším možným měřicím objemem, který u daného přístroje je (135×108×95 mm). Nejprve měřili tři koncové měřky (nominálních hodnot 20, 30 a 70 mm), u každé z nich provedli deset měření, a u každého měření hodnotili 9 různých vzdáleností od nominálních rovin. Pro lepší porozumění je metodika zobrazena na obr. 2.13⁴.



Obrázek 2.13 - Metodika vyhodnocení koncové měřky 30 mm⁴

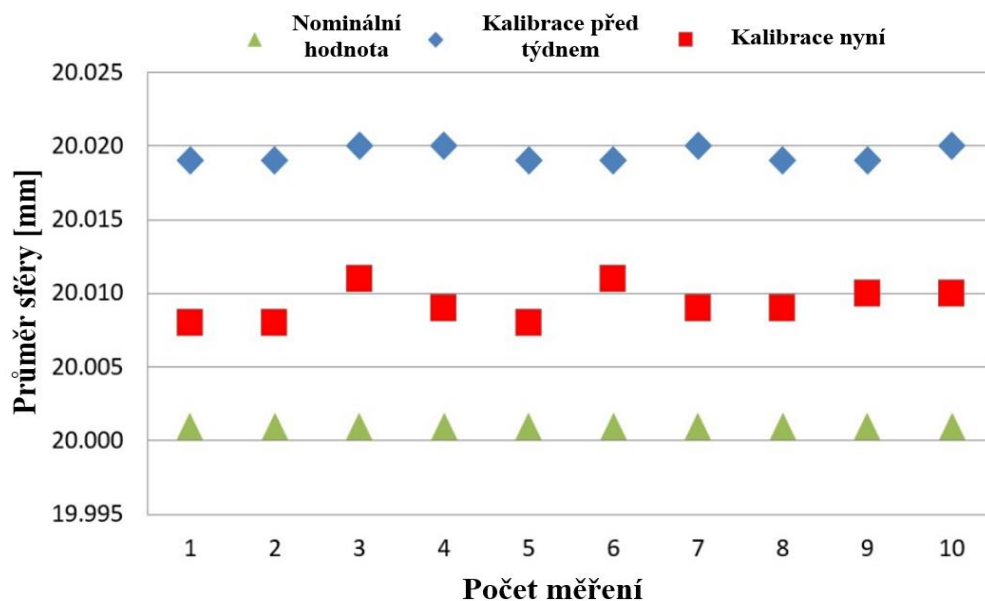
U každého měření zprůměrovali 9 vzdáleností a dostali průměrnou vzdálenost dvou rovin. Výběrové směrodatné odchylky měření vyšly $s_{20} = 7,1 \mu\text{m}$, $s_{30} = 5,9 \mu\text{m}$ a $s_{70} = 11,2 \mu\text{m}$. Poté vypočetli rozšířené nejistoty měření, které vyšly $u_{20} = 9,0 \mu\text{m}$, $u_{30} = 8,1 \mu\text{m}$ a $u_{70} = 11,2 \mu\text{m}$. Z naměřených výsledků nenašli žádnou systematickou závislost, proto stanovili standartní nejistotu v rozmezí $u = 12 \mu\text{m}$ v celém měřeném rozsahu. Výsledky prokázali, že rozšířená nejistota měření s pravděpodobností 95 % je $25 \mu\text{m}$. Jelikož koncové měřky jsou opracovávány do lesklých povrchů, bylo zapotřebí nanést na součást titanový prášek. Autoři zjistili, že pokud je nános titanového prášku řádně proveden, jeho tloušťka je v řádu 0,001 mm. Jelikož zjistili, že měření má vyšší nepřesnost než 0,001 mm, provedli sérii měření a zjistili, že jejich naměřené hodnoty jsou stále v podobném rozptylu. Z tohoto důvodu došli k závěru, že nános titanového prášku nemá převládající vliv na nepřesnost měření. Následně provedli měření sféry. Toto měření

provedli z důvodu větší komplexnosti geometrie měřeného objektu a větší vhodnosti měření optického skeneru. U tohoto měření zachytili pouze jednu scénu. Tímto eliminovali chyby z důvodu skládání scén. Jelikož sféra měla lesklý povrch, provedli nános matného prášku, a poté sféru 5krát změřili. Výsledky měření se více přiblížili výsledkům z CMM. Graf výsledných naměřených hodnot je na obrázku 2.14. Z grafu je patrné, že výsledná nejistota měření je menší, než tomu bylo u kovových měrek. Její hodnota je $5 \mu\text{m}$.



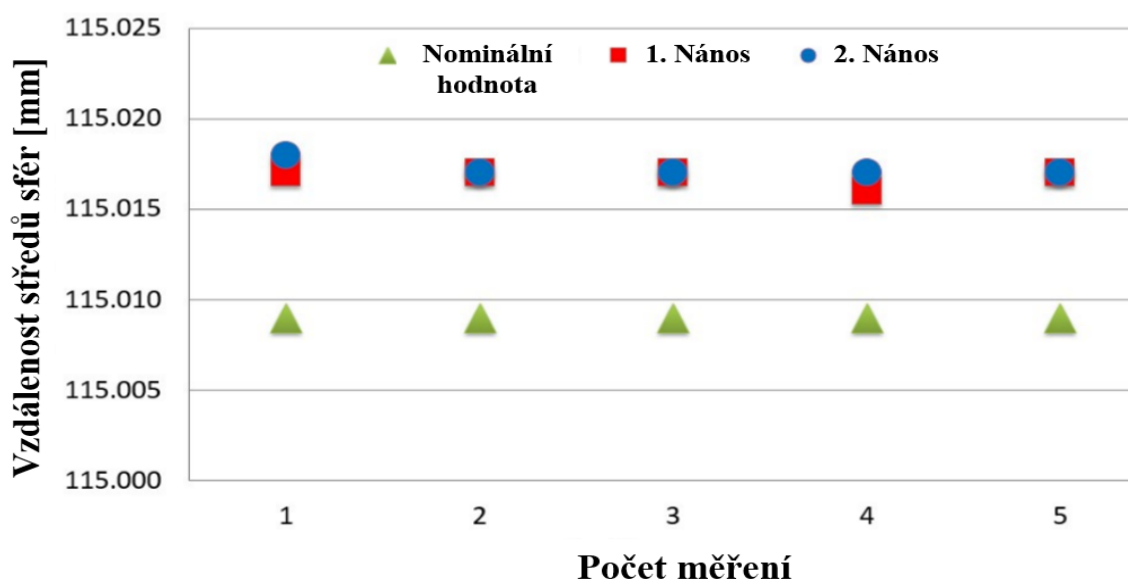
Obrázek 2.14 - Graf výsledných hodnot měření sféry ⁴

Autor článku Radomír Medrický vytvořil ověřovací přípravek pro optické skenery. Ten je podle interních směrnic společnosti GOM, které korespondují se směrnicemi VDI/VDE 2634. Vytvořil přípravek, který obsahoval páry sfér průměrů 8, 20 a 40 mm. Po vyrobení přípravku ho nechal přeměřit na CMM a stanovil nominální rozměry daného přípravku s nepřesnostmi. Poté pokročil k testování. Nejprve definoval, jak prováděl měření. Měřil v programu GOM Inspect Professional Software V8 s měřícím objemem 250, kde sféry definoval podle metody „Gauss Best Fit“ a vzdálenost mezi nimi byla měřena podle funkce „2-point distance“. Soustředil se na faktory, které ovlivňují výsledky měření, především na dobu od poslední kalibrace přístroje a antireflexní prášky. Nejprve provedl experiment zaměřený na kalibraci přístroje, kde testoval přístroj, který měl týden překročenou dobu kalibrace. U něho provedl sérii pěti měření, a poté přístroj zkalibroval a znovu provedl měření. Výsledky měření jasně ukazují, že nekalibrovaný přístroj má dvakrát větší chybu měření než přístroj, který je právě zkalibrovan. Graf výsledků měření je znázorněn na obrázku 2.15 ²⁵.



Obrázek 2.15 - Výsledek měření (ne)kalibrovaného přístroje ²⁵

Dále testoval vliv nanášení a tloušťku matného povlaku. Jelikož se antireflexní nástřík nanáší ručně je zřejmé, že výsledná vrstva nebude rovnoměrně rozprostřena po celém povrchu. Proto autor měřil objekt dvakrát, kde u prvního měření použil menší vrstvu povlaku, a pro druhé použil takovou vrstvu povlaku, aby došlo k rovnoměrnějšímu nánosu na celou měřenou součást. U měření nejprve vyhodnocoval velikost pravé sféry (20 mm), kde zjistili, že odchylka mezi prvním a druhým nástříkem je 0,003 mm. Poté vyhodnocovali vzdálenost mezi sférami. Došli k závěru, že rozdíl mezi prvním a druhým nástříkem je zanedbatelný. Graf výsledků měření je na obrázku 2.16 ²⁵.



Obrázek 2.16 - Výsledek vlivu nánosu ²⁵

Autor dále uvádí, že nedostatečný nános matného prášku by mohl způsobit nesprávné naskenování ploch a vytvoření slepých míst, které by vedlo k degradaci měřeného předmětu. U polygonizace mračna bodů by mohlo dojít k chybnému vytvoření plochy. Nicméně velký

nános matnicího prášku by mohl způsobit zvětšení měřících rozměrů. Proto je zapotřebí zkušeného operátora, který nanese správnou vrstvu na měřenou součást ²⁵.

Cíle autora bylo vytvořit přípravek, kterým by zjistili, zda přístroj měří správně, proto jej poslal do metrologické laboratoře firmy GOM a porovnal výsledky měření. Zjistil, že jejich výsledky jsou srovnatelné pro objemy 250 a 700, ale u objemu 55 nebyla shoda až tak věrohodná. Srovnání lze vidět v tabulce 2 ²⁵.

Tabulka 2 Výsledků měření od autorů ²⁵

Parametr		Výsledky studie (mm)	Výsledky laboratoře (mm)
MV 55	Odchylka tvaru	0,002	0,001
	Odchylky v měření velikosti sféry	0,023	0,003
	Odchylka v měření vzdáleností středů sfér	-0,005	-0,002
	Odchylka v měření délky	0,018	0,003
MV 250	Odchylka tvaru	0,003	0,004
	Odchylky v měření velikosti sféry	-0,018	-0,002
	Odchylka v měření vzdáleností středů sfér	0,012	-0,017
	Odchylka v měření délky	-0,018	-0,035
MV 700	Odchylka tvaru	0,009	0,024
	Odchylky v měření velikosti sféry	-0,087	-0,103
	Odchylka v měření vzdáleností středů sfér	0,012	-0,044
	Odchylka v měření délky	-0,08	-0,187

Další práce, jež se zabývá nejistotou měření, je například bakalářská práce Filipa Dokoupila, která je zaměřena na stanovení odchylky při aplikaci matnicích prášku. Autor zde stanovil tloušťku křídového prášku na $0,029 \pm 0,006$ mm a titanového prášku $0,006 \pm 0,003$ mm ⁷.

2.5 Matnicí prášky optických měřících přístrojů

Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, matnicí prášky jsou jedním z faktorů, které do určité míry ovlivňují výsledky měření. Aplikují se u součástí, které mají reflexní nebo transparentní povrch. U těchto povrchů je to žádoucí, jelikož by měření nemohlo proběhnout. Vrstva nanášeného prášku by měla být v určitém rozmezí, které ovšem není nijak definováno. Vrstva by měla být rovnoměrně nanášena na celý povrch měřeného objektu. V praxi se využívají tři druhy matnicích prášku (cyklododekanový, křídový a titanový).

- **Cyklododekanový prášek**

Cyklododekan ($C_{20}H_{40}$) je hořlavá látka, která samovolně sublimuje. Odpařování daného prášku trvá řádově v několika hodinách nebo dnech. Rychlost sublimace je ovlivněna druhem základního materiálu, teplotou okolí nebo tloušťkou nástřiku. U objektu, který je tvořen více druhy materiálů, dochází k nerovnoměrné sublimaci, což způsobuje nerovnoměrnost měření. Doporučená vzdálenost od plochy nánosu je 3 až 5 cm ⁴⁴.

- **Křídový prášek**

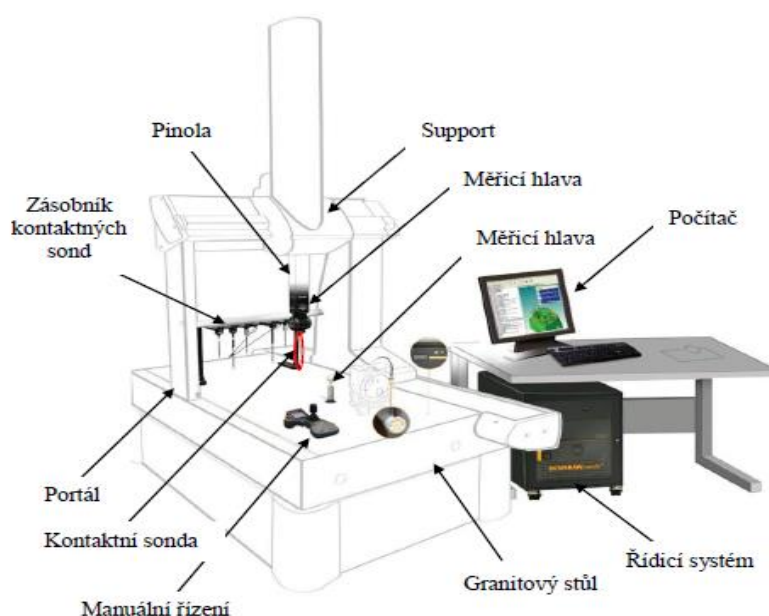
Patří mezi cenově nejdostupnější druhy prášků. Je tvořen především uhličitanem vápenatým ($CaCO_3$). Ten se vyrábí chemickou cestou nebo pomocí těžby. Doporučená vzdálenost od plochy nánosu je 10 až 15 cm ⁴⁰.

- **Titanový prášek**

Jde o prášek, který je tvořen oxidem titaničitým (TiO_2). Tento druh prášku se využívá u přesného skenování. Zajišťuje velice tenkou vrstvu povlaku. Dodavatelé uvádí výšku vrstvy 0,001 mm. Tento druh prášku je nejnákladnější. Prášek se mísí nejčastěji s etanolem. Nános je zde zprostředkován za pomoci speciální stříkací pistole, která se musí po každém nánosu důkladně vyčistit ⁴⁷.

2.6 Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí stroje (CMM) jsou zařízení, které dokáží měřit součást s velmi vysokou přesností. Stroj se řadí mezi univerzální měřicí přístroje, jelikož má možnost zachycovat body ve všech třech osách. Na obrázku 2.17 je znázorněno typické uspořádání



Obrázek 2.17 - Klasické uspořádání CMM ⁶

CMM. Všechny CMM se skládají z pracovního stolu, měřicí hlavy, pohyblivých os a měřicího softwaru ^{6, 16}.

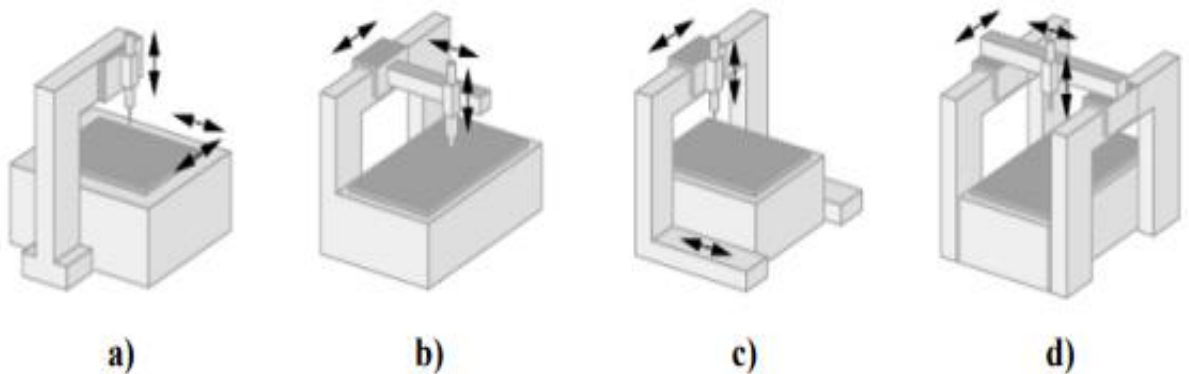
Na stroje jsou kladeny tyto požadavky:

- dobrá schopnost tlumit vibrace,
- nízká teplotní roztažnost,
- rozměrová stabilita,
- tepelná vodivost.

Z materiálového hlediska patří mezi nejpoužívanější materiály pro tvorbu CMM kompozity, slitiny hliníku, oceli a granit. Kompozitní materiály jsou charakteristické vysokou pevností, teplotní stálostí a nízkou hmotností. Slitiny hliníku se vyznačují dobrou obrobitelností, dobrou odolností proti korozi a nízkou měrnou hmotností. Granit je velice odolný proti poškrábání a opotřebením, proto se velice často používá jako materiál pro stoly. Bohužel tento materiál má nevýhodu, kterou je jeho vysoká měrná hmotnost. Oceli se využívají u strojů, protože jsou dobře dostupné. Jejich nevýhodami oproti ostatním materiálům jsou teplotní roztažnost a poměrně vysoká hmotnost ^{6, 16}.

2.6.1 Typy konstrukcí CMM

Na trhu existuje nespočet druhů CMM, od malých velikostí pro laboratorní měření, až po deseti metrové stroje, které jsou schopny kontrolovat velikosti automobilů. Všechny tyto stroje se však dají rozčlenit do čtyř základních typů ⁶:



Obrázek 2.18 - Typy konstrukcí CMM ⁶

- **Stojanový**

Tento typ stroje, viz obrázek 2.18a, se využívá pro měření menších součástí. Řadí se mezi nejpřesnější typy. Konstrukce je složena z nosného sloupu, který je osazen měřicí pinolou pohybující se v ose z. Stůl je pohyblivý v ose x a y. Výhodou tohoto typu konstrukce je dobrý přístup měřicí hlavy ke všem stranám objektu ⁶.

- **Výložníkový**

Konstrukce je složena z výložníku, na němž je připevněna pinola pohybující se v ose y a z. Výložník, viz obrázek 2.18b, se pohybuje v ose x. Měřená součást se připevňuje na stůl, který je v tomto případě nepohyblivý. Výhodou tohoto typu je dostupnost k měřenému předmětu ze tří stran. Další výhodou u tohoto typu je vyšší rychlost sběru dat ⁶.

- **Portálový**

Portálový typ, viz obrázek 2.18c, charakterizuje vysoká tuhost s velkými měřicími rozsahy. Patří mezi nejrozšířenější především z pohledu vysoké přesnosti měření a využívá pro měření středních a velkých velikostí součástí. Vyrábí se ve dvou provedeních, s pevným portálem, anebo s pohyblivým portálem. U pevného portálu je deska stolu pohyblivá ⁶.

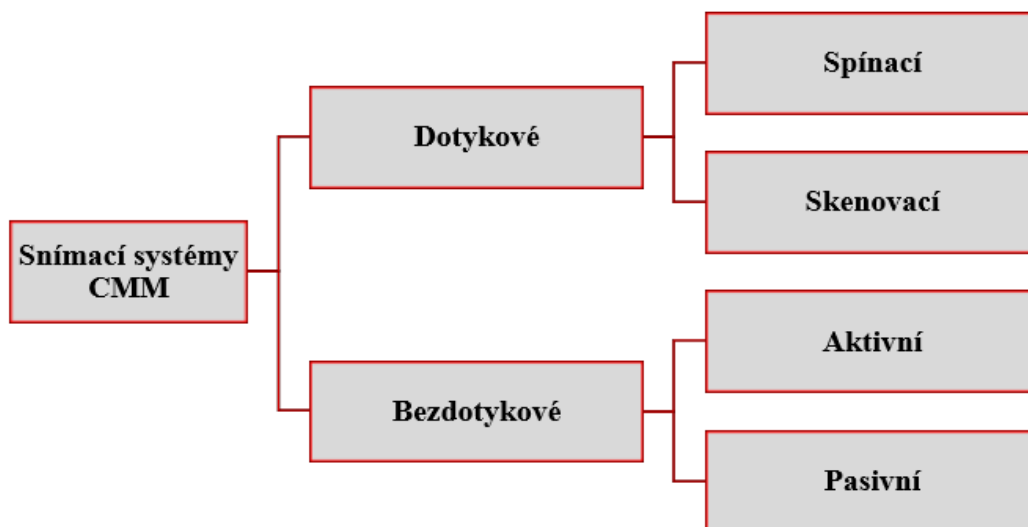
- **Mostový**

Tento typ je hodně využíván v leteckém a automobilovém průmyslu k měření velkých dílů v řádu metrů. Dosahuje vysoké tuhosti s velkým měřicím rozsahem. Konstrukce je tvořena ze dvou pevných rámců, které jsou spojeny pohyblivým členem, umožňující měření ve všech 3 osách je zobrazen na obrázku 2.18d ⁶.

2.6.2 Snímací systémy

Mezi další důležitou část CMM patří nepochybně snímací systém, který umožňuje snímání bodů na měřené součásti. Je to přechodová část mezi strojem a měřenou součástí. Naměřenou hodnotu získáme pomocí měřicího programu. Snímací systém je napojen na pinolu a je sestaven ze snímací hlavy a snímacího dotyku ¹⁶.

Dále je možné rozlišovat snímací systémy podle obrázku 2.19. Na trhu jsou nejvíce rozšířené dotykové snímací systémy.



Obrázek 2.19 - Základní rozlišení snímacích systémů ¹⁶

- **Snímací hlavy**

Snímací hlavy, viz obrázek 2.20, 2.21 a 2.22, se rozdělují do dvou kategorií (pevné a indexovací). Pevná hlava je tuhá, nedá se s ní otáčet, a proto tato hlava dosahuje vyšších přesností. Indexovací hlava umožňuje snímání pracovního prostoru stroje, protože se může natáčet a zajistit tak požadovanou polohu pro zaznamenání hodnoty. Dělí se na dva druhy, motorické a manuální. Motorické hlavy umožňují lepší opakovatelnost nastavení úhlů bez nutnosti kalibrace přístroje. Z časového hlediska je tak vhodnějším řešením. Manuální hlavice slouží pro přesné indexování, každá hlavice má vymezené polohy nastavení. Oproti motorickým hlavám jsou cenově dostupnější ⁶.



Obrázek 2.20 -
Pevná hlava ⁶



Obrázek 2.21 –
Manuální hlava ⁴³



Obrázek 2.22 – Motorická
hlava ⁴⁵

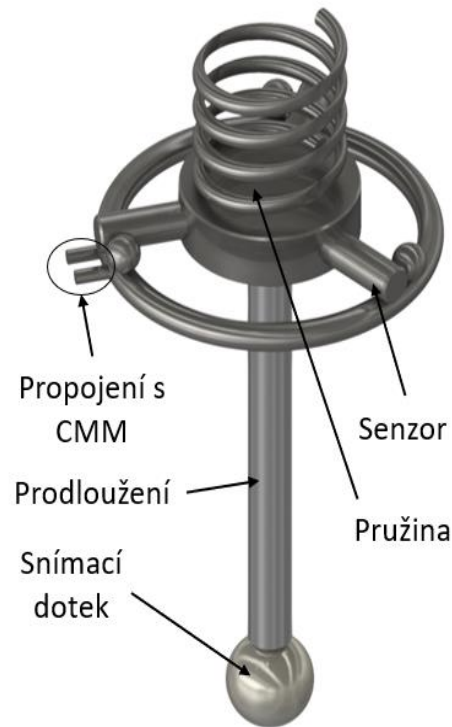
- **Dotykové snímací systémy**

Měření se u tohoto systému realizuje fyzickým dotykem mezi pohyblivým prvkem stroje (snímacím dotykem) a měřeným předmětem. Základní prvky snímacího doteku jsou zobrazeny na obrázku 2.23. Snímací dotek způsobí sepnutí sondy, která dá informaci o poloze bodu.

Doteky jsou vyráběny s velkou tvarovou přesností, a je u nich kladen důraz na tuhost a odolnost proti opotřebení. Z tohoto důvodu jsou vyráběny z rubínu, nitridu křemíku a oxid zirkoničitý. Rubín zajišťuje hladký povrch, vysokou pevnost v tlaku a odolnost proti opotřebení. Hodí se pro měření běžných materiálů. Dotyk z nitridu křemíčitý se využívá pro měření hliníku, protože odolává adheznímu oděru. Pro skenování litiny se používá dotyk z oxidu zirkoničitý, který lépe odolává adhezi. Snímací doteky se vyrábí v několika provedení ¹⁶.

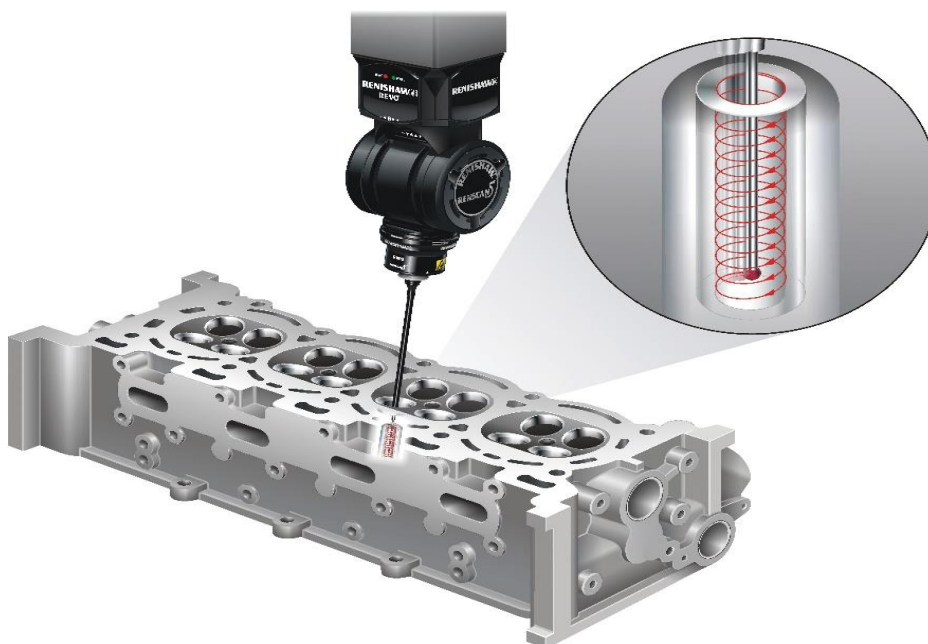
Prodloužení slouží k přenosu informace ze snímacího doteku. Přenáší přítlačnou sílu k senzoru, proto je u nich kladen důraz na vysokou tuhost a nízkou tepelnou roztažnost. Vyrábí se z legované oceli, hliníku, titanu a dalších. Na prodloužení je připojena pružina ¹⁶.

Dotykový spínací systém slouží pro měření běžných geometrických prvků. Není vhodný pro měření odchylek tvarů. Měření probíhá v sekvencích, kdy se opakuje změření určitého bodu, a poté odjetí od povrchu. Při kontaktu s objektem je vyvolán signál, který určuje přesnou polohu daného měřeného bodu. Tento druh měření je poměrně zdoluhavý, neboť dochází k časovým ztrátám při odjetí od objektu. Tento systém má však řadu předností, těmi jsou nízké pořizovací náklady, nízká hmotnost a menší velikost přístroje ¹⁶.



Obrázek 2.23 - Základní prvky snímacího doteku ¹⁶

Skenovací snímací systém pracuje na principu neustálého kontaktu s měřenou částí objektu, viz obrázek 2.24. Rozděluje se na dva režimy, měření dynamické a statické. Statický režim sbírá body při zastavení a vyhodnocují se většinou základní geometrické prvky. Dynamický režim umožňuje sbírání dat v průběhu pohybu, a díky tomu je možné měřit různé tvarové plochy ⁶.



Obrázek 2.24 - Grafické znázornění skenování u CMM ⁴⁶

- **Bezdotykové snímací systémy**

U měřících systémů je možnost i bezdotykového snímání objektu. To je zajištěno optickými snímači na CMM. Při měření objektu dochází k trojrozměrné digitalizaci objektu. Bezdotykové měřící hlavy jsou na obrázku 2.25 a 2.26. Tato metoda má následující výhody:

- sběr velkého počtu bodů,
- rychlost měření,
- měření křehkých materiálů,
- nedochází k tepelnému ovlivnění (nezprostředkovává se kontakt mezi měřidlem a objektem),
- větší pracovní prostor^{6, 16}.

Tato metoda má však i své nevýhody, kterými jsou především optické vlastnosti objektu, vnější faktory (teplota, světlo a jiné) a vyšší nejistota měření. Snímací systémy se dělí na pasivní a aktivní. Avšak u bezdotykových snímacích systémů se vyskytují pouze tři kategorie (laserové a kamerové systémy a počítačová tomografie)^{6, 16}.



Obrázek 2.25 - Laserová měřící hlava³⁹



Obrázek 2.26 - Kamerová měřící hlava⁴²

2.6.3 Odměrovací systémy

Tento systém umožňuje získat informace o souřadnicích snímaného bodu většinou v kartézských nebo polárních souřadnicových systémech. Je to jeden z nejdůležitějších systémů CMM, neboť ovlivňuje přesnost měření. Principem systému je zaznamenání informace ze tří lineárních os (x, y a z). Rozlišují se dva druhy odměřování inkrementální a absolutní.

U inkrementální je zapotřebí při zapnutí stroje provést referenční měření, které určí nulový bod všech os. Poté dostává řízení informace ve formě impulzů o poloze jednotlivých os. U absolutního odměřování se neprovádí referencování při zapnutí stroje a dává ihned

informace o poloze daného bodu vůči souřadnicovému systému. Některé CMM mají pohyblivou sondu, a v těchto případech dochází ke kombinaci odměřování. Odměřovací systémy se dělí na následující typy:

- prosvětlovací stupnice
- odrazové měřítko,
- interferenční měřítko,
- indukční odměřovací systémy,
- magnetické odměřovací systémy,
- laserové interferometry ⁶.

3 Chyby a nejistoty měření

Nejprve je důležité si definovat pojem měření. Měření je zkoumání měřitelného (kvantitativního) znaku, pomocí experimentálních úkonů k nalezení jeho přesné hodnoty. V praxi není možné, aby nebyly do výsledku měření vneseny chyby, a to buď danou metodou měření nebo samotným měřidlem^{6,33}.

3.1 Chyby měření

Pokud se provede soubor měření jednoho znaku za stejných podmínek, zjistí se, že dílčí výsledky se od sebe vždy nepatrně odlišují. Způsobuje to mnoho faktorů, kterými ku příkladu mohou být nedodržení konstantních podmínek měření, nepřesnost měřícího aparátu a jiné. Všechny měření jsou ovlivněny určitým druhem chyb, mezi hlavní příčiny vzniku chyb patří:

- chyba měřícího aparátu (nedokonalost měřícího přístroje, chybné odměření počátku – nuly, chybné umístění atd.),
- měřící metoda (nedodržení funkčních závislostí, nerespektování vlastností měřidel),
- okolní podmínky (nedodržení stejné teploty),
- lidský faktor (tato chyby závisí na osobě, která provádí měření – jde hlavně o zručnost zacházení s měřícím zařízením).

Dále lze dané chyby členit dle:

- časové závislosti,
- možnosti odstranění chyby,
- způsobu výskytu (hrubé, systematické, náhodné)^{6,33}.

3.1.1 Chyby hrubé

Vznik hrubých chyb je zapříčiněn nesprávným měřením. Tím je myšleno chybné odečtení hodnot ze stupnice, vada stroje, zanedbání měřících podmínek, nesprávná manipulace s měřidlem a další. Pokud by se tyto hodnoty vnesly do výsledného měřícího souboru, mohlo by dojít ke zkreslení závěrečného výsledku, a hlavně k jeho nesprávnosti. Proto je potřeba tyto hodnoty z prvotního souboru měření odstranit. Občas dojde k objevení hrubé chyby v průběhu měření. V tomto případě by se mělo s měřením přestat do té doby, než se určí příčina a zajistí její odstranění^{6,33}.

K rozpoznání hrubých chyb je možno využít normálního rozdělení hustoty pravděpodobnosti. Postup zjištění chyby hrubé v souboru hodnot, u kterého neznáme výběrovou směrodatnou odchylku je následující^{6,33}:

I. Získání výběrového průměru hodnoty ze souboru:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.1)$$

Kde: n je počet měření.

II. Vypočítání výběrové směrodatné odchylky:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3.2)$$

III. K posouzení odlehlosti podezřelých hodnot (x_2, x_n) je nutné určit hodnoty H_2 a H_n

kde ($x_2 < \bar{x}, x_n > \bar{x}$):

$$H_2 = \frac{\bar{x} - x_2}{s(x)} \quad (3.3)$$

$$H_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s(x)} \quad (3.4)$$

IV. Z tabulky se stanoví mezní hodnota H pro zvolenou pravděpodobnost a rozsah výběru.

Tabulka s hodnotami je v příloze A.

V. Dojde k posouzení hodnot výsledku. Z předpokladu, že v $H_2 < H$ hodnota x_2 není poskytnuta hrubou chybou. V případě, že $H_n > H$ je hodnota x_n zatížena hrubou chybou a ze souboru hodnot musí být odstraněna ^{6, 33}.

3.1.2 Chyby systematické

Tento druh chyb se vyskytuje u každého měření a jejich odchylka od reálné hodnoty má stále stejnou hodnotu. Chyby dále dělíme na:

- zjištěitelné (K odstranění této chyby se může využít etalonu, u kterého se zjistí odchylka od naměřené hodnoty. Pokud tuto odchylku už známe, můžeme provést korekci měřidla.),
- nezjištěitelné (U tohoto druhu chyby nejde použít korekci měřidla a tyto chyby se zahrnují do nejistoty měření, viz dále.).

Tyto chyby mohou být zapříčiněny chybou měřidla, měřící metodou, osobní chybou a vlivem prostředí. K zjištění teplotní chyby, která je zapříčiněna rozdílem teploty měřené součásti a teploty referenční, se uvádí vztah ^{6, 33}:

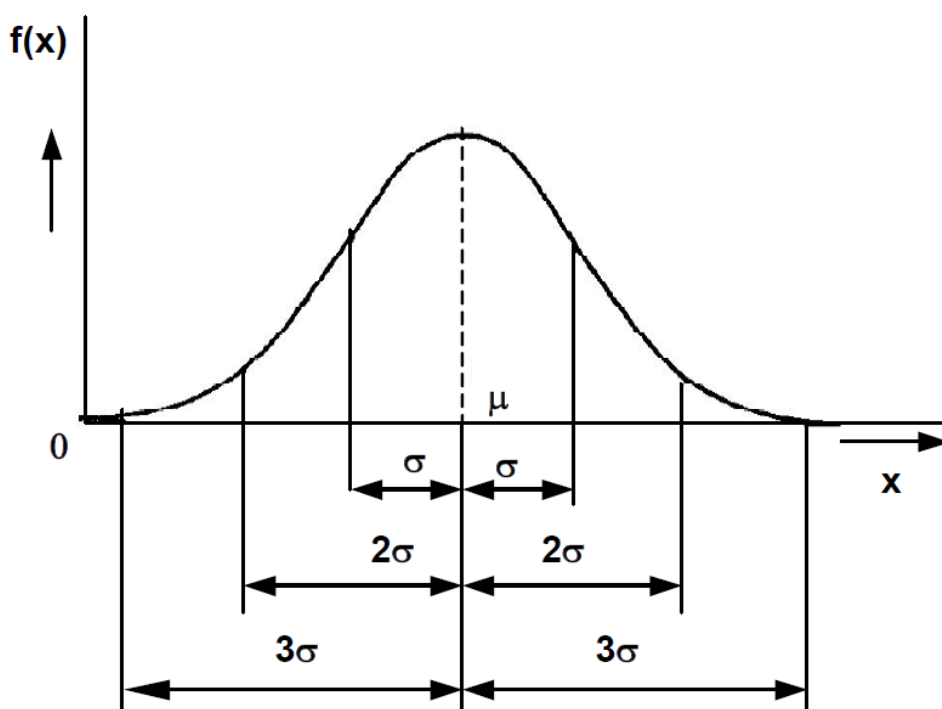
$$\varepsilon_{STv} = \alpha \cdot L \cdot (T - T_o) \quad (3.5)$$

Kde: α koeficient délkové roztažnosti

L naměřená hodnota délkového rozměru

3.1.3 Chyby náhodné

U těchto chyb je příčina vzniku náhodného charakteru, ať už velikosti, tak i co se týče směru. U každého měření, které se provádí, se vyskytnou chyby náhodné. Tyto chyby jsou patrné v souboru naměřených hodnot, kde jsou podmínky (osoba, měřidlo...) stejné, ale naměřené hodnoty se vždy nepatrně liší. Z toho plyne, že soubor naměřených hodnot vždy vykazuje rozptyl, který je úměrný této chybě. Proto se tato chyba dá zjistit pouze ze souboru naměřených hodnot, za pomoci intervalu, v němž se bude s jistou pravděpodobností vyskytovat skutečná hodnota. Nejčastěji se znázorňuje Gaussovým rozdělením hustoty pravděpodobnosti, viz obrázek 3.1 ^{6,33}.



Obrázek 3.1 - Gaussovo rozdělení ³³

Náhodné chyby se na rozdíl od předešlých chyb (systematické, hrubé) nedají odstranit. S přihlédnutím na pravděpodobnost výskytu se tato chyba dá určit z rozdělení hustoty pravděpodobnosti. K určení je zapotřebí nejprve vzorce pro zjištění hodnoty výběrového průměru (3.1), a poté se vypočítá výběrová směrodatná odchylka (3.2). Na závěr se určí výběrová směrodatná odchylka dílčích aritmetických průměrů ^{6,33}:

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (3.6)$$

3.2 Nejistota měření

U pracovišť, která jsou akreditovaná podle mezinárodních norem, směrnic a pokynů evropských organizací, se požaduje, aby výsledek měření či kalibrace, byl uváděn výslovně s výslednou nejistotou měření.

Nejistota měření je parametr charakterizující rozptýlení hodnot měřené veličiny, který se může přičíst k výsledku. Nejistota se mimo jiné vyskytuje u přístrojů a měřidel. Určování nejistoty vychází ze statistiky, kde je předpoklad, že dané rozdělení pravděpodobnosti udává, v jakém rozptylu hodnot se skutečná hodnota měření vyskytuje.

Mírou nejistoty je výběrová směrodatná odchylka, jež určuje základní druh nejistoty (standartní nejistotu u). Při normálním rozdělení pravděpodobnosti zaručuje výsledek s 68,28% jistotou. Nejistota se dále dělí na standartní nejistotu typu A , standartní nejistotu typu B , kombinovanou standartní nejistotu a rozšířenou standartní nejistotu. Všechny druhy budou popsány dále.

Druhů příčin vzniku nejistot je mnoho. Především jde o jevy, které ovlivňují jednoznačnost naměřené hodnoty od skutečné (nominální) hodnoty. Důležité je, jak měřící přístroj získává data, například jakou má nastavenou vzorkovací frekvenci, zda jsou použity nějaké druhy filtrů a vzorkovačů a dalších prostředků. Nejistoty jsou také ovlivněny ku příkladu:

- převzetím hodnot a zaokrouhlováním,
- nevhodným výběr přístroje,
- nevhodným postupem,
- subjektivností obsluhy,
- nepřesností kalibračních materiálů^{6,33}.

3.2.1 Standartní nejistota typu A (u_a)

Tento druh nejistoty je zapříčiněn náhodnými chybami všeobecného charakteru. Určení je možné až při větším počtu měření. U menšího počtu měření je využito koeficientu. Jelikož v dnešní době je výpočetní technika na pokročilé úrovni, je možné bez většího problému tento typ nejistoty vypočítat z velkého počtu dat. Získá se výpočtem výběrové směrodatné odchylky $s(\bar{x})$ ^{6,33}:

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (3.7)$$

3.2.2 Standardní nejistota typu B (u_b):

Na rozdíl od předešlé nejistoty, zde není návaznost na měření. Většinou je tento druh nejistoty udáván na ověřovacích listech etalonů, kalibračních listech, certifikátech a tak dále. Získávání výsledné hodnoty nejistoty typu B není jednoduché. Nejdříve se musí odhalit příčina vzniku nejistoty (zmapování zdrojů), pak se provede jejich identifikace a určení standartních typů nejistoty. Následně se provede posouzení závislosti mezi jednotlivými

druhy nejistot. Pokud na sebe nejsou nejistoty vázané, provede se výpočet viz vzorec 3.8, pokud jsou vázané viz vzorec 3.9^{6,33}.

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial f}{\partial z_i} \cdot u_{Bz_i} \right)^2} \quad (3.8)$$

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial f}{\partial z_i} \cdot u_{Bz_i} \right)^2 + \sum_{\substack{i,k=1 \\ i \neq k}}^k \frac{\partial f}{\partial z_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial z_k} \cdot u_{Bz_i} \cdot u_{Bz_k} \cdot r_{z_{ik}}} \quad (3.9)$$

3.2.3 Kombinovaná standartní nejistota

Tento druh nejistoty se dá zjistit jen za předpokladu, že jsou zjištěny nejistoty typu u_a a u_b . Pokud je známá hodnota této nejistoty, lze s velkou pravděpodobností říci, že výsledná hodnota se bude nacházet v jejím intervalu. Zjistí se podle vzorce 3.10^{6,33}:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (3.10)$$

3.2.4 Rozšířená nejistota

Tento druh nejistoty se určuje, když se požaduje vysoká pravděpodobnost, že měřená hodnota leží ve výsledném intervalu. Většinou se jedná o k násobek kombinované nejistoty.

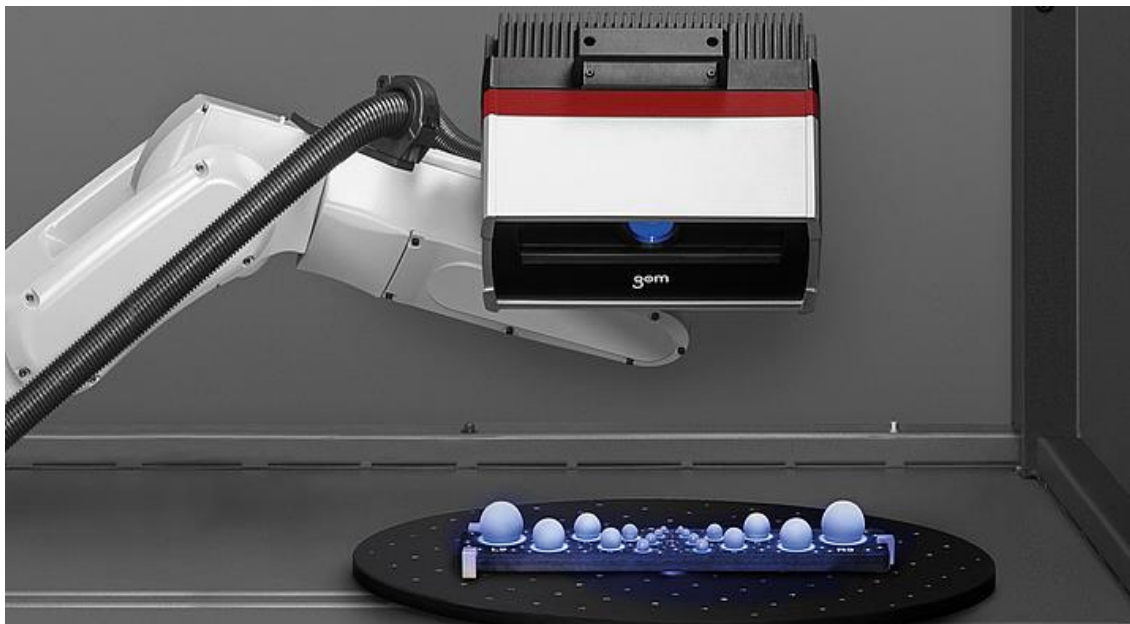
$$U = k_U \cdot u_c \quad (3.11)$$

Koeficient k_u se označuje jako koeficient rozšíření nebo pokrytí. Lze určit konvencí nebo je stanoven v předpisech a technických normách. Nejčastěji se tato hodnota pohybuje v rozmezí 2 až 3^{6,33}.

4 Popis konstrukce a funkce použitých přístrojů

Na trhu je řada firem, které se zaměřují na vývoj a prodej měřících systémů. Mezi takové se řadí firma GOM (Gesellschaft für Optische Messtechnik – Společnost pro optickou měřící techniku). Tato firma, jak je patrné z názvu, se zaměřuje především na systémy, které měří objekt opticky. Vyvíjí řadu nových inovativních strojů jako, například snímač ARAMIS 3D, který pracuje na principu triangulace. Vyvinuli ho pro účely zkoumání deformací a vibrací na měřené součásti ³⁸.

Jednou z nejpoužívanějších řad produktů od firmy GOM je systém ATOS, který je na trhu už mnoho let, viz obrázek 4.1. Firma tuto řadu produktů nabízí v několika variantách podle druhu využití. Všechny tyto produkty pracují rychle, s vysokou rozlišovací schopností. Celá tato řada pracuje na již zmíněném principu triangulace. Při měření dojde k záznamu milionů bodů na jedné měřené scéně. K měření je někdy potřeba více takových scén, proto se využívají speciální referenční body, které napomáhají k lepšímu napojení jednotlivých scén. Naměřená data lze poté různě upravovat a převádět do potřebných datových formátů. Nejobvyklejší formát souboru naměřených dat se však nazývá STL. Produktová řada ATOS se využívá i pro automatizaci, a to za pomoci průmyslového robota nebo otočného stolu ^{37,48}.



Obrázek 4.1 - Produktová řada ATOS s ověřovací součástí ³⁸

Mezi přední výrobce CMM patří společnost Wenzel, která se vývojem těchto strojů zabývá už desítky let. Vyrábí portálové, mostové i výložníkové typy CMM. Jejich stroje mají uplatnění v jakékoliv aplikaci ³⁵.

4.1 Popis konstrukce a funkce Wenzel LH 65 – X3M Premium

U přístroje Wenzel LH 65 – X3M Premium se jedná o portálový typ konstrukce, který zaručuje přesné měření. Tento přístroj se hodí k měření přesných rozměrů jakéhokoliv typu. Další technické informace o tomto přístroji jsou uvedeny v tabulce 3³⁶.

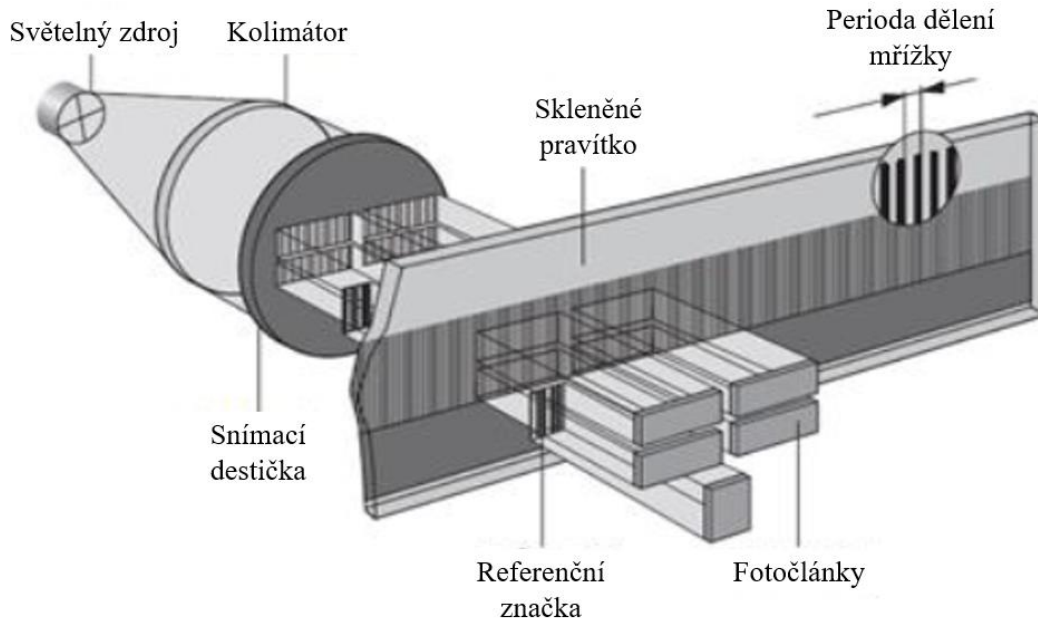
Tabulka 3 - Technické parametry přístroj Wenzel LH 65 - X3M Premium³⁶

Měřicí prostor:	
x	650 mm
y	1000 mm
z	500 mm
Nejistota měření délky u přístroje dle ISO 10360-2:	
$MPE_e = 1,6 + \left(\frac{L}{350}\right) \mu m$	(4.1)
Kde: MPE_e je nejistota měření délky dle ISO 10360-2	
L je měřená délka [mm]	
$MPE_p = 1,6 \mu m$	(4.2)
Nosnost granitové desky:	
m_d	500 kg
Snímací systém Renishaw:	
Druh systému:	Motorická indexovací hlavička
Typ:	PH 10M
Měřicí skenovací sonda:	
Typ	SP 25M - modul 1
Maximální dovolená chyba	2,2 μm
Software:	
Typ	Metrosoft QUARTIZ R6
Dotyk:	
Označení	1001
Přesnost dotyku po kalibraci	0,0002 mm
Délka dřívku	35 mm
Materiál kuličky	Rubín

4.1.1 Princip odměřování

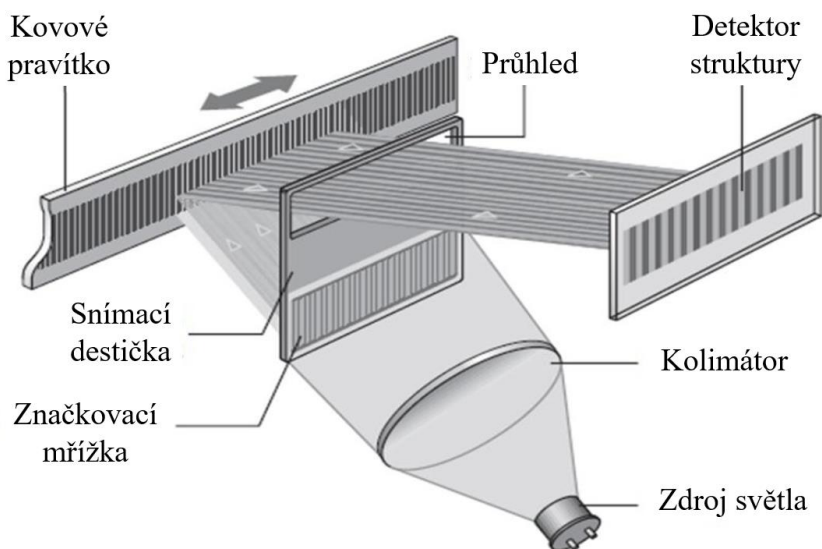
Odměřování na přístroji Wenzel probíhá za pomoci motorů, které řídí posuvy všech tří os. Lože každé z os je vybaveno aerostatickým uložením. Toto uložení patří do nejpřesnějších, a to z důvodu minimalizace odporu, jelikož jsou mezi stykovými plochami vytvořeny vzduchové vačky o tloušťce 4 až 8 μm . Přístroj je vybaven dvěma druhy odměřovacích systému, a těmi jsou skleněná prosvětlovací stupnice a odrazové měřítko³⁶.

Odměřovací princip pomocí skleněné trubice je zobrazen na obrázku 4.2. Z něj jde vidět, že na trubici jsou vytvořeny dílky, většinou je jich 50 až 100 v jednom milimetru. Zdroj světla emituje paprsky, které se usměřují přes kolimátor. Tyto paprsky prostupují přes snímací destičku a skleněné pravítko na fotočlánky, na kterých pobíhá čtení polohy (odměřování) ¹⁶.



Obrázek 4.2 - Princip odměřování skleněným pravítkem ¹⁶

Princip odměřování přes odrazové pravítko je zobrazen na obrázku 4.3. Odměřovací pravítko je vyrobeno z kovu, v tomto případě ze zlata. Paprsky ze zdroje světla jsou, jako u předešlé metody, upravovány přes kolimátor. Ty pak prochází přes značkovací mřížku na kovové pravítko se odrazí a skrz průhled dopadají na detektory. Díky dílkům na pravítko dochází k detekci, a to z důvodu jiného odrazu světelných paprsků ¹⁶.



Obrázek 4.3 - Princip odměřování odrazovým pravítkem ¹⁶

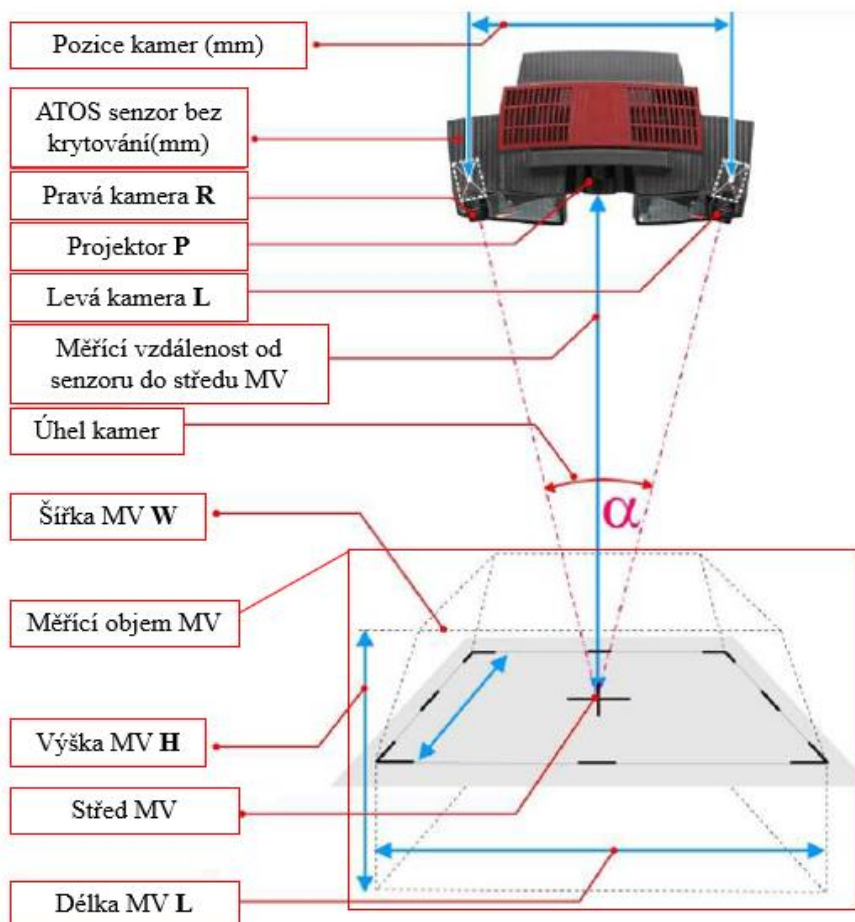
4.2 Popis konstrukce a funkce systému ATOS III Triple Scan 16M

ATOS Triple Scan je mobilní optický skener, který je určen k digitalizaci měřených objektů. Přístroj se řadí mezi nejlepší ve své kategorii, protože využívá jedinečných technologií. Disponuje vysokou měřicí přesností. Tato přesnost je docílena díky speciální optice a rozlišení kamer, které má 16 megapixelů. Přístroj zprostředkovává měření na principu triangulace a strukturovaného světla. Přístroj má speciálně vyvinutý projektor, který na předmět vyzařuje modré světlo (Bluelight), které je emitováno LED diodami. Promítání modrého světla zajišťuje měření stálost. Díky nízké vlnové délce nedochází k zásadnímu ovlivňování okolním světlem. Diody jsou zde z důvodu vyzařování tepelné energie. Teplota v blízkém okolí přístroje se musí pohybovat v rozmezí 5 až 40 °C. Přístroj během měření dokáže rozpoznat, zda se pracovní teplota pohybuje v daném rozmezí a pokud je překročena upozorní na to uživatele. Dalším důvodem, proč jsou zde využity diody je provozní doba, disponují delší dobou provozu s porovnáním s žárovkou^{37, 48}.

U přístroje je možnost nastavení měřicího objemu. Jeho jednotlivé měřicí objemy a parametry nastavení jsou v tabulce 4. Přístroj a jeho základní popis je zobrazen na obrázku 4.4.

Tabulka 4 - Parametry měřících objemů přístroje⁴⁸

Měřicí objem	MV 170	MV 320	MV560	MV 850
Pozice kamer	SO	400		
Měřicí objem (LxWxH) [mm]	170x130x100	320x240x200	535x400x320	810x610x500
Vzdálenost mezi naměřenými body [mm]	0,034	0,064	0,110	0,166
Doporučené referenční body [Ø mm]	0,8	1,5	3	3
Měřicí vzdálenost	440	800	800	800
Úhel mezi kamerami [°]	32	27	27	27
Ohnisková vzdálenost [mm]	50	50	35	24
Ohnisková vzdálenost objektivu projektoru [mm]	60	50	30	20
Standartní kalibrační objekty	CP40/MV170	CP40/MV320	CP40/MV560	CP40/MV700



Obrázek 4.4 - Základná popis přístroje ATOS Triple Scan 16M ⁴⁸

Měřicí systém ATOS TRIPLE SCAN 16 M se skládá z těchto hlavních částí:

- Projekční jednotka
- Dvě CCD kamery
- Výpočetní jednotka (počítač) vybaven programem od firmy GOM
- Referenční body
- Kalibrační destička

5 Experimentální měření a jejich vyhodnocení

Experimentální část práce byla prováděna ve dvou měřících laboratořích. První část měření byla prováděna ve společnosti Honeywell Aerospace Olomouc pod odborným dohledem pana Ing. Dušana Slimaříka, Ph.D. Druhá část měření se prováděla na Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie, na stroji CMM od firmy Wenzel panem Ing. Ondřejem Mizerou.

Cílem experimentu bylo porovnání dvou metod, kterými jsou proužková projekce a měření skenovací sondou, a zhodnocení jejich výsledků. Experiment se prováděl z důvodu získání vypovídající hodnoty měření u přístroje ATOS, aby se zjistilo, u jakých dílců se dá tato metoda využít a s jakou přesností se může přístrojem měřit v dané laboratoři, a zda se tyto výsledky dají porovnat s měřením na souřadnicovém měřícím stroji.

5.1 Měřená součást

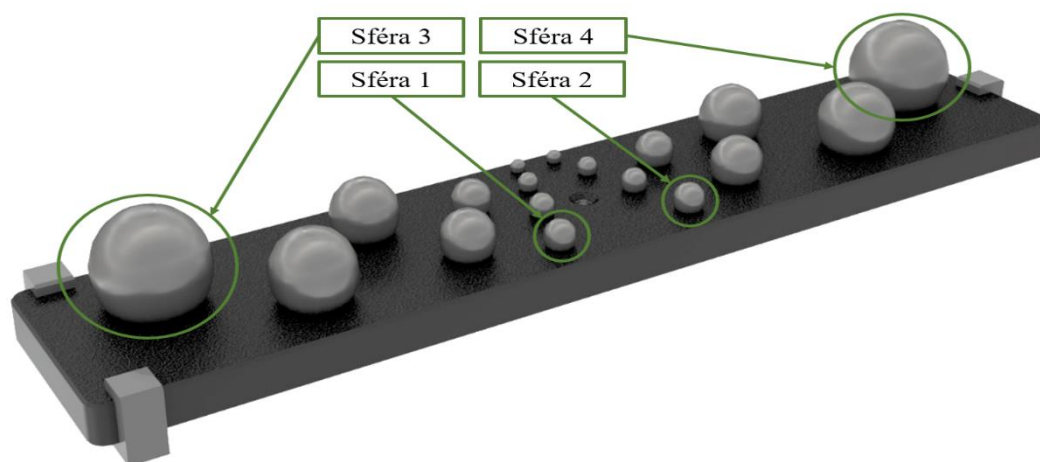
Pro experiment byla vybrána součást, která je pro měřící soustavu ATOS ověřovací součástí s označením GOM Probing/Spacing Artefact 400 (PSA/400/Z5015). Ověřovací funkce součásti je taková, že pokud je podezření, že přístroj nesplňuje stanovené přesnosti výrobcem, provede se ověřovací měření této součásti. Ověřovací měření probíhá ve speciálním módu přístroje. Na součásti se během měření ověřují, viz příloha B a C:

- odchylka tvaru (Parameter Probing Error Form),
- odchylky v měření velikosti sféry (Parameter Error Size),
- odchylka v měření vzdáleností středů sfér (Sphere Spacing Error),
- odchylka v měření délky (Parameter Length Measurement Error).

Těleso je složeno z několika částí a těmi jsou:

- základová deska,
- šestnáct sfér,
- tři ustavovací hranoly.

Sféry tvoří páry a každá z nich je na součásti zrcadlově rozmístěna od středu desky. Pro lepší znázornění je součást zobrazena na obrázku 5.1. Ještě před samotným měřením bylo důležité si stanovit, co se bude na tělese měřit. Pro měření byly zvoleny největší páry sfér a poté čtvrté nejmenší páry sfér. Dále byly zvoleny absolutní vzdálenosti poloh středů sfér, a to pouze mezi páry, viz obrázek 5.1.



Obrázek 5.1 - Měřené těleso

5.2 Průběh měření u přístroje ATOS TRIPLE SCAN 16M

Před samotným začátkem měření bylo nutné zkalibrovat přístroj. Následně si stanovit postup měření na přístroji. Ten byl stanoven vedoucím pracovníkem Ing. Dušanem Slimaříkem, Ph.D ve firmě Honeywell. Průběh celého procesu měření bude popsán v následujících kapitolách.

5.2.1 Kalibrace skeneru

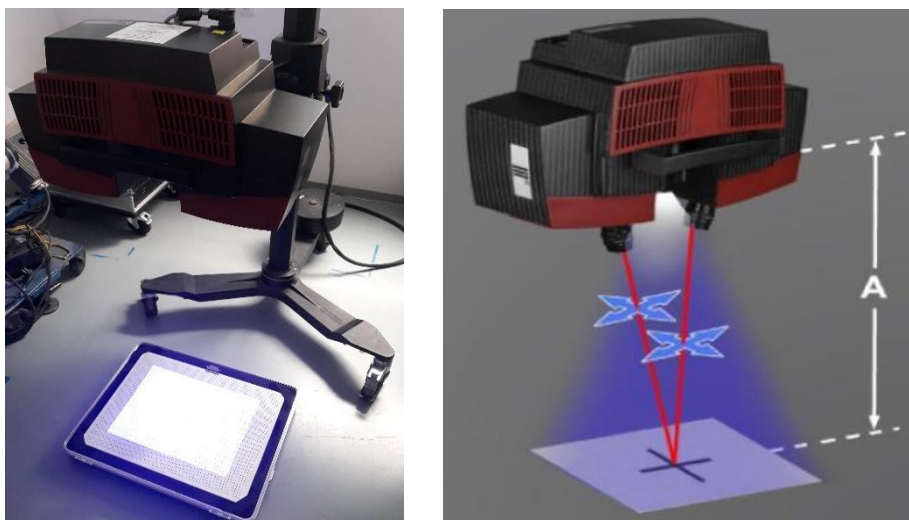
Kalibrace skeneru je proces, který je u přístroje žádaný a slouží k doladění přístroje. Ta se provádí při každé změně měřicího objemu, před prvním použitím nebo u nahlášené dekalibrace přístroje. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.4 existuje určitá časová závislost mezi odchylkou od nominální hodnoty a doby kalibrace. Proto by se kalibrace přístroje měla provádět v co nejkratších intervalech s přihlédnutím na požadovanou přesnost měření.

Pro kalibraci přístroje jsou k dispozici tři kalibrační objekty. Těmi jsou panely, panel s magnetickou podložkou a kříž. Každý z panelů má své označení a je určen pro kalibraci jiného měřicího objemu.

Software pro zkalibrování potřebuje nastavit pozici a orientaci kamer, vlastnosti a charakteristiku čipů (uživatel vybírá pouze z předem předvolených možností). Dále je potřeba si změřit teplotu kalibrační desky. K tomu byl použit teploměr EBRO s označením TLC 1598. Po vyplnění těchto zbylých údajů může být provedena kalibrace přístroje.

Kalibrace u MV 320 proběhla pomocí panelu GOM/CP40/320 s teplotou kalibračního panelu 24,2 °C. Poté software naváděl uživatele, co a jak má dělat, aby došlo k správné kalibraci. Prvním krokem kalibrace bylo nastavení laserových paprsků na střed kalibračního panelu. Laserové paprsky se musely překrývat ve středu kříže na panelu. Protнутý bod byl poté střed v rovině zaostřeného skeneru. Vzdálenost skeneru a roviny je ukázána na obrázku 5.2. Dále software naváděl operátora, aby oddaloval nebo přibližoval skener od

nebo k podložce. Pak software vyžádal, aby operátor panel otočil o určitý počet stupňů a znovu proběhlo odměřování a kalibrování. Po těchto všech krocích došlo ke kalibraci přístroje a software ji vyhodnotil. Vyhodnocené informace z kalibrace jsou v tabulce 5.



Obrázek 5.2 - Pozice skeneru při kalibraci

Tabulka 5 - Údaje z kalibračního protokolu pro MV320

Obecné informace	
Kalibrovaný senzor	ATOS Triple Scan 16M/400
Měřicí objem – (výška, šířka a délka)	MV320 (320x240x200)
Kalibrační objekt	
Typ	Panel (Triple Scan) CP40-320-52524
Počet kalibračních bodů	3657
Certifikované rozměry [mm]	574,562/574,409
Certifikovaná teplota [°C]	20,0
Koeficient teplotní roztažnosti [K^{-1}]	$22,67 \times 10^{-6}$
Měřicí teplota [°C]	24,2
Kalibrační nastavení	
Ohnisková vzdálenost objektivu kamer [mm]	50,00
Ohnisková vzdálenost objektivu projektoru [mm]	50,00
Výsledek kalibrace	
Kalibrační odchylka [pixel]	0,027
Kalibrační odchylka (optimalizovaná) [pixel]	0,017
Limitní kalibrační hodnota [pixel]	0,070
Kalibrace projektoru [pixel]	0,103
Kalibrace projektoru (optimalizovaná) [pixel]	0,021
Limitní hodnota projektoru [pixel]	0,300
Úhel kamer [°]	26,5

Z tabulky 5 je vidět, že rozdíl měřící teploty se od teploty kalibrační liší o 4,2 °C. Přístroj disponuje funkcí automatické korekce teploty. To znamená, že při kalibraci panelu si systém sám vypočítal teplotní roztažnost panelu a korigoval ji podle rozdílu teplot. Pokud by se při měření teplota zásadně změnila, systém to dokáže rozpoznat a upozornit na to uživatele, aby znovu provedl kalibraci na danou teplotu. Z protokolu je dále patrné, že kalibrační odchylka u senzoru byla 0,017 pixelů a u projektoru 0,021 pixelů. Obě tyto hodnoty jsou hluboce pod limitní hodnotou přístroje, proto byla kalibrace prohlášena za úspěšnou.

5.2.2 Příprava povrchu měřeného objektu

Většina měřících objektů ve strojírenství musí být připravena pro měření. Optické měřicí systémy mají své specifické postupy.

Na povrchu součásti se mohou nacházet nežádoucí materiály jako jsou oleje. Ty musí být z povrchu odstraněny, a to především z důvodu přilnavosti matnicích prášků. Z tohoto důvodu byla součást odmaštěna acetonem.



Obrázek 5.3 - Měřené součásti s přípravkem pro nástřik sfér

Dalším krokem v přípravě je nanášení referenčních bodů. Ty se nanáší buď to na povrch objektu nebo v jeho okolí. Značnou výhodou je nanášení bodů do okolí objektu, a to z důvodu ušetření počtu nanášených bodů. Měřená součást byla polepena 32 referenčními body o průměru 0,8 mm a 18 referenčními body o průměru 1,5 mm. Součást s nalepenými

body a přípravkem pro nanášení matného prášku je na obrázku 5.3. Nalepení těchto bodů probíhalo před nástřikem matného prášku z důvodu lepší přilnavosti bodů.

Na povrch se nanasl titanový prášek ve směsi s etanolem. Nános se provedl stříkací pistolí Wata HP-C plus pod tlakem 50 kPa. Mísící poměr byl použit dle výrobce. Vzdálenost konce pistole od povrchu byla 8 až 15 cm. Na obrázku 5.4 je zobrazeno nanášení nástřiku na sféry.



Obrázek 5.4 - Provádění nástřiku matného prášku

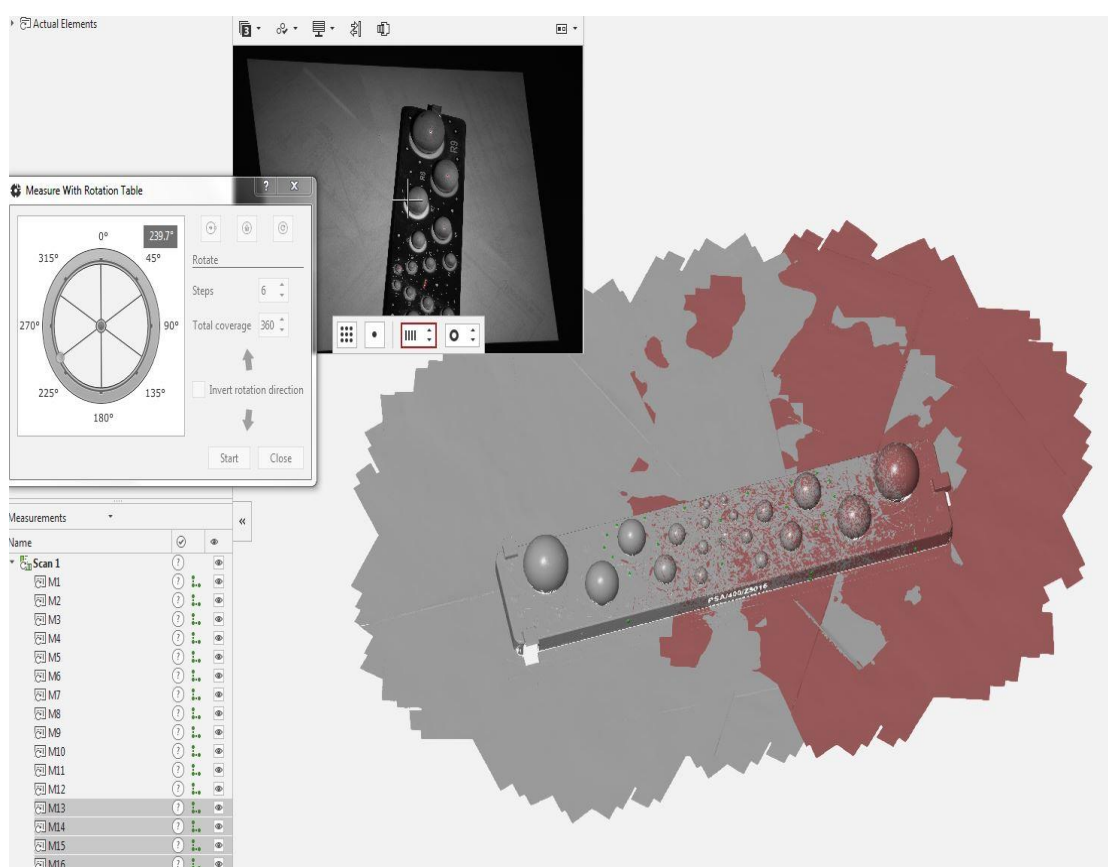
5.2.3 Měření objektu

Měření probíhalo v programu ATOS Professional V8 SR1. Zde se musely nastavit všechny potřebné hodnoty pro skenování, které jsou v tabulce 6.

Tabulka 6 - Nastavené hodnoty přístroje ATOS

Expozice	40,26 ms
Expoziční čas	60 ms
Zarovnání scén	Pomocí referenčních bodů
Počet expozičních časů	3

Nejprve došlo k správnému pojmenování souboru. Následně se díl umístil na střed rotačního stolu, kde nejdelší strana základové desky součásti byla kolmá na měřicí vzdálenost senzoru. Laserové pointery mířily na střed součásti. Poté se v programu vybrala možnost měření za pomoci rotačního stolu, kde se nastavila možnost provést měření 6krát za 360°. Pak se vyvolal start měření. Po dokončení cyklu se z důvodu malého skenovacího objemu musela součást posunout k pravému konci rotačního stolu. Vyvolalo se opět měření za pomoci rotačního stolu. Následně se těleso posunulo k levému konci a znovu se vyvolalo měření. Jakmile tento cyklus skončil provedlo se ořezání základové plochy rotačního stolu. Na obrázku 5.5 je vidět naskenovaná součást po zachycení osmnácti scén bez ořezané plochy rotačního stolu.



Obrázek 5.5 - Výsledné mračno bodů po dokončení cyklů skenování

5.2.4 Zpracování naměřených dat

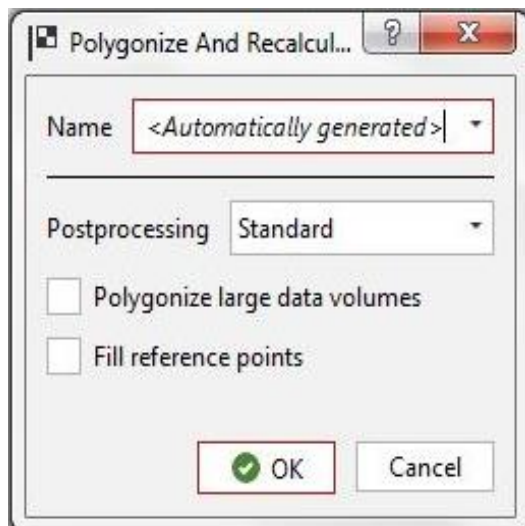
Zpracování dat měření bylo dalším krokem k získání výsledku měření. Tento krok výrazně ovlivňuje výsledek měření, a to především z důvodu tvorby polygonální sítě (zde může dojít ke zkreslení naměřených dat z důvodu nesprávného nastavení tvorby sítě).

- **Ořezání nepotřebných bodů**

Tento krok postupu byl potřebný z důvodu redukování množství bodů.

- **Vytvoření polygonální sítě (Polygonization)**

Tento krok procesu přeměnil naměřené mračno bodů do hladké sítě. U tohoto kroku bylo potřeba nastavit parametry vytvoření sítě. Nastavené parametry, které se použily pro vyhlazení jsou zobrazeny na obrázku 5.6.



Obrázek 5.6 - Parametry tvorby sítě

Jakmile byla dokončena polygonizace, proběhlo odstranění původního zdrojového souboru, který obsahoval mračno bodů. To se provedlo z důvodu zmenšení velikosti souborů, který z původních 3,5 GB se zmenšil na 24 MB. Ukázka mračna bodů a polygonizované sítě je na obrázku 5.7. Tímto postupem se součást změřila 20krát u měřicího objemu 170 a 20krát u objemu 320.

Vyhodnocování souboru měření probíhalo v programu GOM Inspect 2018. Každá naměřená polygonizovaná síť byla načtena do programu.

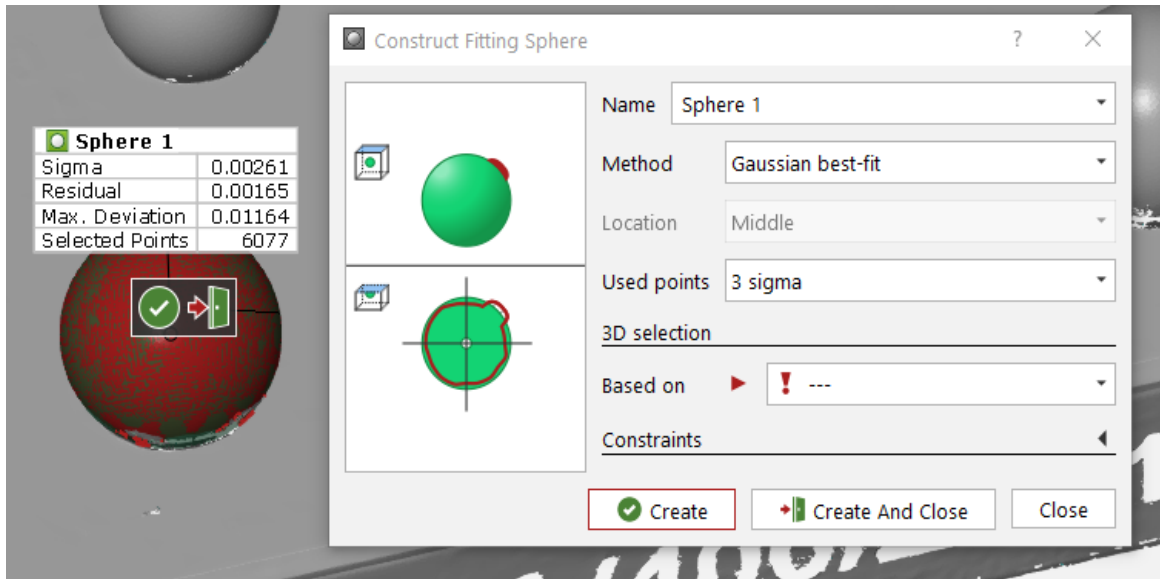


Obrázek 5.7 Ukázka mračna bodů a polygonizované sítě na stejné ploše

Program pracuje na principu vytvoření si známých geometrických elementů do polygonizované sítě. S těmito elementy se dá dále pokračovat a vyhodnocovat je.

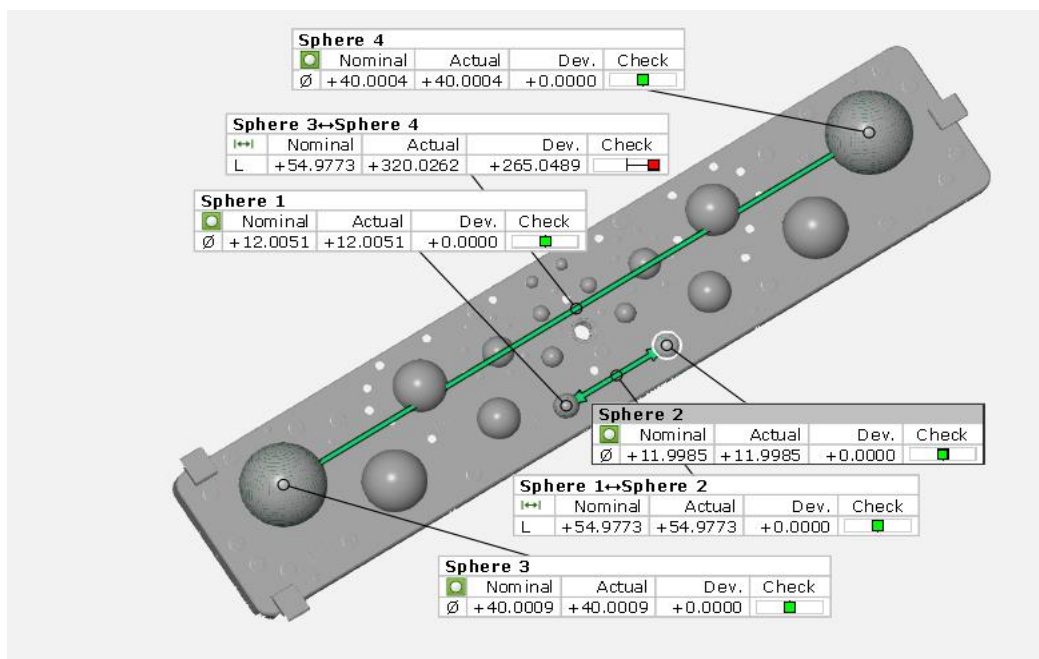
Pro každou z naměřených sítí se pomocí příkazů „Construction“ a „Fitting sphere“ vytvořily sféry jedna až čtyři. Při vkládání geometrického elementu koule se program tázal, jak má daný element zarovnat (připasovat) do dané sítě. Pro měření se vybrala metoda

„Gaussian best-fit“ s použitím 3 sigma. Jedná se o metodu připisování, která určí střed ze střední sféry nejmenších čtverců a proloží sféru tak, aby suma vzdáleností jednotlivých bodů byla co nejmenší.



Obrázek 5.8 - Funkce "Fitting sphere"

Každá z nich se patřičně pojmenovala. Poté se pomocí příkazů „Construction“ a „Construct 2-Point Distance“ vytvořily přímky mezi středy sfér 1-2 a 3-4. Následně se přešlo k vyhodnocení daných elementů. Výsledný obraz z jednoho souboru je na obrázku 5.9.



Obrázek 5.9 – Ukázka naměřených data v programu GOM Inspect 2018

5.2.5 Naměřená data

Naměřená data byla zaznamenána v programu Microsoft Excel. Výsledky pro jednotlivé měřicí objemy jsou v tabulce 7 a 8.

Tabulka 7 – Naměřené hodnoty pro objem MV 170

Měření objemem 170						
n	Rozměr sféry 1 [mm]	Rozměr sféry 2 [mm]	Rozměr sféry 3 [mm]	Rozměr sféry 4 [mm]	Absolutní vzdálenost mezi sférami 1 a 2 [mm]	Absolutní vzdálenost mezi sférami 3 a 4 [mm]
1	12,009	12,010	40,007	40,002	54,981	320,039
2	12,009	12,009	40,008	40,002	54,981	320,040
3	12,010	12,009	40,007	40,003	54,980	320,039
4	12,001	12,010	40,008	40,004	54,980	320,040
5	12,013	12,011	40,009	40,004	54,982	320,041
6	12,011	12,010	40,008	40,004	54,982	320,041
7	12,010	12,010	40,008	40,003	54,998	320,039
8	12,011	12,010	40,009	40,003	54,980	320,040
9	12,011	12,011	40,008	40,003	54,980	320,039
10	12,010	12,010	40,008	40,003	54,981	320,041
11	12,009	12,010	40,008	40,001	54,982	320,040
12	12,009	12,009	40,008	40,001	54,982	320,040
13	12,011	12,010	40,007	40,003	54,981	320,040
14	12,009	12,009	40,008	40,003	54,981	320,042
15	12,010	12,010	40,008	40,003	54,981	320,039
16	12,009	12,008	40,007	40,001	54,981	320,039
17	12,012	12,010	40,007	40,003	54,981	320,040
18	12,010	12,008	40,008	40,003	54,980	320,036
19	12,011	12,008	40,006	40,002	54,981	320,036
20	12,011	12,008	40,006	40,005	54,980	320,037

Tabulka 8 - Naměřených hodnot pro objem MV 320

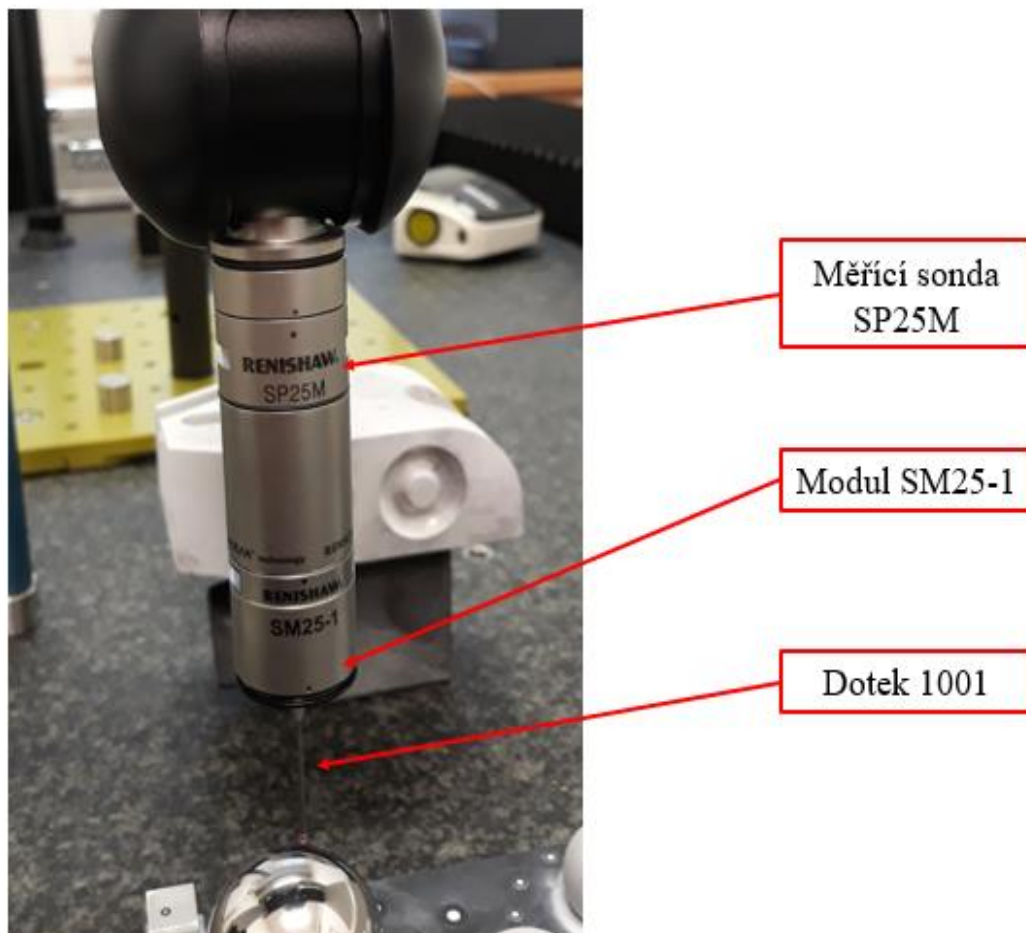
Měření objemem 320						
n	Rozměr sféry 1 [mm]	Rozměr sféry 2 [mm]	Rozměr sféry 3 [mm]	Rozměr sféry 4 [mm]	Absolutní vzdálenost mezi sférami 1 a 2 [mm]	Absolutní vzdálenost mezi sférami 3 a 4 [mm]
1	12,002	11,999	40,004	39,999	54,978	320,029
2	12,005	12,003	40,001	40,002	54,978	320,028
3	12,005	12,001	40,001	40,005	54,976	320,027
4	12,005	12,003	40,001	40,003	54,977	320,027
5	12,003	11,999	39,997	40,002	54,977	320,025
6	12,002	12,001	40,003	40,003	54,977	320,028
7	12,003	11,999	40,003	40,002	54,977	320,027
8	12,005	11,999	40,000	40,005	54,978	320,026
9	12,005	11,999	40,001	40,000	54,977	320,026
10	12,006	12,002	40,003	40,002	54,978	320,027
11	12,003	12,005	40,002	40,006	54,977	320,026
12	12,005	12,002	40,002	40,002	54,978	320,027
13	12,002	12,006	40,002	40,001	54,977	320,027
14	12,002	12,003	40,000	40,004	54,979	320,025
15	12,003	12,003	40,005	40,001	54,978	320,027
16	12,004	12,001	40,000	39,998	54,976	320,027
17	12,000	12,000	40,000	40,002	54,978	320,025
18	12,002	12,002	40,004	40,005	54,978	320,026
19	12,000	12,000	39,998	40,004	54,979	320,026
20	12,003	12,004	40,000	40,004	54,979	320,026

5.3 Průběh měření u přístroje Wenzel LH 65 – X3M Premium

Před začátkem samotného měření proběhlo temperování součásti na teplotu $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$. Pro měření na souřadnicovém měřicím stroji je nutné si správně zarovnat součást v programu. K tomu, aby se usnadnilo měření byl vytvořen 3D model součásti z měření přístroje ATOS Triple Scan. Následné měření bylo provedeno panem Ing. Ondřejem Mizerou.

5.3.1 Kalibrace snímacího systému

Dále bylo nutno kalibrovat snímací systém. K měřicí hlavě CMM se upnula skenující sonda od společnosti Renishaw model SP25M a dále byl zvolen modul SM 25-1. K němu se připevnil dotyk s označením 1001 s průměrem rubínové kuličky $D = 2\text{ mm}$ a délkou $L = 35\text{ mm}$. Tato sestava je na obrázku 5.10.



Obrázek 5.10 - Měřicí sestava pro CMM

Takto složena měřící sestava byla kalibrována na kalibrační kouli o průměru 24,9990 mm, viz obrázek 5.11. Výsledkem dané kalibrace byl rozptyl hodnot v rozmezí 0,002 mm.



Obrázek 5.11 - Kalibrační koule ²⁶

5.3.2 Vyrovnání

Dalším bodem bylo sjednocení souřadnicových systémů modelu (v programu pro měření) se souřadnicovým systémem stroje.

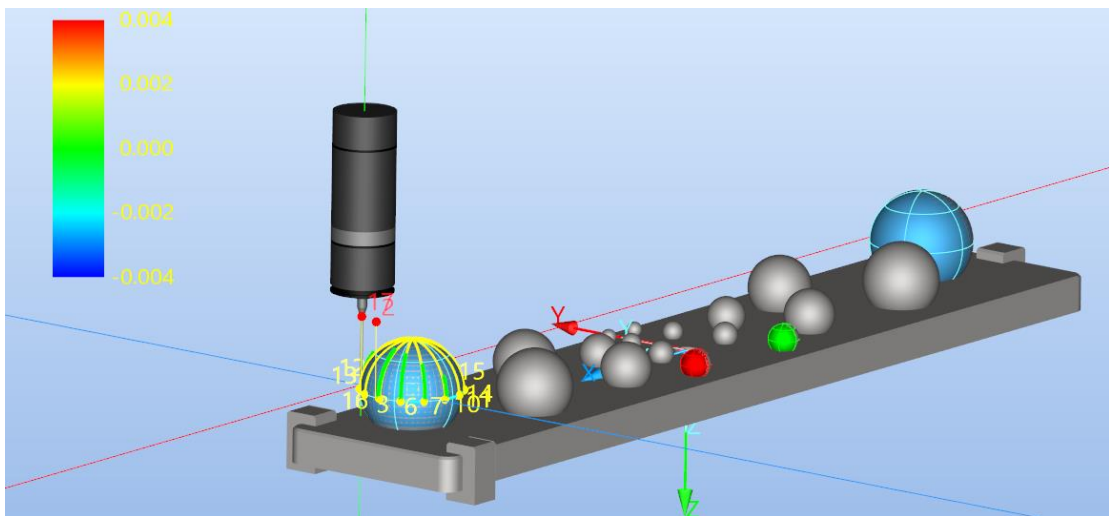
Pro ustavení součásti se použila stavebnice pro fixaci od společnosti Renishaw. Obrázek ustavené součásti na stole stroje je na obrázku 5.12.



Obrázek 5.12 - Ustavená součást na stole měřícího přístroje

5.3.3 Průběh měření

Před měřením došlo k zbavení veškerých nečistot z povrchu měřených sfér. Tím se minimalizovaly nežádoucí nepřesnosti. Nejprve došlo k měření velkých sfér a poté malých. Důležité bylo si stanovit metodu pro měření. U měření se zvolila skenující metoda, kde strategií měření daného elementu byly zvolené dráhy s pravidelným uspořádáním. V programu pro měření byla použita stejná metodika, jak u malých, tak i u velkých sfér. Pro měření jedné sféry bylo zvoleno 16 drah měření. Na obrázku 5.13 je vidět nepolohované těleso v programu pro CMM s paprskovými dráhami měřícího doteku na sféře.



Obrázek 5.13 - Nepolohované těleso v programu pro CMM

5.3.4 Naměřené hodnoty

Naměřená data byla poté zapsána do programu Microsoft Excel, kde se s nimi dále pracovalo. Jednotlivé výsledky měření jsou v tabulce 9.

Tabulka 9 - Naměřená data z přístroje LH65 - X3M Premium

Měření Wenzel LH 65 – X3M Premium						
n	Rozměr sféry 1 [mm]	Rozměr sféry 2 [mm]	Rozměr sféry 3 [mm]	Rozměr sféry 4 [mm]	Absolutní vzdálenost mezi sférami 1 a 2 [mm]	Absolutní vzdálenost mezi sférami 3 a 4 [mm]
1	11,997	11,997	39,995	39,994	54,980	320,032
2	11,997	11,996	39,995	39,993	54,980	320,033
3	11,997	11,997	39,995	39,993	54,980	320,034
4	11,997	11,996	39,995	39,993	54,980	320,034
5	11,998	11,996	39,995	39,993	54,981	320,034
6	11,997	11,996	39,995	39,993	54,980	320,034
7	11,997	11,996	39,995	39,993	54,980	320,034
8	11,997	11,996	39,995	39,993	54,980	320,034
9	11,997	11,997	39,995	39,993	54,980	320,033
10	11,997	11,996	39,995	39,993	54,980	320,033
11	11,997	11,996	39,995	39,993	54,981	320,033
12	11,997	11,996	39,995	39,993	54,981	320,033
13	11,997	11,996	39,995	39,993	54,981	320,033
14	11,997	11,996	39,995	39,993	54,981	320,033
15	11,997	11,996	39,995	39,993	54,980	320,033
16	11,997	11,996	39,995	39,993	54,980	320,033
17	11,997	11,996	39,995	39,993	54,980	320,033
18	11,997	11,996	39,995	39,993	54,980	320,033
19	11,997	11,996	39,995	39,993	54,980	320,033
20	11,997	11,996	39,995	39,993	54,980	320,033

5.4 Statické zpracování naměřených hodnot

V této kapitole je uveden příklad výpočtu u měření ATOS Triple Scan (MV 320). Výpočet bude demonstrován na naměřené sféře 1. Ostatní hodnoty z tohoto druhu měření jsou uvedeny v tabulce pod příslušným výpočtem.

- **Výběrový průměr**

$$\bar{x}_{m12s1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{20} x_i \quad (5.1)$$

$$\bar{x}_{m12s1} = \frac{1}{20} \cdot (12,0017 + \dots + 12,0030)$$

$$\bar{x}_{m12s1} = 12,0033 \text{ mm}$$

Tabulka 10 Výběrový průměr pro jednotlivá měření

Výběrový průměr						
	Sféra 1 [mm]	Sféra 2 [mm]	Sféra 3 [mm]	Sféra 4 [mm]	Abs. vzdálenost mezi 1 a 2 [mm]	Abs. vzdálenost mezi 3 a 4 [mm]
MV 170	12,010	12,0095	40,0076	40,0028	54,9825	320,0394
MV 320	12,0033	12,0015	40,0014	40,0025	54,9776	320,0266
CMM	11,9971	11,9962	39,9950	39,9931	54,9803	320,0332

- **Rozpětí naměřených hodnot**

$$Roz. = Max. - Min. \quad (5.2)$$

Kde: Max. je maximální hodnota ze souboru

Min. je minimální hodnota ze souboru

$$Roz_{\cdot m12s1} = 12,0064 - 12,000$$

$$Roz_{\cdot m12s1} = 0,0064 \text{ mm}$$

Tabulka 11 Rozpětí hodnot pro jednotlivá měření

Rozpětí naměřených hodnot						
	Sféra 1 [mm]	Sféra 2 [mm]	Sféra 3 [mm]	Sféra 4 [mm]	Abs. vzdálenost mezi 1 a 2 [mm]	Abs. vzdálenost mezi 3 a 4 [mm]
MV 170	0,004	0,003	0,003	0,004	0,002	0,006
MV 320	0,006	0,007	0,008	0,008	0,003	0,004
CMM	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,002

- **Výběrová směrodatná odchylka**

$$s(x_{m12s1}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{20}(x_i - \bar{x}_{m12s1})^2}{n-1}} \quad (5.3)$$

$$s(x_{m12s1}) = \sqrt{\frac{0,0000496690}{19}}$$

$$s(x_{m12s1}) = 0,001617 \text{ mm}$$

Tabulka 12 Výběrová směrodatná odchylka pro jednotlivá měření

Výběrová směrodatná odchylka						
	Sféra 1 [mm]	Sféra 2 [mm]	Sféra 3 [mm]	Sféra 4 [mm]	Abs. vzdálenost mezi 1 a 2 [mm]	Abs. vzdálenost mezi 3 a 4 [mm]
MV 170	0,0011	0,0009	0,0008	0,0011	0,0007	0,0016
MV 320	0,0017	0,0021	0,0020	0,0020	0,0009	0,0010
CMM	0,0002	0,0004	0,000	0,0002	0,0004	0,0061

- **Hrubá chyba H_n**

$$H_n = \frac{x_n - \bar{x}_{m12s1}}{s(x_{m12s1})} \quad (5.4)$$

$$H_n = \frac{12,0017 - 12,0031}{0,001618}$$

$$H_n = -0,8652$$

- **Standartní nejistota typu A**

$$u_{Am12s1} = s(\bar{x}_{m12s1}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{20}(x_i - \bar{x}_{m12s1})^2}{n(n-1)}} \quad (5.5)$$

$$u_{Am12s1} = \sqrt{\frac{(12,0017 - 12,0031)^2 + \dots + (12,0030 - 12,0031)^2}{20 \cdot (20 - 1)}}$$

$$u_{Am12s1} = \sqrt{\frac{0,0000497700}{380}}$$

$$u_{Am12s1} = s(\bar{x}_{m12s1}) = 0,00036 \text{ mm}$$

Tabulka 13 Standartní nejistota typu A pro jednotlivá měření

Standartní nejistota typu A						
	Sféra 1 [mm]	Sféra 2 [mm]	Sféra 3 [mm]	Sféra 4 [mm]	Abs. vzdálenost mezi 1 a 2 [mm]	Abs. vzdálenost mezi 3 a 4 [mm]
MV 170	0,00025	0,00021	0,00018	0,00024	0,00017	0,00035
MV 320	0,00036	0,00045	0,00043	0,00041	0,00018	0,00018
CMM	0,00005	0,00008	0,00000	0,00000	0,0001	0,00137

- **Určení nejistoty MPEe pro přístroj Wenzel**

$$MPEe = 1,6 + \left(\frac{L}{350}\right) \quad (5.6)$$

$$MPEe = 1,6 + \left(\frac{12}{350}\right)$$

$$MPEe = 1,63 \mu m$$

Tento druh vypočtené nejistoty se považuje za výslednou nejistotu u daného přístroje Wenzel LH 65 – X3M Premium.

Tabulka 14 Nejistota pro přístroj Wenzel

Určení nejistoty MPEe			
Sféra - 12 mm	Sféra - 40 mm	Vzdálenost sfér na desce - 50 mm	Vzdálenost sfér na desce - 320 mm
0,0005 mm	0,0019 mm	0,00092 mm	0,0055 mm

- **Kombinovaná nejistota**

$$u_{c1m12s1} = \sqrt{s(x_{m12s1})^2 + u_{Am12s1}^2} \quad (5.7)$$

$$u_{c1m12s1} = \sqrt{0,00161^2 + 0,00036^2}$$

$$u_{c1m12s1} = 0,0018 \text{ mm}$$

Tabulka 15 Kombinovaná nejistota pro jednotlivá měření

Kombinovaná nejistota						
	Sféra 1 [mm]	Sféra 2 [mm]	Sféra 3 [mm]	Sféra 4 [mm]	Abs. vzdálenost mezi 1 a 2 [mm]	Abs. vzdálenost mezi 3 a 4 [mm]
MV 170	0,0012	0,0010	0,0008	0,0011	0,0008	0,0016
MV 320	0,0017	0,0021	0,0020	0,0021	0,0009	0,0010

- **Rozšířená nejistota**

Pro rozšířenou nejistotu jsem zvolil koeficient $k_U = 2$ při pravděpodobnosti $p = 95 \%$.

$$U = k_U \cdot u_c \quad (5.8)$$

$$U = 2 \cdot 0,0017$$

$$U = 0,0034 \text{ mm}$$

Tabulka 16 Rozšířená nejistota pro jednotlivá měření

Rozšířená nejistota						
	Sféra 1 [mm]	Sféra 2 [mm]	Sféra 3 [mm]	Sféra 4 [mm]	Abs. vzdálenost mezi 1 a 2 [mm]	Abs. vzdálenost mezi 3 a 4 [mm]
MV 170	0,0023	0,0019	0,0017	0,0022	0,0015	0,0032
MV 320	0,0034	0,0042	0,0040	0,0042	0,0018	0,0021

Z důvodu ověření vypočtené rozšířené nejistoty u přístroje ATOS, byly hodnoty porovnány s limitními hodnotami v ověřovacích protokolech. Po porovnání s limitními hodnotami z protokolů, bylo stanoveno, že výsledné hodnoty nejistot pro ATOS budou brány z limitních hodnot uvedených v protokolu, a to z důvodu značného rozdílu mezi hodnotami vzdáleností středů sfér.

Limitní hodnoty přístroje						
	Sféra 1 [mm]	Sféra 2 [mm]	Sféra 3 [mm]	Sféra 4 [mm]	Abs. vzdálenost mezi 1 a 2 [mm]	Abs. vzdálenost mezi 3 a 4 [mm]
MV 170	0,003	0,003	0,003	0,003	0,008	0,008
MV 320	0,0034	0,0042	0,0040	0,0042	0,0018	0,016

- **Teplotní chyba**

Z důvodu rozdílných měřících teplo pro dané metody je nutné určit teplotní chybu měření. Jako referenční teplota T byla zvolena teplota laboratoře na VŠB a ta činila 20°C . Teplota v laboratoři T_0 Honeywell byla $24,5^\circ\text{C}$. Teplotní roztažnost materiálu byla pro sféry $10,50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a pro desku $4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Vzorový výpočet je pro sféru průměru 40 mm.

$$\varepsilon_{STv40} = \alpha \cdot L \cdot (T - T_0) \quad (5.9)$$

$$\varepsilon_{STv40} = 10,50 \cdot 10^{-6} \cdot 40 \cdot (20 - 24,5)$$

$$\varepsilon_{STv40} = 0,0018 \text{ mm}$$

Tabulka 17 Teplotní chyby pro jednotlivé rozměry

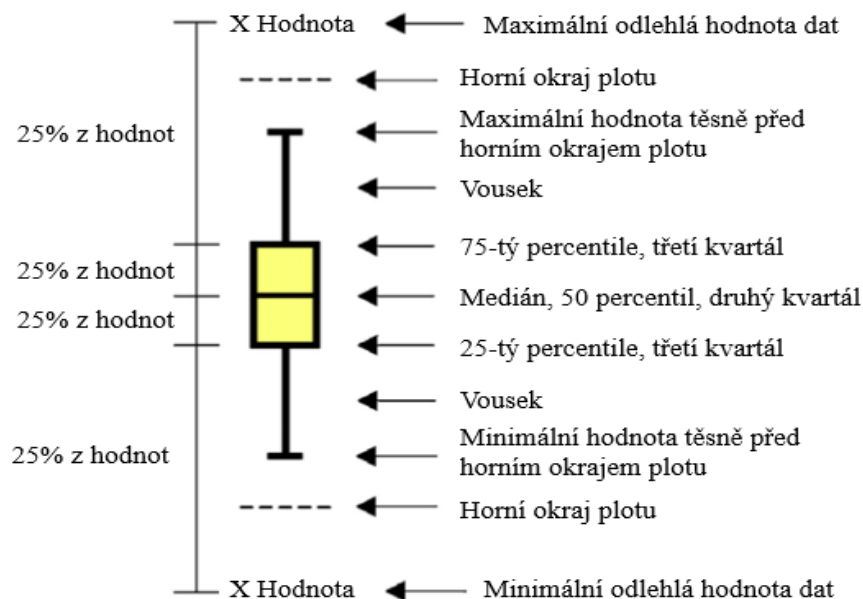
Teplotní chyba pro jednotlivé rozměry			
Sféra - 12 [mm]	Sféra - 40 [mm]	Vzdálenost sfér na desce - 50 [mm]	Vzdálenost sfér na desce - 320 [mm]
0,0005	0,0019	0,00092	0,0055

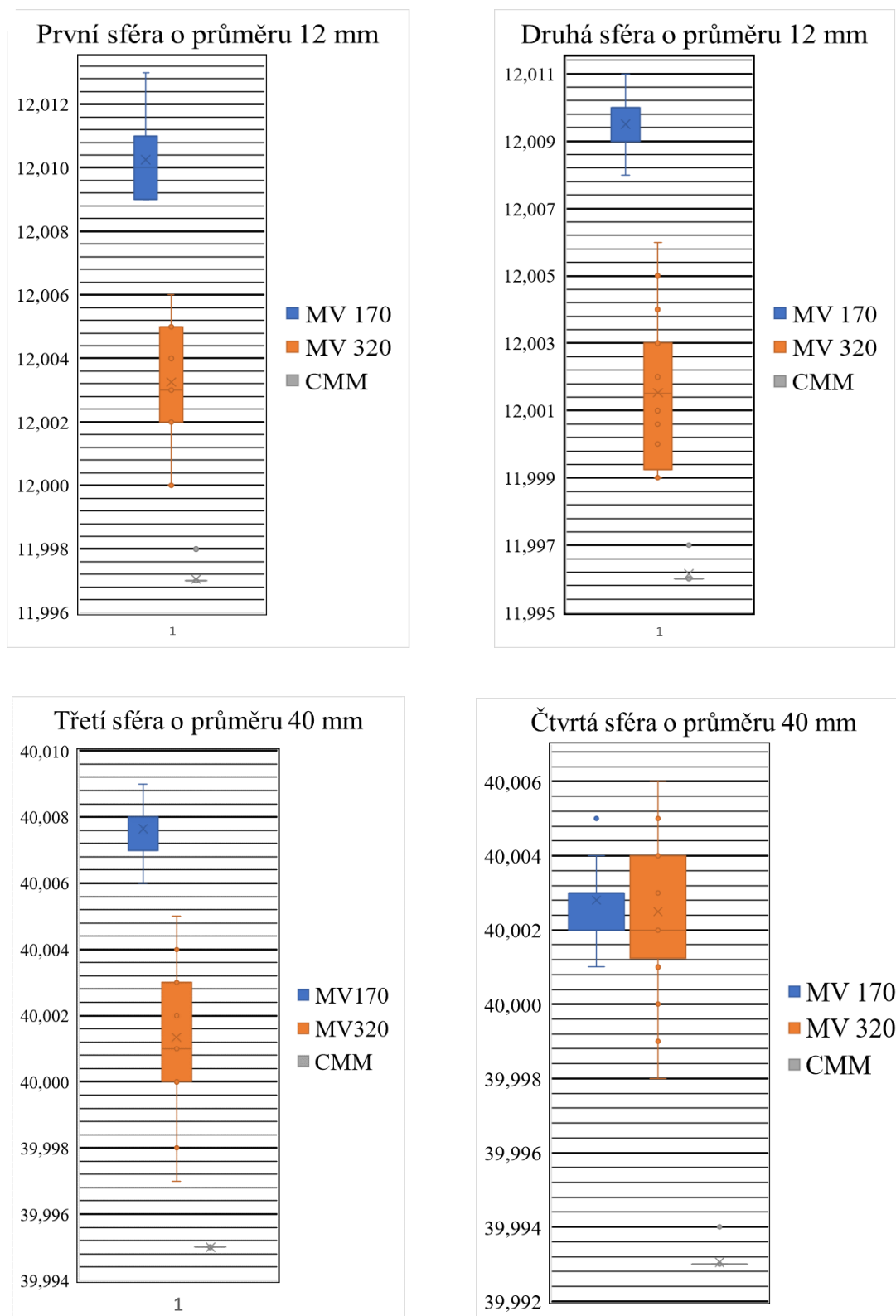
Tabulka 18 Výsledky měření

Výsledky měření		
	Sféra 1 [mm]	Sféra 2 [mm]
MV 170	12,010 ± 0,002	12,010 ± 0,002
MV 320	12,003 ± 0,003	12,002 ± 0,003
CMM	11,9971 ± 0,0008	11,9962 ± 0,0008
	Sféra 3 [mm]	Sféra 4 [mm]
MV 170	40,008 ± 0,002	40,003 ± 0,002
MV 320	40,001 ± 0,003	40,003 ± 0,003
CMM	39,993 ± 0,0009	39,993 ± 0,0009
	Vzdálenost mezi sférou 1 a 2 [mm]	Vzdálenost mezi sférou 3 a 4 [mm]
MV 170	54,983 ± 0,004	320,039 ± 0,004
MV 320	54,978 ± 0,008	320,027 ± 0,008
CMM	54,980 ± 0,0009	320,033 ± 0,001

5.5 Grafické znázornění výsledků

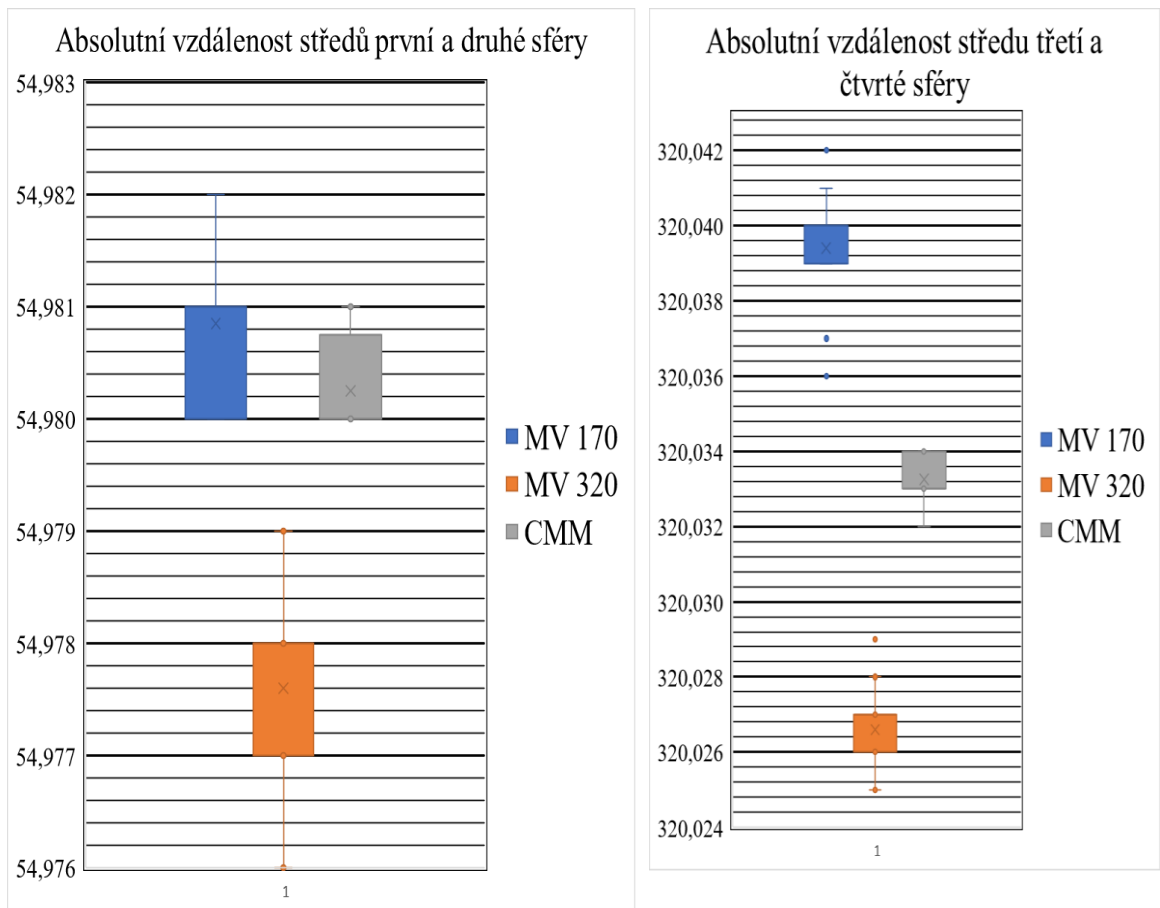
Výsledky byly graficky zpracovány pomocí krabicových grafů. Tento typ grafů patří k statistické analýze hodnot, která má snahu kopírovat Gaussovo rozložení hodnot. Základní popis krabicového grafu je na obrázku 5.14.

Obrázek 5.14 - Popis krabicového grafu ⁹



Obrázek 5.15 - Krabicové grafy průměrů sfér

Z grafů pro jednotlivé průměry sfér na obrázku 5.15 je patrné, že stálost měřených hodnot je jednoznačně lepší u přístroje Wenzel LH 65 – X3M Premium, kde se hodnota stabilně pohybuje s malým rozpětím hodnot. U sfér 1 až 3 si lze všimnout větších rozdílů hodnot, které mohlo být způsobeno tím, že při měření MV 170 musel být znovu proveden nástřik matricího prášku, z důvodů nechtěných dotyků okolních pracovníků po měření MV 320.



Obrázek 5.16 - Krabicové grafy absolutních vzdáleností sfér

Z grafického znázornění absolutních vzdáleností sfér si lze všimnout, že naměřené hodnoty vzdáleností první a druhé sféry při měření MV 170 se daly srovnat s výsledky z přístroje Wenzel LH 65 – X3M Premium. U absolutní vzdálenosti středů třetí a čtvrté sféry se výsledky nepatrně liší.

6 Diskuze a závěr

Z experimentálního měření a jeho výsledků je zřejmé, že souřadnicový měřicí přístroj Wenzel LH 65 – X3M Premium, který měřil skenovací sondou, má stálejší výstupní hodnoty, než přístroj ATOS Triple Scan 16M, který využívá metodu proužkové projekce. Ověření správnosti naměřených výsledků u přístroje ATOS lze provést díky akceptačnímu protokolu od výrobce přístroje, který je v přílohách práce B a C pro objemy MV 170 a MV 320. Tento protokol vychází z normy pro VDI/VDE 2634, kde se stanovuje nejistota za zpřísněných podmínek.

Experimentálně zjištěná rozšířená nejistota měření průměrů sfér se pohybovala pro MV 170 v rozmezí od 0,0017 do 0,0023 mm a pro MV 320 v rozmezí od 0,0034 do 0,0042 mm. V akceptačním protokolu se tato nejistota měření značí Probing error, kde limitní hodnota pro měření MV 170 je 0,006 mm a pro měření MV 320 má hodnotu 0,011 mm. Dle tohoto poznatku lze s určenými hodnotami zacházet jako s platnými. Další nejistotou měření, kterou je potřeba si ověřit, je vzdálenost mezi jednotlivými středy sfér. Ta se v protokolu označuje jako Sphere spacing a pro měření MV 320 má limitní hodnotu 0,016 mm a pro MV 170 má 0,008 mm. Z vypočítaných rozšířených nejistot pro MV 320 0,0018 mm a 0,0021 mm a pro MV 170 0,0015 mm a 0,0032 mm lze tvrdit, že nejistota měření byla v rozmezí limitních hodnot pro daný měřicí přístroj.

Například pro průměr sféry 4 vychází po dosazení potřebných hodnot jednotlivé druhy měření takto:

- $MV\ 170 = 40,003 \pm 0,002\ mm,$
- $MV\ 320 = 40,003 \pm 0,003\ mm,$
- $CMM = 39,993 \pm 0,001\ mm.$

Všechny průměry sfér u přístroje Atos jsou navýšeny o určitý rozměr. Toto navýšení může být způsobeno jak nástřikem prášku, tak i rozdílem měřících teplot pro jednotlivá měření. Na základě práce Filipa Dokoupila lze předpokládat, že tloušťka titanového nástřiku je $0,006\ mm \pm 0,003\ mm$. Z výpočtu teplotní chyby, která je $\varepsilon_{STV12} = 0,0005\ mm$ a $\varepsilon_{STV40} = 0,0019\ mm$ se výběrový průměr daných měření liší v jednotkách tisícín milimetrů. Přesněji u sféry 1, 2 a 3 se jednotlivé výsledky liší o 0,007 mm, a to především z odlišného nánosu matnicího prášku. U sféry 4 se liší pouze o 0,002 mm. Z těchto rozdílů výběrových průměrů je patrné, že matnicí prášek má převládající vliv na výsledky měření u metody měření proužkovou projekcí.

Toto tvrzení potvrzuje i měření absolutních vzdáleností poloh sfér, kde výsledky pro vzdálenosti mezi sférami 3 a 4 byly:

- $MV\ 170 = 320,039 \pm 0,004\ mm$,
- $MV\ 320 = 320,027 \pm 0,008\ mm$,
- $CMM = 320,033 \pm 0,001\ mm$.

U tohoto typu výsledků by se nemělo uvažovat s nánosem prášku, a to z důvodu jeho rovnoměrného nánosu po celé ploše sféry, které nezpůsobuje rozdílnou vzdálenost středů poloh sfér. U měření proužkovou projekcí je tak od výsledku potřeba odečíst teplotní chybu, která byla 0,0055 mm. Poté výběrový průměr u MV 170 je 320,0339 mm a u MV 320 je 320,0211 mm, tudíž lze srovnávat pouze metody MV 170 a CMM. U těchto měření je výsledek stejný na tisíce milimetrů.

Důležité je zhodnotit rozsah využitelnosti daných strojů. Ve strojírenství je většinou předepisovaná tolerance v řádu setin milimetrů, zřídka je vyžadovaná přesnější tolerance na dílcích. Z tohoto předpokladu, lze vyvodit závěr, že přístroj ATOS Triple Scan 16M je vhodný pro měření, kde je předepisovaná tolerance do 0,01 mm, a to především z důvodu nánosu matricího prášku, který dle měření může výsledek negativně ovlivnit. Za předpokladu, že by probíhalo měření na součástech, které by nebyly lesklé, lze vycházet z limitních hodnot pro daný přístroj. U měření přesnějších hodnot by se mělo měřit výhradně CMM. K výhodě přístroje ATOS patří vytvoření virtuálního 3D objektu z měřeného tělesa, které je možné si uchovat na disku. K němu se lze kdykoliv vracet a doměřovat potřebné rozměry. Další srovnávací aspekt je čas měření, kde u přístroje Atos se rychlost měření jednoho objektu pohybovala v řádu 6 až 10 minut. U souřadnicového měřicího přístroje je to obtížnější definovat, neboť je potřeba vytvořit měřicí program. Po vytvoření programu se čas skenování pohybuje kolem 2 až 3 minut, proto u hromadné výroby s menším počtem sledovaných znaků je časově výhodnější měřit právě CMM. Výhodou přístroje Atos je měření polohy velice malých otvorů v řádu milimetrů, kde CMM se svojí měřicí sondou obtížně dostane a při častém měření je pravděpodobnost poškození měřicího doteku. Mezi další výhody přístroje Atos je měření určitých geometrických tolerancí, jelikož zachytí informace o celém objektu (ploše). Z nichž lze vytvořit mapu limitních hodnot a posoudit danou veličinu.

Vzhledem k výše uvedenému zhodnocení a na základě výsledků měření, lze tvrdit, že skenování na souřadnicovém měřicím přístroji je přesnější než měření pomocí proužkové projekce na přístroji Atos. Avšak výsledky mezi měřeními jsou při zanedbání nánosu prášku srovnatelné téměř stejné.

Seznam použité literatury

- [1] BATLLE, J., E. MOUADDIB a J. SALVI. Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: a survey. *Pattern Recognition* [online]. 1998, **1998**(Volume 31, 7), 963-982 [cit. 2019-04-19]. ISSN 963-982. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(97\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(97)00074-5)
- [2] BELLOCCHIO, Francesco, N. Alberto BORGHESE, Stefano FERRARI a Vincenzo PIURI. *3D Surface Reconstruction: Multi-Scale Hierarchical Approaches*. New York: Springer, 2013. ISBN 978-1-4614-5631-5.
- [3] BOYER, K. L. a A. C. KAK. Color-Encoded Structured Light for Rapid Active Ranging. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [online]. 1987, **PAMI-9**(1), 14-28 [cit. 2019-04-19]. DOI: 10.1109/TPAMI.1987.4767869. ISSN 0162-8828. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4767869>
- [4] BRAJLIH, Tomaz, Tadej TASIC, Igor DRSTVENSEK, Bogdan VALENTAN, Miodrag HADZISTEVIC, Vojko POGACAR, Joze BALIC a Bojan ACKO. Possibilities of Using Three-Dimensional Optical Scanning in Complex Geometrical Inspection. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering* [online]. 2011, **57**(11), 826-833 [cit. 2019-04-19]. DOI: 10.5545/sv-jme.2010.152. ISSN 00392480. Dostupné z: <http://www.sv-jme.eu/article/possibilities-of-using-three-dimensional-optical-scanning-in-complex-geometrical-inspection/>
- [5] CASPI, D., N. KIRYATI a J. SHAMIR. Range imaging with adaptive color structured light. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [online]. 1998, **20**(5), 470-480 [cit. 2019-04-19]. DOI: 10.1109/34.682177. ISSN 01628828. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/682177/>
- [6] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [7] DOKOUPIL, Filip. *Stanovení odchylek měření 3D optického skeneru* [online]. Brno, 2013 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/23461>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce David Paloušek.
- [8] DURDLE, N.G., J. THAYYOOR a V.J. RASO. An improved structured light technique for surface reconstruction of the human trunk. *Conference Proceedings. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (Cat. No.98TH8341)* [online]. IEEE, 1998, , 874-877 [cit. 2019-04-19]. DOI: 10.1109/CCECE.1998.685637. ISBN 0-7803-4314-X. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/685637/>

- [9] FERREIRA, João Elias Vidueira, Maria Tayane Silva PINHEIRO, Wagner Roberto Santos DOS SANTOS a Rodrigo da Silva MAIA. Graphical representation of chemical periodicity of main elements through boxplot. *Educación Química* [online]. 2016, **27**(3), 209-216 [cit. 2019-04-19]. DOI: 10.1016/j.eq.2016.04.007. ISSN 0187893X. Dostupné z: <http://revistas.unam.mx/index.php/req/article/view/63848>
- [10] GENG, J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics* [online]. 2011, **3**(2), 128-160 [cit. 2019-04-19]. ISSN 1943-8206. Dostupné z: http://www.rtbasics.com/Downloads/IEEE_structured_light.pdf
- [11] GORTHI, Sai Siva a Pramod RASTOGI. Fringe projection techniques: Whither we are?. *Optics and Lasers in Engineering*. 2010, **2010**(Volume 48, 2.), 133-140. ISSN 0143-8166.
- [12] GRIFFIN, Paul M. a Soung R. YEE. The use of a uniquely encoded light pattern for range data acquisition. *Pattern Recognition* [online]. 1991, **21**(1-4), 359-363 [cit. 2019-04-19]. DOI: 10.1016/0360-8352(91)90117-O. ISSN 03608352. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0360835291901170>
- [13] GÜHRING, J. J. Dense 3-D surface acquisition by structured light using offthe-shelf components. *Videometrics and Optical Methods for 3D Shape* [online]. 2000, **4309**(8), 220-231 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://www.ifp.unistuttgart.de/publications/2001/videometrics01-guehring-4309-24.pdf>
- [14] HALL-HOLT, O. a S. RUSINKIEWICZ. Stripe boundary codes for real-time structured-light range scanning of moving objects. *Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001* [online]. IEEE Comput. Soc, 2001, , 359-366 [cit. 2019-04-19]. DOI: 10.1109/ICCV.2001.937648. ISBN 0-7695-1143-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/937648/>
- [15] HARTMANN, Wito a Johannes WEICKMANN. Model and simulation of fringe projection measurements as part of an assistance system for multi-component fringe projection sensors. *Optical Fabrication, Testing, and Metrology III*. 2008, 2008-9-19, **208**(7102), 71020N-. DOI: 10.1117/12.797600. Dostupné také z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.797600>
- [16] HOCKEN, Robert J. a Paulo H. PEREIRA. *Coordinate Measuring Machines and Systems*. Second. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. ISBN 978-1-4200-1753-3.
- [17] HORN, Eli a Nahum KIRYATI. Toward optimal structured light patterns1Based on "Toward optimal structured light patterns". *Image and Vision Computing* [online]. 1999, **1999**(Volume 17), 87-97 [cit. 2019-04-19]. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(98\)00113-9](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(98)00113-9). ISSN 0262-8856. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0262885698001139>

-
- [18] JÄHNE, Bernd a Horst HAUSSECKER. *Computer vision and applications: a guide for students and practitioners*. San Diego: Academic Press, c2000. Sammlung romanischer Übungstexte, 2. ISBN 978-0123797773.
- [19] JANÁKOVÁ, Iлона. Optické 3D měření.: www.uamt.feec.vutbr.cz [online]. Brno [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/POV/Lectures/12_Opticke_3D_mereni.pdf
- [20] JE, Changsoo, Sang Wook LEE a Rea-Hong PARK. COLOR-PHASE ANALYSIS FOR SINUSOIDAL STRUCTURED LIGHT IN RAPID RANGE IMAGING. *Asian Conference on Computer Vision* [online]. Korea, 2004, **6**(1), 270-275 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1509/1509.04115.pdf>
- [21] KOUTECKÝ, Tomáš. *Automatické generování pozic optického skeneru pro digitalizaci plechových dílů*. Brno, 2015. Dizertační práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Jan Brandejs.
- [22] LI ZHANG, B. CURLESS a S.M. SEITZ. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming. *Proceedings. First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission* [online]. IEEE Comput. Soc, 2002, , 24-36 [cit. 2019-04-19]. DOI: 10.1109/TDPVT.2002.1024035. ISBN 0-7695-1521-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1024035/>
- [23] LUHMANN, Thomas, Stuart ROBSON a Stephen KYLE. *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*. Dunbeath: Whittles, 2006. ISBN 1-870325-50-8.
- [24] MARUYAMA, M. a S. ABE. Range sensing by projecting multiple slits with random cuts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [online]. 1993, **15**(6), 647-651 [cit. 2019-04-19]. DOI: 10.1109/34.216735. ISSN 01628828. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/216735/>
- [25] MENDRICKY, Radomir. DETERMINATION OF MEASUREMENT ACCURACY OF OPTICAL 3D SCANNERS. *MM Science Journal* [online]. 2016, **2016**(06), 1565-1572 [cit. 2019-04-19]. DOI: 10.17973/MMSJ.2016_12_2016183. ISSN 18031269. Dostupné z: <http://www.mmscience.eu/december-2016.html#2016183>
- [26] MIZERA, Ondřej. *Vliv vybraných parametrů měření na odchylku kruhovitosti*. Ostrava, 2017. Diplomová práce. VŠB Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Lenka Čepová, Ph.D.
- [27] MOONS, Theo, Luc Van GOOL a Maarten VERGAUWEN. *3D Reconstruction from Multiple Images Part 1: Principles*. 1. Delf: now Publishers, 2010. ISBN 978-1-60198-284-1.

- [28] PAGES, Jordi a Joaquim SALVI. Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling. In: *Http://www1.cs.columbia.edu* [online]. Girona: Univerzitat de girona, 2010 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: http://www1.cs.columbia.edu/~allen/PHOTOPAPERS/structuredlight_salvi.ppt
- [29] PAGES, J. a J. SALVI. Coded light projection techniques for 3D reconstruction. *Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes* [online]. 2005, **2005**(Volume 4) [cit. 2019-04-19]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/bib-j3ea:2005801>. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1051/bib-j3ea:2005801>
- [30] POSDAMER, J.L a M.D ALTSCHULER. Surface measurement by space-encoded projected beam systems. *Computer Graphics and Image Processing* [online]. 1982, 1982, **1982**(Volume 18), 1-17 [cit. 2019-04-19]. DOI: [https://doi.org/10.1016/0146-664X\(82\)90096-X](https://doi.org/10.1016/0146-664X(82)90096-X). Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0146664X8290096X>
- [31] SALVI, Joaquim, Jordi PAGÈS a Joan BATLLE. Pattern codification strategies in structured light systems. *Pattern Recognition* [online]. 2004, **2004**(Volume 37, 4), 827-849 [cit. 2019-04-19]. ISSN 0031-3203. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2003.10.002>
- [32] SÁ, Medeiros, Esdras Soares MEDEIROS FILHO, Paulo Cezar CARVALHO a Luiz VELHO. Coded Structured Light for 3D-Photography: An Overview. *RITA* [online]. 2002, 2002, **2002**(4), 203-219 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: https://www.visgraf.impa.br/Data/RefBib/PS_PDF/rita-survey/survey.pdf
- [33] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1209-6.
- [34] VUKAŠINOVIC, Nikola, Tomáš KOLŠEK a Joze DUHOVNIK. Case Study – surface reconstruction from point clouds for prosthesis production. *Journal of Engineering Design*. 2008, **2007**(Volume 18), 475-488. DOI: 10.1080/09544820701403805.
- [35] 3d-metrology-coordinate-measuring-machines. *Wenzel-group* [online]. Riegelsberg: Wenzel-group, 2019 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.wenzel-group.com/en/product/category/3d-metrology-coordinate-measuring-machines/>
- [36] 3D-Coordinate Measuring Machine (CMM) LH 65. In: *Clients.webtailorgroup* [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: https://clients.webtailorgroup.com/clientData/wenzel/media/product-media/9/newlh65productbrochurepd_307257.pdf
- [37] GOM ATOS Triple Scan. In: *Capture3d* [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://www.capture3d.com/3d-metrology-solutions/3d-scanners/atos-triple-scan>
- [38] For 3D Analyses Without Compromise. *Gom* [online]. Braunschweig: GOM, 2019 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/aramis/aramis-3d-camera.html>

-
- [39] XC65DX (-LS) CROSS SCANNER. In: *Smart-solutions* [online]. Warszawa: Smart-solutions, 2018, 2018 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://smart-solutions.pl/pl/xc65dx--ls-cross-scanner/>
- [40] PENETRANT TESTING: Standard-Chek Medium Nr. 3 Entwickler Spray. In: *HELLING* [online]. Heidgraben: HELLING, 2010 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://www.helling-ndt.de/en/penetrant-testing/contrast-redwhite-penetrant-testing/standard-chek-penetrant-system/standard-chekdeveloper-no-3>
- [41] *3D Reconstruction from Multiple Images Part 1: Principles*. 2008. ISSN 1572-2740.
- [42] HP-C-VE Vision Sensor. In: *Hexagonmi* [online]. Hexagon, 2019, 2019 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/coordinate-measuring-machines/multisensor-and-optical-cmms/hpcve-vision-sensor>
- [43] Manuální snímací hlava. In: *Hexagonmi* [online]. Tokyo: Hexagonmi, 2018 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/-/media/Images/Hexagon/Hexagon%20MI/Products/CMMs/CMM%20Sensors/HH-MI-M.ashx?h=468&w=800&la=cs-CZ&hash=49B61FA5BA09041FACC564B8E8148716>
- [44] Material information Cyclododecan. *Hangleiter* [online]. 2005 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://www.hangleiter.com/>
- [45] PH20 5osý spínací dotykový systém. In: *Renishaw* [online]. 2019 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/ph20-5osy-spinaci-dotykovy-system--12487>
- [46] Měření sedel a vedení ventilů pomocí REVO. In: *Renishaw* [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/mereni-sedel-a-vedeni-ventilu-pomoci-revo--10864>
- [47] Oxititan: Antimicrobial coatings: ECOACTIVE SURFACES. In: *Dioxide coating* [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://www.oxititan.com/>
- [48] *ATOS Triple Scan: User manual - Hardware*. Germany, 2012.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval firmě Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o. a především panu Ing. Dušanu Slimaříkovi, Ph. D. za jeho poskytnuté informace, rady a nadšení pro zkoumání dané problematiky.

Dále bych rád poděkoval panu Ing. Ondřeji Mizerovi za ochotu, informace a zprostředkování naměřených dat na přístroji Wenzel, a také paní Ing. Lence Čepové, Ph.D. za cenné rady a pomoc při realizaci.

Na závěr bych rád poděkoval celé své rodině a přítelkyni, za podporu při studiu a trpělivost.

Seznam obrázků

Obrázek 2.1 - Rozdělení metod pro získání informací o trojrozměrném objektu ²	12
Obrázek 2.2 - Znázornění stereoskopických systémů ²	13
Obrázek 2.3 - Obecný vztah dvou optických senzorů ¹	15
Obrázek 2.4 - Proces získání informace pomocí strukturovaného ¹⁵	15
Obrázek 2.5 - 5-bitové kódování ²⁹	17
Obrázek 2.6 - Ukázka binárního kódování ³⁰	18
Obrázek 2.7 - Ukázka n-árního kódování ¹⁰	18
Obrázek 2.8 - Kombinace šedého kódu a fázového posuvu ¹³	19
Obrázek 2.9 - Ukázka hybridního kódování ¹⁴	19
Obrázek 2.10 - Neformální kódování ²³	21
Obrázek 2.11- De Bruijnova posloupnost ¹⁰	21
Obrázek 2.12 - Promítání De Bruijnových pruhů ²²	22
Obrázek 2.13 - Metodika vyhodnocení koncové měřky 30 mm ⁴	24
Obrázek 2.14 - Graf výsledných hodnot měření sféry ⁴	25
Obrázek 2.15 - Výsledek měření (ne)kalibrovaného přístroje ²⁵	26
Obrázek 2.16 - Výsledek vlivu nánosu ²⁵	26
Obrázek 2.17 - Klasické uspořádání CMM ⁶	28
Obrázek 2.18 - Typy konstrukcí CMM ⁶	29
Obrázek 2.19 - Základní rozlišení snímacích systémů ¹⁶	30
Obrázek 2.20 - Pevná hlava ⁶	31
Obrázek 2.21 – Manuální hlava ⁴³	31
Obrázek 2.22 - Motorická hlava ⁴⁵	31
Obrázek 2.23 - Základní prvky snímacího doteku ¹⁶	32
Obrázek 2.24 - Grafické znázornění skenování u CMM ⁴⁶	32
Obrázek 2.25 - Laserová měřící hlava ³⁹	33
Obrázek 2.26 - Kamerová měřící hlav ⁴²	33
Obrázek 3.1 - Gaussovo rozdělení ³³	37
Obrázek 4.1 - Produktová řada ATOS s ověřovací součástí ³⁸	40
Obrázek 4.2 - Princip odměřování skleněným pravítkem ¹⁶	42
Obrázek 4.3 - Princip odměřování odrazovým pravítkem ¹⁶	42
Obrázek 4.4 - Základná popis přístroje ATOS Triple Scan 16M ⁴⁸	44
Obrázek 5.1 - Měřené těleso.....	46
Obrázek 5.2 - Pozice skeneru při kalibraci.....	47
Obrázek 5.3 - Měřené součásti s přípravkem pro nástřik sfér.....	48

Obrázek 5.4 - Provádění nástřiku matricího prášku	49
Obrázek 5.5 - Výsledné mračno bodů po dokončení cyklů skenování	50
Obrázek 5.6 - Parametry tvorby sítě.....	51
Obrázek 5.7 Ukázka mračna bodů a polygonizované sítě na stejné ploše	51
Obrázek 5.8 - Funkce "Fitting sphere"	52
Obrázek 5.9 – Ukázka naměřených data v programu GOM Inspect 2018	52
Obrázek 5.10 - Měřicí sestava pro CMM.....	55
Obrázek 5.11 - Kalibrační koule ²⁶	56
Obrázek 5.12 - Ustavená součást na stole měřicího přístroje	56
Obrázek 5.13 - Nepolohované těleso v programu pro CMM.....	57
Obrázek 5.14 - Popis krabicového grafu ⁹	63
Obrázek 5.15 - Krabicové grafy průměrů sfér	64
Obrázek 5.16 - Krabicové grafy absolutních vzdáleností sfér	65

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Rozdělení vzorů pro strukturované světlo ³¹	16
Tabulka 2 Výsledků měření od autorů ²⁵	27
Tabulka 3 - Technické parametry přístroj Wenzel LH 65 - X3M Premium ³⁶	41
Tabulka 4 - Parametry měřících objemů přístroje ⁴⁸	43
Tabulka 5 - Údaje z kalibračního protokolu pro MV320.....	47
Tabulka 6 - Nastavené hodnoty přístroje ATOS	49
Tabulka 7 – Naměřené hodnoty pro objem MV 170	53
Tabulka 8 - Naměřených hodnot pro objem MV 320	54
Tabulka 9 - Naměřená data z přístroje LH65 - X3M Premium	58
Tabulka 10 Výběrový průměr pro jednotlivá měření.....	59
Tabulka 11 Rozpětí hodnot pro jednotlivá měření.....	59
Tabulka 12 Výběrová směrodatná odchylka pro jednotlivá měření	60
Tabulka 13 Standartní nejistota typu A pro jednotlivá měření	61
Tabulka 14 Nejistota pro přístroj Wenzel	61
Tabulka 15 Kombinovaná nejistota pro jednotlivá měření	61
Tabulka 16 Rozšířená nejistota pro jednotlivá měření.....	62
Tabulka 17 Teplotní chyby pro jednotlivé rozměry.....	63
Tabulka 18 Výsledky měření	63

Seznam příloh

Příloha A - Mezní hodnoty H pro pravděpodobnost P	77
Příloha B - Ověřovací protokol MV 170	78
Příloha C - Ověřovací protokol MV 320	82

Příloha A - Mezní hodnoty H pro pravděpodobnost P

Rozsah výběru n	Mezní hodnoty h pro pravděpodobnost p			
	0,9	0,925	0,95	0,975
3	1,15	1,15	1,15	1,15
4	1,12	1,44	1,46	1,48
5	1,6	1,64	1,67	1,72
6	1,73	1,77	1,82	1,89
7	1,83	1,88	1,94	2,02
8	1,91	1,96	2,03	2,13
9	1,98	2,04	2,11	2,21
10	2,03	2,1	2,18	2,29
11	2,09	2,14	2,23	2,36
12	2,13	2,2	2,29	2,41
13	2,17	2,24	2,33	2,47
14	2,21	2,28	2,37	2,5
15	2,25	2,32	2,41	2,55
16	2,28	2,35	2,44	2,58
17	2,31	2,38	2,48	2,62
18	2,34	2,41	2,5	2,66
19	2,36	2,44	2,53	2,68
20	2,38	2,46	2,56	2,71
25	2,635	2,87	3,351	3,944
30	2,696	2,928	3,402	3,988
40	2,792	3,015	3,48	4,054
50	2,86	3,082	3,541	4,108
100	3,076	3,285	3,723	4,263

Příloha B - Ověřovací protokol MV 170**Acceptance/Reverification According to
VDI/VDE 2634, Part 3****General Data**

System: MV - 170
Measuring volume: MV170 (170x130x100) mm
Date: 11/9/2015
Inspector: Lukas Protivanek
Measuring temperature: 22.0 °C

Artifact**General**

Name:
Calibration date: 11/9/2015
Calibration ID:
Calibration temperature: 20.0 °C
Expansion coefficient for sphere spacing: $4.00 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Expansion coefficient for diameter: $10.50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Basic dimensions

Sphere spacing: 80 mm
Diameter left sphere: 15 mm
Diameter right sphere: 15 mm

Calibrated nominal dimensions

Sphere spacing: 80.0064 mm
Diameter left sphere: 14.9991 mm
Diameter right sphere: 15.0035 mm

Measurement Parameters**Measurement Settings**

Number of exposure times:	1
Min. fringe contrast:	15 gray values
State: avoid points at strong brightness differences?:	Yes
State: avoid Triple Scan points?:	No
State: avoid Triple Scan points at strong brightness differences?:	Yes
Max. residual:	0.20 pixel
Depth limitation mode:	Automatic depth limitation
Corner mask size:	0
Measurement resolution:	Full resolution

Settings of Checks

State: check "Sensor movement"?:	Enabled
Max. sensor movement:	0.10 pixel
State: check "Lighting change"?:	Enabled

Sensor Calibration**General**

Calibration date:	Mon Nov 09 14:52:42 2015
Measurement temperature:	22.5 °C

Calibration Object

Calibration object type:	Panel (Triple Scan)
Calibration object name:	CP40-170-41122
Test distances:	243.2653 / 243.2653 mm
Certification temperature:	22.0 °C
Expansion coefficient:	$3.25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Calibration Settings

Focal length (camera):	50.000 mm
Focal length (projector):	60.000 mm
Light intensity:	100%
Snap mode:	Double snap
Max. ellipse quality:	0.40 pixel

Calibration Result

Calibration deviation:	0.042 pixel (Quality check: Good)
Calibration deviation (optimized):	0.024 pixel
Projector calibration deviation:	0.108 pixel (Quality check: Good)
Projector calibration deviation (optimized):	0.023 pixel
Camera angle:	32.27 °
Height variance:	99.482 mm
Measuring volume:	182 x 127 x 109 mm

Acceptance/Reverification Test**General**

Number of test positions (measurement series): 3
 Nominal diameter of left sphere with temperature correction: 14.9994 mm
 Nominal diameter of right sphere with temperature correction: 15.0038 mm
 Nominal sphere spacing with temperature correction: 80.0070 mm

Parameter Probing Error Form, Left Sphere

Pos ²⁾	M ³⁾	P ⁴⁾	Min. deviation	Max. deviation	Range of deviation	Probing error form (sigma)
1	10	35157	-0.005 mm	0.005 mm	0.010 mm	0.001 mm
2	10	36415	-0.005 mm	0.005 mm	0.009 mm	0.001 mm
3	10	28873	-0.003 mm	0.003 mm	0.005 mm	0.001 mm

Parameter Probing Error Form, Right Sphere

Pos ²⁾	M ³⁾	P ⁴⁾	Min. deviation	Max. deviation	Range of deviation	Probing error form (sigma)
1	10	35003	-0.005 mm	0.005 mm	0.011 mm	0.001 mm
2	10	36217	-0.006 mm	0.006 mm	0.012 mm	0.001 mm
3	10	28472	-0.004 mm	0.004 mm	0.007 mm	0.001 mm

Parameter Probing Error Size, Left Sphere

Pos ²⁾	M ³⁾	P ⁴⁾	Diameter (actual)	Diameter (nominal) ¹⁾	Probing error (size)
1	10	35157	14.998 mm	14.999 mm	-0.001 mm
2	10	36415	14.999 mm	14.999 mm	-0.001 mm
3	10	28873	14.995 mm	14.999 mm	-0.005 mm

Parameter Probing Error Size, Right Sphere

Pos ²⁾	M ³⁾	P ⁴⁾	Diameter (actual)	Diameter (nominal) ¹⁾	Probing error (size)
1	10	35003	15.001 mm	15.004 mm	-0.003 mm
2	10	36217	15.001 mm	15.004 mm	-0.003 mm
3	10	28472	14.999 mm	15.004 mm	-0.005 mm

Sphere Spacing Error

Pos ²⁾	M ³⁾	Sphere spacing (actual)	Sphere spacing (nominal) ¹⁾	Sphere spacing error
1	10	80.007 mm	80.007 mm	0.000 mm
2	10	80.007 mm	80.007 mm	0.000 mm
3	10	80.007 mm	80.007 mm	0.000 mm

Parameter Length Measurement Error

Pos ²⁾	M ³⁾	Length (actual)	Length (nominal) ¹⁾	Length measurement error
1	10	95.006 mm	95.009 mm	-0.002 mm
2	10	95.003 mm	95.009 mm	-0.006 mm
3	10	95.004 mm	95.009 mm	-0.005 mm

¹⁾ With temperature correction

²⁾ Test position

³⁾ Number of measurements

⁴⁾ Number of points

Summary Acceptance/Reverification Test

Parameter	Maximum deviation	Limit
Probing error form (sigma)	0.001 mm	0.003 mm
Probing error (size)	-0.005 mm	0.006 mm
Sphere spacing error	0.000 mm	0.008 mm
Length measurement error	-0.006 mm	0.014 mm

Příloha C - Ověřovací protokol MV 320

**Acceptance/Reverification According to
VDI/VDE 2634, Part 3****General Data**

System: MV - 320
Measuring volume: MV320 (320x240x200) mm
Date: 11/9/2015
Inspector: Lukas Protivanek
Measuring temperature: 22.0 °C

Artifact**General**

Name:
Calibration date: 11/9/2015
Calibration ID:
Calibration temperature: 20.0 °C
Expansion coefficient for sphere spacing: $4.00 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Expansion coefficient for diameter: $10.50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Basic dimensions

Sphere spacing: 160 mm
Diameter left sphere: 25 mm
Diameter right sphere: 25 mm

Calibrated nominal dimensions

Sphere spacing: 159.9747 mm
Diameter left sphere: 25.0014 mm
Diameter right sphere: 25.0015 mm

Measurement Parameters**Measurement Settings**

Number of exposure times:	1
Min. fringe contrast:	15 gray values
State: avoid points at strong brightness differences?:	Yes
State: avoid Triple Scan points?:	No
State: avoid Triple Scan points at strong brightness differences?:	Yes
Max. residual:	0.20 pixel
Depth limitation mode:	Automatic depth limitation
Corner mask size:	0
Measurement resolution:	Full resolution

Settings of Checks

State: check "Sensor movement"?:	Enabled
Max. sensor movement:	0.10 pixel
State: check "Lighting change"?:	Enabled

Sensor Calibration**General**

Calibration date:	Wed Nov 04 11:11:03 2015
Measurement temperature:	22.5 °C

Calibration Object

Calibration object type:	Panel (Triple Scan)
Calibration object name:	CP40-320-52524
Test distances:	574.5623 / 574.4090 mm
Certification temperature:	20.0 °C
Expansion coefficient:	$22.67 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Calibration Settings

Focal length (camera):	50.000 mm
Focal length (projector):	50.000 mm
Light intensity:	100%
Snap mode:	Double snap
Max. ellipse quality:	0.40 pixel

Calibration Result

Calibration deviation:	0.029 pixel (Quality check: Good)
Calibration deviation (optimized):	0.017 pixel
Projector calibration deviation:	0.112 pixel (Quality check: Good)
Projector calibration deviation (optimized):	0.019 pixel
Camera angle:	27.07 °
Height variance:	202.377 mm
Measuring volume:	325 x 259 x 220 mm

Acceptance/Reverification Test**General**

Number of test positions (measurement series): 3
 Nominal diameter of left sphere with temperature correction: 25.0019 mm
 Nominal diameter of right sphere with temperature correction: 25.0020 mm
 Nominal sphere spacing with temperature correction: 159.9760 mm

Parameter Probing Error Form, Left Sphere

Pos ²⁾	M ³⁾	P ⁴⁾	Min. deviation	Max. deviation	Range of deviation	Probing error form (sigma)
1	10	35867	-0.004 mm	0.005 mm	0.009 mm	0.001 mm
2	10	32436	-0.004 mm	0.004 mm	0.009 mm	0.001 mm
3	10	33014	-0.004 mm	0.004 mm	0.008 mm	0.001 mm

Parameter Probing Error Form, Right Sphere

Pos ²⁾	M ³⁾	P ⁴⁾	Min. deviation	Max. deviation	Range of deviation	Probing error form (sigma)
1	10	35456	-0.004 mm	0.004 mm	0.008 mm	0.001 mm
2	10	31833	-0.004 mm	0.004 mm	0.009 mm	0.001 mm
3	10	32075	-0.005 mm	0.005 mm	0.009 mm	0.001 mm

Parameter Probing Error Size, Left Sphere

Pos ²⁾	M ³⁾	P ⁴⁾	Diameter (actual)	Diameter (nominal) ¹⁾	Probing error (size)
1	10	35867	25.001 mm	25.002 mm	-0.001 mm
2	10	32436	25.000 mm	25.002 mm	-0.002 mm
3	10	33014	24.999 mm	25.002 mm	-0.003 mm

Parameter Probing Error Size, Right Sphere

Pos ²⁾	M ³⁾	P ⁴⁾	Diameter (actual)	Diameter (nominal) ¹⁾	Probing error (size)
1	10	35456	25.002 mm	25.002 mm	-0.000 mm
2	10	31833	24.998 mm	25.002 mm	-0.004 mm
3	10	32075	25.000 mm	25.002 mm	-0.002 mm

Sphere Spacing Error

Pos ²⁾	M ³⁾	Sphere spacing (actual)	Sphere spacing (nominal) ¹⁾	Sphere spacing error
1	10	159.983 mm	159.976 mm	0.007 mm
2	10	159.982 mm	159.976 mm	0.006 mm
3	10	159.982 mm	159.976 mm	0.006 mm

Parameter Length Measurement Error

Pos ²⁾	M ³⁾	Length (actual)	Length (nominal) ¹⁾	Length measurement error
1	10	184.984 mm	184.978 mm	0.006 mm
2	10	184.978 mm	184.978 mm	-0.000 mm
3	10	184.977 mm	184.978 mm	-0.001 mm

¹⁾ With temperature correction

²⁾ Test position

³⁾ Number of measurements

⁴⁾ Number of points

Summary Acceptance/Reverification Test

Parameter	Maximum deviation	Limit
Probing error form (sigma)	0.001 mm	0.005 mm
Probing error (size)	-0.004 mm	0.011 mm
Sphere spacing error	0.007 mm	0.016 mm
Length measurement error	0.006 mm	0.027 mm