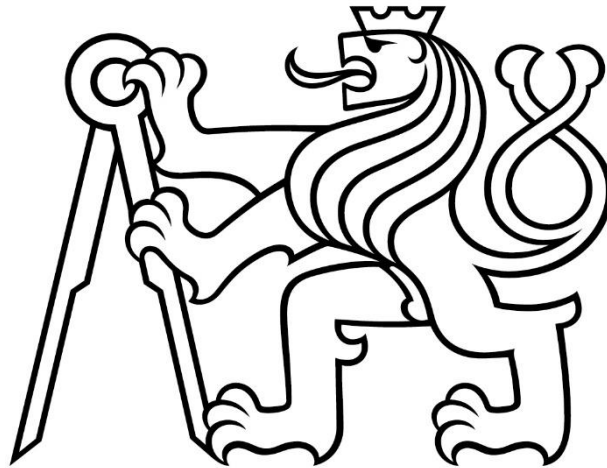


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNIKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA STROJNÍ**  
**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE**



**Porovnání metrologických možností souřadnicových měřicích strojů**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

2020

Autor práce: Petra Šrejmová

Vedoucí práce: Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šrejmová** Jméno: **Petra** Osobní číslo: **473618**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Porovnání metrologických možností souřadnicových měřicích strojů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Comparison of coordinate measuring machines metrological possibilities**

Pokyny pro vypracování:

1. Princip souřadnicového měření se zaměřením na souřadnicové měřicí stroje
2. Porovnání dotykového a optického snímání.
3. Návrh experimentu měření
4. Měření a zhodnocení experimentu

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

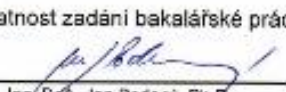
**Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

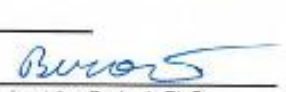
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

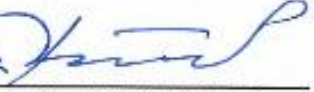
Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) katedry

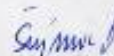
  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

23.6.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studentky

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji práci vypracovala samostatně, že jsem uvedla řádně a ocitovala všechny zdroje a literaturu, ze které jsem čerpala informace.

V Praze dne .....

.....

Petra Šrejmová

## Poděkování

Ráda bych poděkovala zaměstnanci firmy Continental, Ing. Miroslavu Jakubovi, který mi pomáhal s měřeními během omezeného přístupu do firmy.

Další poděkování patří vedoucímu mé práce Ing. BcA. Janu Podanému, Ph. D., který mi pomohl dokončit mou práci.

## **Abstrakt**

V této práci budu porovnávat souřadnicové měřicí stroje s optickým a dotykovým senzorem. Nejprve se zaměřím na princip souřadnicového měření a druhy konstrukcí souřadnicových strojů. Dále jednotlivě popíši druhy optických a dotykových senzorů, z čeho se skládají a jejich princip měření.

V další části porovnáám hodnoty získané měřeními na popsaných souřadnicových strojích. Bude se jednat o dva druhy získaných hodnot již zmíněných senzorů. Závěrem zhodnotím, které měření je vhodnější a proč.

## **Klíčová slova**

Souřadnicový měřicí stroj, optické senzory, dotykové senzory

## **Abstract**

In this thesis I will compare coordinate measuring machines with optical and tactile sensor. First, I will focus on the principle of coordinate measuring and types of constructions of coordinate machines. I will also describe individually the types of optical and touch sensors, what they consist of and their measurement principle.

In the next part I will compare the values obtained by measurement on the described coordinate machines. These will be two types of acquired values of the already mentioned sensors. Finally, I evaluate which measurement is more appropriate and why.

## **Key words**

Coordinate Measuring Machine, tactile sensors, touch sensors

# Obsah

1	Seznam použitých zkratk	8
2	Seznam obrázků	9
3	Seznam tabulek	10
4	Úvod	11
5	Popis závodu Continental AG	12
5.1	Historie	12
5.2	Současnost	13
6	Souřadnicové měřicí stroje	14
6.1	Princip	14
6.2	Konstrukce	16
6.3	Typy konstrukcí	17
6.3.1	Stojanový (sloupový) typ	17
6.3.2	Mostový typ	17
6.3.3	Výložníkový typ	17
6.3.4	Portálový typ	17
7	Senzory	19
7.1	Optické senzory	21
7.1.1	Senzory se zpracováním obrazu	22
7.1.2	Senzory s autofokusem	23
7.1.3	Laserové triangulační senzory	24
7.1.4	Chromatické zaměřovací systémy	25
7.1.5	Interferometrické bodové senzory	26
7.1.6	Konfokální plošné senzory	27
7.1.7	Senzory povrchu s proužkovou projekcí	28
7.2	Dotykové senzory	29
7.2.1	Materiál kuličky	30
7.2.2	Materiál dřívku měřicího dotyku	31
7.2.3	Typy dotyků	31
7.2.4	Spínací dotykové senzory	32
7.2.5	Měřicí dotykové senzory	34
7.2.6	Dotykově-optický senzor pro kontury	35
8	Popis měřicího stroje	36
8.1	Werth ScopeCheck® FB 3D CNC	36
8.1.1	Technické parametry	36
8.1.2	Detailní popis	38

8.1.3	Senzorová hlava/Skenovací sonda SP25 .....	40
8.1.4	Balík programů pro kontaktní skenování .....	40
8.1.5	Balík programů pro optické skenování.....	41
8.1.6	3D-Patch .....	41
8.2	Zeiss Contura .....	41
8.2.1	Specifikace senzorů .....	42
9	Návrh experimentu .....	45
10	Zpracování experimentu .....	46
10.1	Naměřené hodnoty optickým senzorem na stroji Werth ScopeCheck® FB 3D CNC.....	46
10.2	Naměřené hodnoty dotykovým senzorem na stroji Zeiss Contura.....	48
11	Závěr.....	50
12	Literatura.....	51
13	Seznam příloh.....	52

# 1 Seznam použitých zkratek

SMS	Souřadnicový měřicí stroj
1D	Jednorozměrný
2D	Dvourozměrný
3D	Trojrozměrný
SLD	Super luminiscentní dioda
WIP	Werth Interferometer Probe
CAD	Počítačová podpora konstruování
MPE	Největší povolená chyba
CNC	Počítačem řízený stroj
RAM	Operační paměť
CAM	Počítačem podporovaná výroba
CCD	Snímač s vázanými náboji
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
EN	Evropská norma
GPS	Systém určování polohy



## 2 Seznam obrázků

Obrázek 1: Logo společnosti .....	12
Obrázek 2: Místa působnosti společnosti Continental .....	13
Obrázek 3: Souřadnicový systém stroje a měřeného předmětu .....	15
Obrázek 4: Typy SMS podle konstrukce .....	16
Obrázek 5: Typy konstrukce SMS .....	18
Obrázek 6: Spínací (vlevo) a měřicí senzory (vpravo) srovnání.....	19
Obrázek 7: Měření bodů, přímek a ploch .....	19
Obrázek 8: Rozdělení senzorů podle fyzikálního principu .....	20
Obrázek 9: Proces bezdotykového měření .....	21
Obrázek 10: Rastrové skenování .....	23
Obrázek 11: Určení ostřicího bodu .....	24
Obrázek 12: Chromatický ostřicí senzor.....	25
Obrázek 13: Princip interferometrického bodového senzoru .....	26
Obrázek 14: Konfokální plošný senzor .....	27
Obrázek 15: Senzor s proužkovou projekcí .....	28
Obrázek 16: Fotogrammetrický senzor .....	29
Obrázek 17: Vliv tvaru dotykového prvku při měření zakřivených povrchů .....	29
Obrázek 18: Rozměry snímacího prvku.....	30
Obrázek 19: Materiály kuliček.....	30
Obrázek 20: Materiály pro dřívky .....	31
Obrázek 21: Základní typy senzorů .....	32
Obrázek 22: Dotyky pro speciální účely .....	32
Obrázek 23: Spínací dotykové senzory.....	33
Obrázek 24: Měřicí dotykový senzor .....	34
Obrázek 25: Přídavné zařízení pro dotykové měření kontur optickými senzory .....	35
Obrázek 26: Zeiss senzory .....	42
Obrázek 27: Dynamická kloubová jednotka ZEISS RDS-D-CAA .....	43
Obrázek 28: ZEISS VAST XXT a ZEISS XDT .....	43
Obrázek 29: Rozměry ZEISS VAST XT gold, ZEISS VAST XTR a ZEISS RDS-D .....	44
Obrázek 30: Měřené rozměry masky Toyota 560 .....	45
Obrázek 31: Reálný kus masky Toyota 560 .....	45
Obrázek 32: Měření na stroji Werth .....	46
Obrázek 33: Pravá díra .....	47
Obrázek 34: Levá díra.....	47
Obrázek 35: Měření na stroji Zeiss.....	48
Obrázek 36: Výsledek měření dotykovým senzorem .....	49

### 3 Seznam tabulek

Tabulka 1: Měřicí rozsah .....	36
Tabulka 2: Rozměry .....	36
Tabulka 3: Technické rozměry, část 1. ....	41
Tabulka 4: Technické rozměry, část 2. ....	41
Tabulka 5: Technické rozměry, část 3. ....	41
Tabulka 6: Technické rozměry, část 4. ....	42
Tabulka 7: Naměřené hodnoty Werth .....	46
Tabulka 8: Naměřené hodnoty Zeiss.....	48

## 4 Úvod

Souřadnicové měřicí stroje (SMS) jsou jednou z nejvýznamnějších inovací, které se udály v oblasti měření jak ve strojírenství, v automobilovém tak i leteckém průmyslu nebo zdravotnictví. V dnešní době jsou ovládány počítačem s příslušným softwarem.

Právě potřeba měřit karoserie v automobilovém a leteckém průmyslu byla impulzem, kdy konstrukce souřadnicových měřicích strojů byla vynucena do současných podob. Jedná se o složitý měřicí systém, který uskutečňuje měření v rovině nebo v prostoru s možností automatizace měření a vyhodnocení.

Ve své práci uvedu princip souřadnicových měřicích strojů a rozeberu jednotlivé typy konstrukcí. Převážně se budu věnovat optickým a dotykovým sensorům a popisu stroje, na kterém jsem měřila. Nakonec porovnam naměřené výsledky z navrhnutého experimentu.

Tuto práci jsem vypracovala ve spolupráci se společností Continental Brandýs nad Labem – Stará Boleslav.

## 5 Popis závodu Continental AG

### 5.1 Historie

Společnost Continental AG byla založena 8. 10. roku 1871 v německém Hannoveru. Původně vyráběla tlumiče pro podkovy a celopryžové obruče pro povozy. Jako ochrannou známku společnost přijala roku 1882 nespoutaného koně.

Jako první německá společnost začala roku 1892 vyrábět pneumatiky pro jízdní kola a o šest let později se začaly v Hannover-Vahrenwaldu vyrábět pneumatiky pro automobily bez dezénu.

Na začátku 20. století Continental představil první automobilové pneumatiky s dezénem na světě a v druhé polovině 20. století kupuje další značky.

V roce 1955 jako první společnost vyvíjí Continental pneumatické pružiny pro nákladní automobily a autobusy. Také spouští výrobu bezdušových pneumatik, kdy v roce 1943 podali žádost o jejich patent.

Zásobování evropských automobilových průmyslů polyuretanovými kryty tvarovanými extruzí a vyfukováním v roce 1974.

Společnost také dbá na ekologii, a tak v roce 1991 představili ekologicky šetrnou osobní pneumatiku ContiEcoContact.

V roce 2007 získává Siemens VDO a stává se jedním z pěti největších dodavatelů automobilového průmyslu na světě. [7] [8]



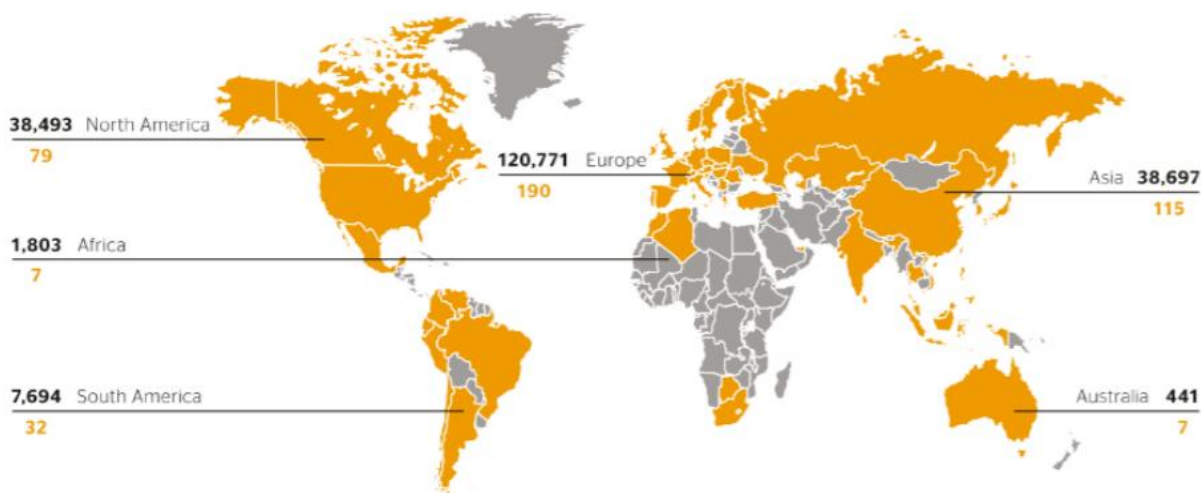
Obrázek 1: Logo společnosti [10]

## 5.2 Současnost

V současné době společnost Continental patří k předním světovým dodavatelům v automobilovém průmyslu na světě. Dodává brzdové systémy, pohonné systémy a jeho součásti, přístrojové vybavení, elektroniku pro automobily, pneumatiky a další.

Dnes společnost Continental působí v 61 zemích světa a zaměstnává přibližně 244 000 zaměstnanců.

[11]



Obrázek 2: Místa působnosti společnosti Continental [11]

Ve společnosti Continental všichni zaměstnanci sdílí čtyři základní hodnoty, které tvoří podnikovou kulturu: důvěra, touha zvítězit, svoboda k činům a soudržnost. Pracovní atmosféra ve společnosti se vyznačuje vzájemným respektem. Jednotlivé přínosy se počítají a sdílí se prostřednictvím celosvětové sítě, aby se mohly společně zušlechtit. [9]

# 6 Souřadnicové měřicí stroje

## 6.1 Princip

Princip těchto strojů spočívá ve stanovení základního bodu v prostoru, který určuje počátek. Naměřenou polohu měřených bodů vyjadřujeme pomocí os X, Y, Z. Povrch obrobku se snímá bod po bodu v souřadnicovém systému. Mezi výhody souřadnicových měřicích strojů je určení základního bodu kdekoli v místě pracovního prostoru. Toto konvenční stroje neumožňují. [1] [3]

SMS pracuje se dvěma souřadnicovými systémy, a to se souřadnicovým systémem stroje a souřadnicovým systémem měřeného předmětu. V souřadnicovém systému stroje osy X, Y a Z odpovídají pohybu stroje. Při pohledu na stroj zředu osa X vede zleva doprava, osa Y zředu dozadu a osa Z zdola nahoru. Osy souřadnicového systému měřeného předmětu jsou vztaženy k údajům nebo prvkům výrobku a vytváří se změřením referenčních prvků po obvodě součástky. Na měřené součástce se může nacházet více souřadnicových systémů. [3] [5]

Faktory ovlivňující SMS:

Měřicí stroj:

- měřicí a vyhodnocovací software,
- osa přístroje,
- měřicí rozsah,
- délka měřicího systému,
- systém měřicí hlavičky.

Okolí:

- teplota a její kolísání,
- vlhkost,
- vibrace,
- znečištění součástí.

Měřená součástka:

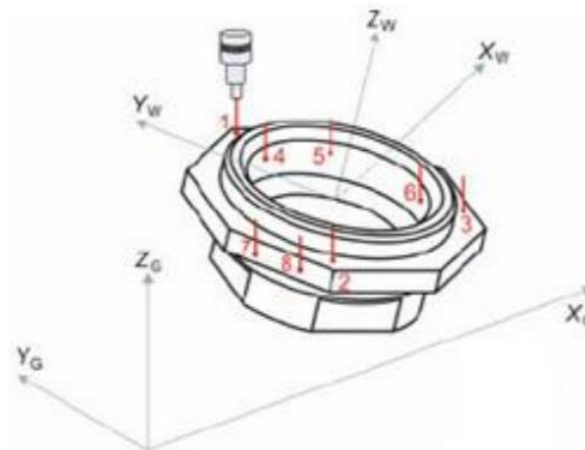
- velikost a typ odchylky tvaru,
- vlnitost, drsnost,
- materiál,
- rozměry,
- hmotnost.

Obsluha:

- pedantnost,
- plánování,
- konfigurace snímací hlavyce.

Strategie měření:

- kritérium vyhodnocení,
- rozložení snímacích bodů,
- počet snímacích bodů,
- metoda měření hlavyce. [4]

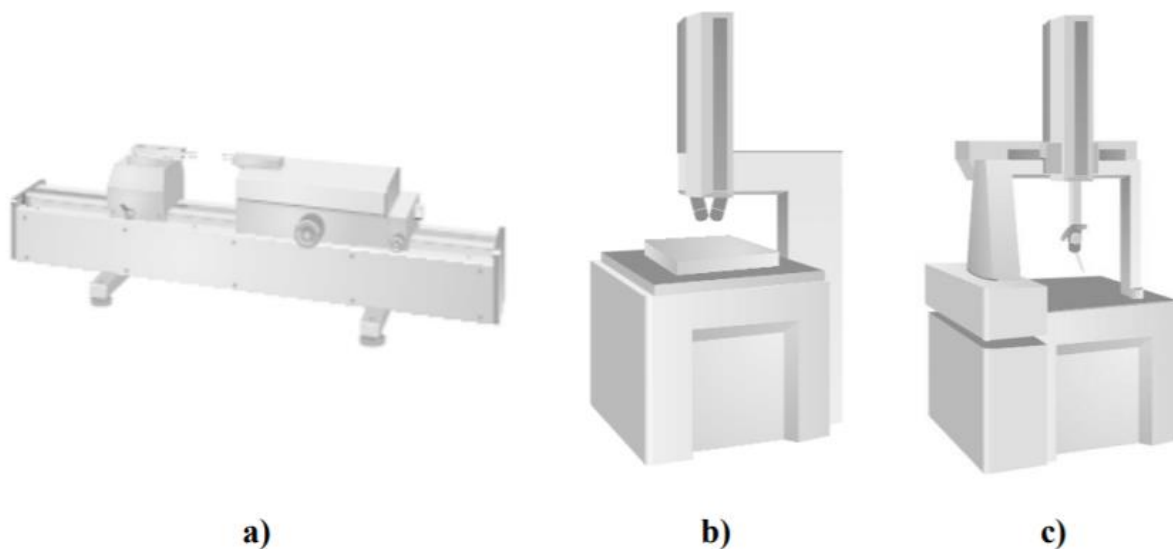


Obrázek 3: Souřadnicový systém stroje a měřeného předmětu [3]

## 6.2 Konstrukce

SMS se využívají ke kontrole rozměrů, tvaru a polohy geometrických tolerancí součástí. Proto je od výrobců na výběr celá řada od malých stolních přístrojů po velké mostové systémy. Podle konstrukce se stroje dělí na tři základní skupiny:

- Jednosouřadnicové měřicí stroje – používají se pro měření rozměrů v jedné ose X. Při měření lze dosáhnout velmi malé chyby měřidla, a to 0,6 až 6  $\mu\text{m}$  v celém rozsahu i u měření velkých rozměrů.
- Dvousouřadnicové měřicí stroje – používají se pro měření rozměrů ve dvou osách X a Y v jedné rovině, které musí být na sebe kolmé. Na toto lze využít mikroskopy, laserové interferometry, profilometry nebo skenery.
- Třísouřadnicové měřicí stroje – používají se pro měření ve třech osách X, Y a Z, které jsou navzájem kolmé. Měří se teda v prostoru. Jedná se o vrchol techniky měření geometrických veličin. Na jedno upnutí součásti umožňují složité měření s velkou rychlostí. Třísouřadnicové měřicí stroje jsou umístěny přímo ve výrobě nebo v laboratořích. [2] [3]



Obrázek 4: Typy SMS podle konstrukce: a) jednosouřadnicový SMS, b) dvousouřadnicový SMS, c) třísouřadnicový SMS [3]



## 6.3 Typy konstrukcí

Nejpoužívanější souřadnicové měřicí stroje jsou s kartézskou soustavou. Podle normy ČSN EN ISO 10 360 – 1 se SMS dělí do čtyř základních geometrických uspořádání:

- stojanový typ,
- mostový typ,
- výložníkový typ,
- portálový typ. [6]

### 6.3.1 Stojanový (sloupový) typ

Obvykle se jedná o laboratorní SMS, který se vyznačuje malými rozsahy měření, ale při dobré přístupnosti k měřenému předmětu lze dosáhnout největší přesnosti. Měřený předmět se upne na stůl, který se pohybuje ve směru os X a Y a měřicí pinola se pohybuje ve směru osy Z. [6]

### 6.3.2 Mostový typ

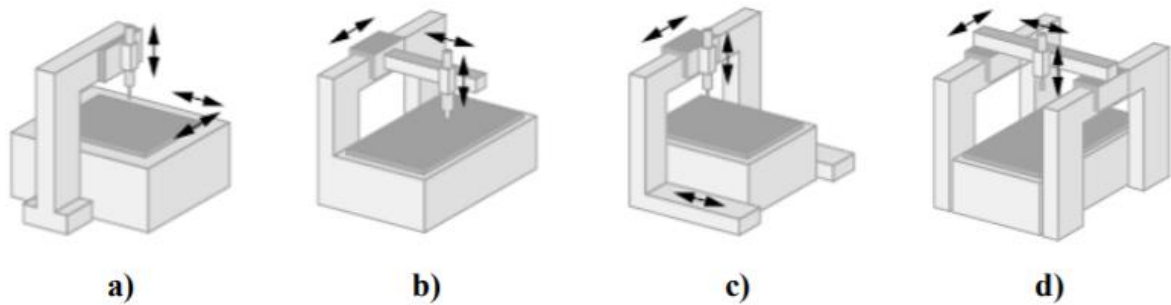
Používá se pro největší rozsahy měření, které mohou být v ose X až 24 m. Mohutně dimenzované nosníky a sloupy zaručují tuhou konstrukci. Přístup k měřenému předmětu je dobrá, ale přesnost měření je nižší. Používají se zejména v automobilovém a leteckém průmyslu. [6]

### 6.3.3 Výložníkový typ

Nevyznačuje se tak velkou kapacitou měřicího prostoru, ale přístup k měřenému předmětu je velmi dobrý. Je vhodný pro měření dlouhých součástí, protože osa Y je poměrně krátká z důvodu tuhosti. [1], [6]

### 6.3.4 Portálový typ

Používá se hlavně pro střední a velké rozsahy. Relativně vysokou přesnost měření zajišťuje dobrá tuhost. Na druhou stranu konstrukce omezuje přístup k měřenému předmětu. Portálový typ se vyrábí ve dvou variantách, a to s pevným portálem, který má tužší konstrukci a pohyblivý stůl, a pohyblivým portálem, u kterého se používá aerostatické nebo valivé vedení. [6]



Obrázek 5: Typy konstrukce SMS: a) stojanový typ, b) výložníkový typ, c) portálový typ, d) mostový typ [3]

S ohledem na hmotnost obrobků se vyrábí SMS:

- s pohyblivým stolem,
- s pevným stolem,
- s pevnou deskou v úrovni podlahy. [1]

Vzájemné pohyby jednotlivých částí SMS se většinou provádí pomocí kluzného vedení, valivého vedení nebo aerostatického vedení. U kluzného vedení hrozí vznik velkého odporu, proto je nutné neustálé mazání. Je velmi tuhé a kvalita vedení se v průběhu používání zlepšuje, a tím je lepší i přesnost. Valivé vedení, jako jsou přesné kladky nebo kuličková hnízda, má nízký valivý odpor, značnou odolnost proti opotřebení a je vhodné i pro větší zatížení. Aerostatické vedení znamená pohyb jednotlivých částí po vzduchovém polštáři o tloušťce cca  $4\div 8\mu\text{m}$ . To zaručuje minimální odpory i při vyšších rychlostech, nevzniká trhavý pohyb, značná tuhost a je potlačen vliv mikrostruktury. [6]

## 7 Senzory

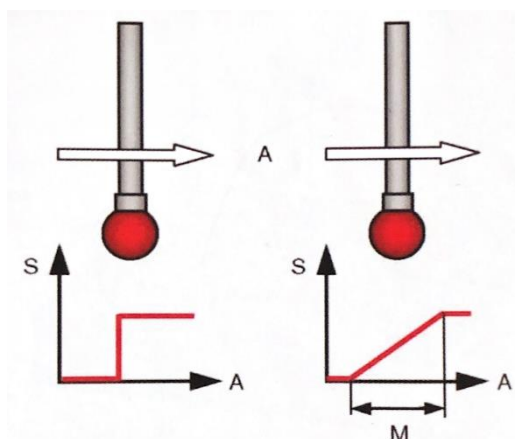
Jednou z částí SMS je snímací systém, který slouží ke snímání bodů. Za pomoci měřicího programu můžeme vyhodnotit a získat numerickou informaci o měřené veličině.

Snímací systém je spojený s pinolou a skládá se ze:

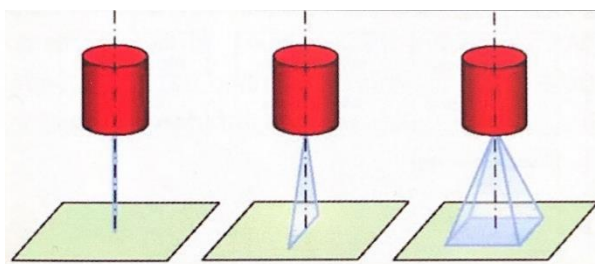
- snímací hlavy,
- prodloužení snímací hlavy,
- snímacího dotyku,
- systému výměny snímacího dotyku,
- prodloužení snímacího dotyku. [3]

Při výběru senzorů je potřeba brát zřetel na podmínky měřeného předmětu, jako jsou hodnoty měřených prvků, požadavky na přesnost a citlivost dotyku. Svou roli také hrají náklady a doba měření.

Stavba senzorů je značně rozdílná z hlediska mechaniky, optiky, elektroniky a softwaru. To představuje velice odlišné vlastnosti, jejichž zásadní pochopení je nutné pro optimální využití. Senzory mají k dispozici vlastní rozsah měření (měřicí senzory) nebo možnost rozeznat překročení mezní hodnoty (spínací senzor), (obr. 6). Činnost senzoru, podobně jako u měřicích strojů, může být omezena na jednu, dvě nebo všechny tři osy (1D, 2D, 3D). Senzory mohou měřit body (bodové senzory), přímkové kontury (čárové senzory) nebo plochy (plošné senzory), obr. 7. Tyto vlastnosti lze libovolně kombinovat. [14]



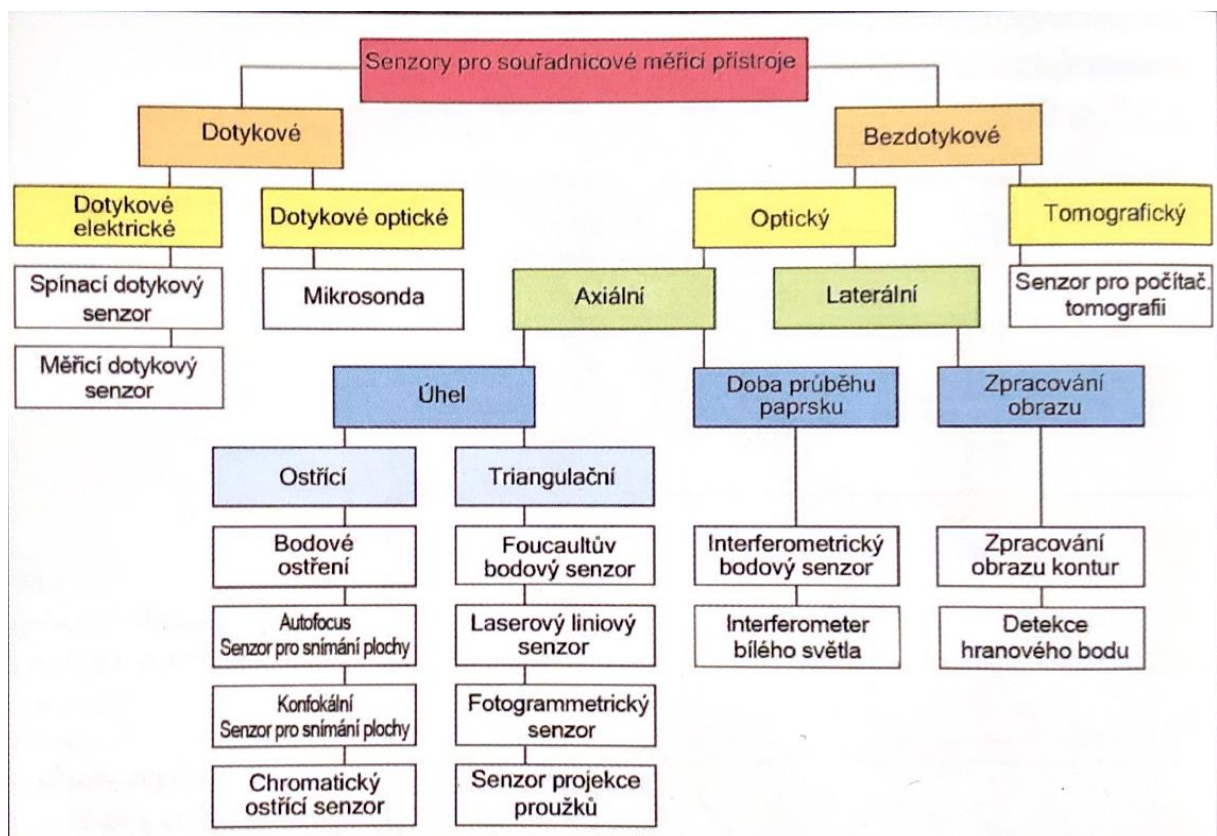
Obrázek 6: Spínací (vlevo) a měřicí senzory (vpravo) srovnání: A – vychýlení, S – průběh signálu, M – vzdálenost [14]



Obrázek 7: Měření bodů, přímek a ploch [14]

Skenování kontur je možné pomocí měřicích senzorů (měřicí dotykový senzor, optický senzor) s pomocí os přístroje na základě řízeného postupu. Spínací dotykový systém toto umožňuje také, ale měření vyžaduje velmi dlouhé intervaly. Při skenování, které používá zpracování obrazu, se snímky během snímání kontur automaticky spojí do celkové kontury. Velikost kontur je ovšem omezená rozsahem souřadnicového měřicího stroje a nikoli senzorem.

Zásadním kritériem pro rozdělení senzorů je fyzikální princip přenosu primárního signálu. Většina běžně používaných senzorů lze zařadit do kategorie optických a dotykových kritérií (obr. 8). Informace z optických senzorů se přenáší přes pozici měřeného bodu z objektu na senzor. Informace z dotykového senzoru se získají při dotyku měřeného předmětu speciálním dotykovým prvkem, většinou se jedná o kuličku. U senzoru pro počítačovou tomografii dochází k prosvícení části předmětu rentgenovým zářením a ze snímků se skládá trojrozměrná geometrie daného předmětu. Z toho se pak vychází při určení pozice měřicích bodů. [14]

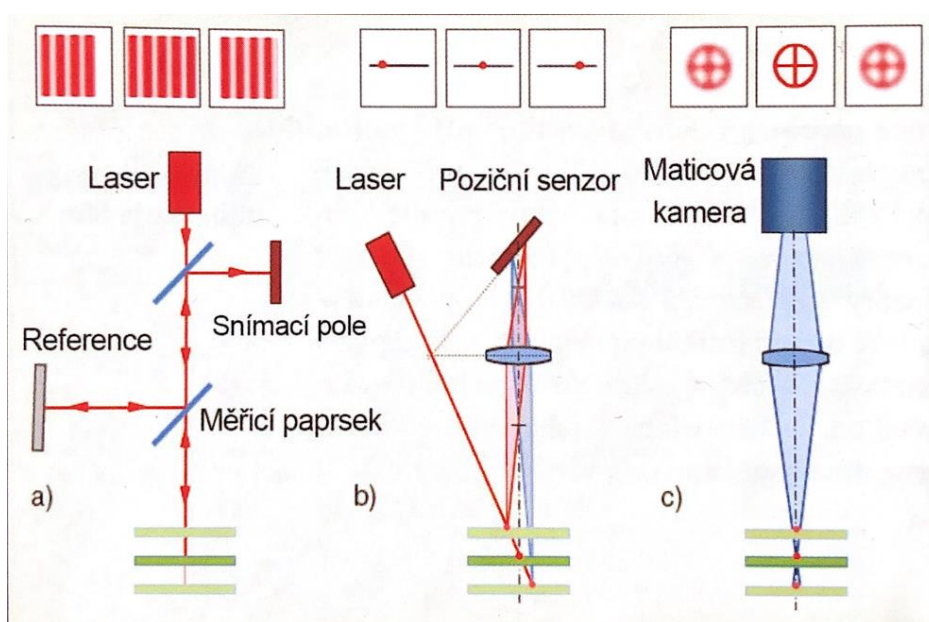


Obrázek 8: Rozdělení senzorů podle fyzikálního principu [14]

## 7.1 Optické senzory

Po desetiletí bylo dostupným senzorem lidské oko pro optické přístroje souřadnicového měření, jako jsou měřicí mikroskopy a projektory. Dnes přebírají úlohu zraku při měření optoelektronické senzory. Tyto působí buď kolmo k optické ose v úrovni předmětu (laterální senzory – zpracování obrazu), nebo podélně po optické ose při ostření (axiální senzory – optické senzory, viz obr. 8).

Především se používají senzory, které měří plochu, mají možnost zpracovat obraz a jsou schopné vyhodnotit i méně kontrastní obrazy. Pro měření trojrozměrných dílců optickými senzory je třeba provést dodatečné postupy pro měření podél souřadnicové osy. Tyto senzory zjišťují vzdálenost mezi senzorem a povrchem dílce pomocí světelného paprsku. Nelze ho pro krátké vzdálenosti určit přímo, jen pomocí interferometru. Poměry úhlů mezi měřicím paprskem a senzorem se využívají při postupech ostření a triangulace za účelem zjištění vzdálenosti. Zmíněná měření znázorňuje obr. 9. [14]



Obrázek 9: Proces bezdotykového měření: a) Interferometr (doba průběhu): vzdálenost lze vypočítat na základě interference z rozdílu doby průběhu referenčního a měřicího paprsku, b) triangulace (úhel): vzdálenost od předmětu lze určit z polohy světelného kuželu v měřicím poli a ze známého triangulačního úhlu, c) zaostření (úhel): vzdálenost od předmětu lze určit ze stavu zaostření, zaostření je závislé na úhlu apertury [14]

Pro výhody optických senzorů se používá tato měření především pro bezkontaktní měření. Mezi měřené předměty patří křehké dílce, dílce s malými otvory, optické funkční plochy, ohebné plechy nebo stavební součástky pro mikromechaniku jako jsou implantáty či hodinky.

Senzory se zpracováním obrazu zvládají měřit velké množství měřicích bodů velice rychle, nebo dokonce současně. Z tohoto důvodu se při jejich použití většinou zkracuje doba měření. [14]

### 7.1.1 Senzory se zpracováním obrazu

K základní výbavě většiny optických a multisenzorických přístrojů pro souřadnicové měření patří zpracování obrazu, a to pro jejich flexibilní možnosti využití, dobré vizualizaci předmětu a měřených vlastností.

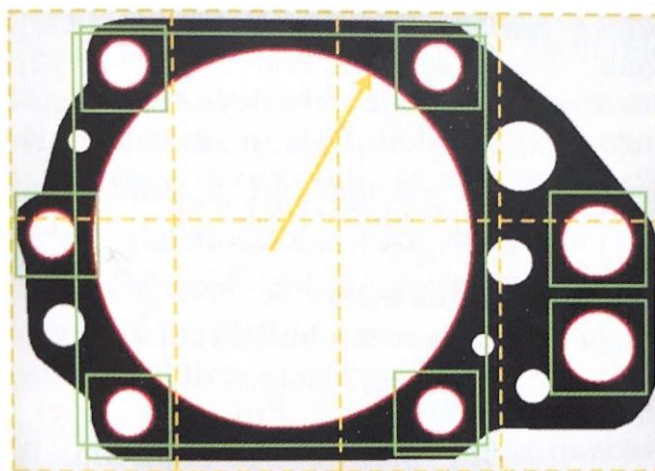
Při tvorbě obrazu při vizuálním měření se měřený předmět zobrazí pomocí objektivu na maticovou kameru. Elektronika v kameře změní optické signály do digitálního obrazu, ten se využije pro výpočet měřicích bodů v počítači s příslušným softwarem pro zpracování obrazu. Výsledky měření ovlivňují jednotlivé komponenty jako jsou světelné systémy, projekční optika, polovodičová kamera, elektronika pro zpracování signálu a algoritmy zpracování obrazu. [14]

Základem pro každé optické měření jsou osvětlovací systémy, které zajišťují co možná nejkontrastnější zobrazení měřených předmětů. V případě vnějších hran měřených předmětů lze použít spodní osvit. Zatímco u prostorově větších hran je potřeba dát pozor na vzájemné působení mezi osvětlením, měřeným předmětem a směrem paprsku projekce. Proto je potřeba sladit úhly otvorů (apertury) osvětlovacích systémů a objektivů. V praxi takových případů, kdy lze použít jen spodní osvit je málo, a proto se kombinují s dalšími systémy nasvícení. [14]

Systémy nasvícení lze rozdělit na osvit světlým polem a osvit tmavým polem. Osvit světlým polem je paralelní s optickou osou proudu projekčních paprsků a svítí přímo na měřený předmět. Např. na kovovém povrchu způsobuje toto nasvícení přímý odraz, tudíž se měřený předmět zobrazí světle a skloněné plochy, které odráží světlo mimo objektiv se zobrazí tmavě. Osvit tmavým polem má směr nakloněný k proudu projekčních paprsků a svítí na měřený předmět se sklonem. Odražené světlo se v závislosti na sklonu úhlu odráží od povrchu předmětu do objektivu nebo mimo něj. [14]

Kamery s vysokým rozlišením mohou snímat větší části předmětu, ovšem jejich rychlost je výrazně menší, než mají kamery s nižším rozlišením. Vysoká obrazová frekvence je výhodná např. pro měření autofokusem. [14]

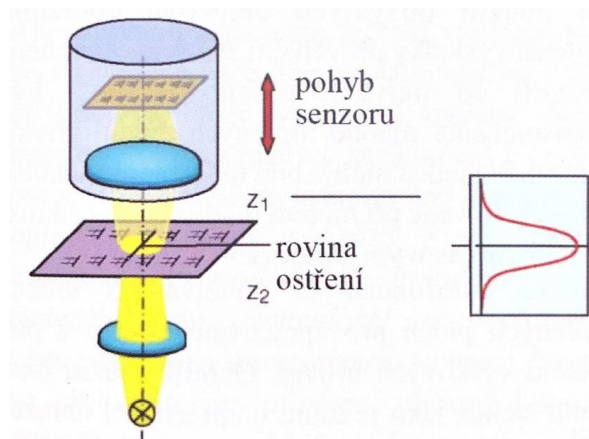
Metoda pro záznam větší části dílce se nazývá rastrové skenování. Vytváří se kompletní snímek povrchu dílce, nebo obrys pomocí spojování obrazů z různých pozic senzoru ve společném rastru. V průběhu převzorkování jsou z dílčích obrazů vypočítány nové hodnoty pixelů pro celkový obraz a jsou eliminovány odchylky pozic. V první řadě je zpracování obrazu vhodné pouze pro měření dvourozměrných prvků. Tato oblast zahrnuje dvourozměrné předměty měření, např. fólie, montážní rámečky, břitové destičky, řezy profilů z hliníku, gumy a umělé hmoty, desky tištěných spojů, chromové desky apod. [14]



Obrázek 10: Rastrové skenování: několik sousedních částí obrazu (8 žlutých linií) je snímáno postupně a seskupeno dohromady. Definicí oken (zelená barva) a případně vyhledávacím paprskem (žlutá šipka) se vypočítají kontury a geometrické prvky (kružnice) [14]

### 7.1.2 Senzory s autofokusem

Senzor snímá ve směru optické osy a pouze v jednom místě se předmět zobrazí ostře. Rozostřený senzor rovněž způsobuje neostře obrázky. Pro určení ostrosti obrazu lze použít kontrast, přičemž se senzor pohybuje ve směru své optické osy směrem k oblasti, hodnota kontrastu dosáhne maxima, pokud se zaostřovací rovina překrývá s rovinou objektu. Z této polohy senzoru je možné určit pozici bodu na povrchu a poté polohováním nastavit ostření. [14]



Obrázek 11: Určení ostřičího bodu skrze pohyb senzoru v rozsahu  $z_1$  až  $z_2$  a vyhodnocení vzniklého průběhu kontrastu [14]

Tento citlivý proces ovlivňuje především velikost části optické osy, kterou zvolený objektiv zobrazí jako ostrou. Tato část osy, která se také označuje jako hloubka ostrosti, je závislá na rozložení, popřípadě na použité numerické apertury objektivu. S větší numerickou aperturou se zmenšuje hloubka ostrosti, a tak se zpřesňuje měření provedené autofokusem. S obvyklými objektivy získáme nejlepší výsledky při velkém zvětšení. K dosažení největší přesnosti se musí zaznamenat hodně opěrných bodů křivky ostření. S rychlostí několika sekund na měření jednoho bodu je toto měření časově dlouhé. [14]

Funkce autofokusu se používá k určení ploch pro zpracování obrazu nebo k měření výškových úrovní.

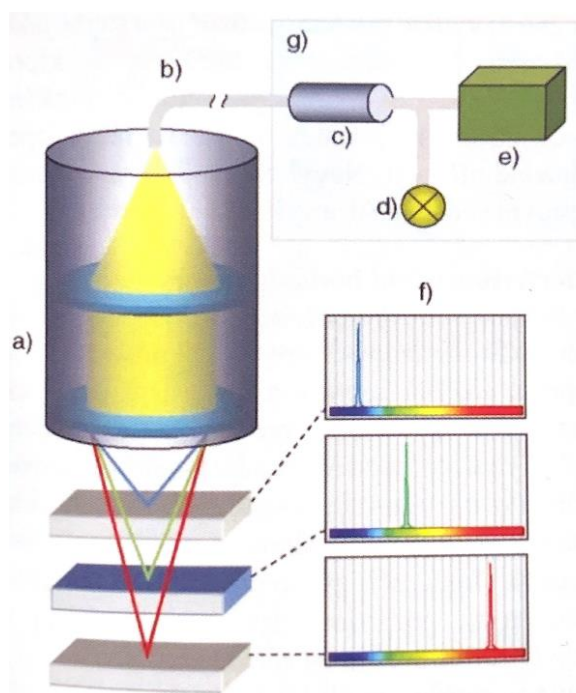
### 7.1.3 Laserové triangulační senzory

Na měřený předmět se pomocí laserové diody vysílá laserový světelný paprsek se sklonem k optické ose senzoru. Na optoelektronickém senzoru se zobrazí odražený světelný bod a na základě triangulačního procesu se propočítá poloha měřeného bodu. Triangulační senzory pracují na základě tohoto principu, přičemž laserový paprsek a osa projekční optiky senzoru svírají úhel cca 10 stupňů. Tak vznikne trojúhelník mezi zdrojem laseru, měřeným bodem a senzorem, ze kterého se počítá vzdálenost na základě vztahů úhlů (viz obr. 9b). Struktura a úhel sklonu povrchu velmi ovlivňují výsledek měření. To způsobuje relativní nejistotu měření, a proto by se tento způsob měl používat pro méně přesná měření. [14]



#### 7.1.4 Chromatické zaměřovací systémy

Tyto senzory cíleně využívají chybu zobrazení optických přístrojů, která se označuje chromatická aberace. Proto se optiky vyrábí tak, aby velmi intenzivně zesilovaly chromatickou aberaci. Každá barva světla je určena pomocí rozdílné pracovní vzdálenosti. Podle vzdálenosti předmětu od senzoru se optimálně zaostří výstupní plocha vodícího paprsku světla pro určitou barvu na předmětu, viz obr. 12. [14]



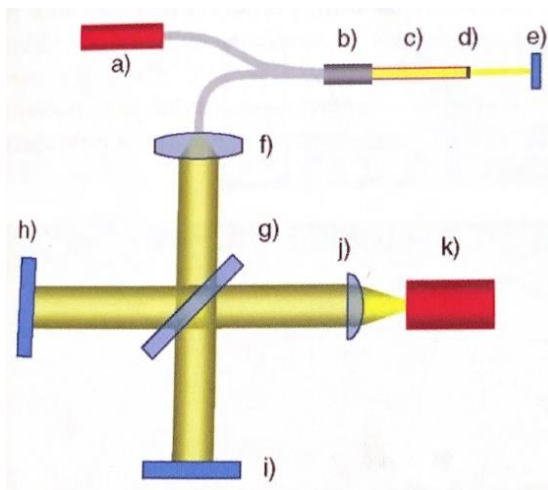
Obrázek 12: Chromatický ostřicí senzor: měřicí hlava (a) je propojena dlouhým optickým vláknem (b) s vyhodnocovací jednotkou (g). Zde se přes spojku vláken (c) připojují širokopásmový zdroj bílého světla (d) a spektrometr (e). Spektra (f) představují vzdálenost měřeného objektu od měřicí hlavy. [14]

Speciální senzory se musí konfigurovat podle druhu použití. Velká pracovní vzdálenost vede k malé apertuře, a to způsobuje menší toleranci vůči sklonům povrchů. Vysoké požadavky na aperturu snižují pracovní vzdálenost, což způsobuje zvýšené nebezpečí kolize. Relativně velké pracovní vzdálenosti lze dosáhnout pomocí velkých objektivů při velké apertuře. Tyto objektivy jsou ale drahé.

Jak vysoce reflexní zrcadlové plochy, tak i difúzně reflexní plochy lze měřit, protože přímá reflexe není rušivá, zatímco u postupu triangulací tyto plochy měřit nejde. Některé povrchy předmětu lze měřit lépe a přesněji, např. funkční plochy a tloušťky vrstev. Nevýhodami jsou vyšší náklady a menší pracovní vzdálenost. [14]

### 7.1.5 Interferometrické bodové senzory

Optické senzory měří časový rozdíl průběhu dvou paprsků, a to referenčního a měřicího paprsku, který plyne z rozdílu mezi délkou referenční dráhy (vzdálenost od referenční plochy) a měřené dráhy (vzdálenost od povrchu měřeného předmětu). Vyhodnocuje se posun fází při překrytí obou paprsků. Malé geometrické tvary a prvky uložené hluboko v předmětu se měří interferometry s optickými vlákny. Použitím krátkých super luminiscentních diod (SLD) vzniká spektrum z několika světelných frekvencí, které má možnost změřit absolutní hodnotu vzdálenosti. Díky zachování vztažného bodu měřené vzdálenosti je možné přerušit proces měření, např. z důvodu polohování nebo povrchových defektů předmětu. Tak lze měřit i opticky drsné povrchy. [14]

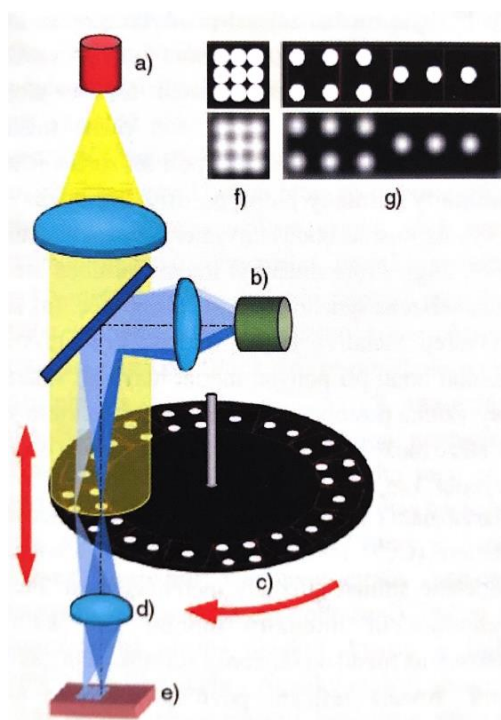


Obrázek 13: Princip interferometrického bodového senzoru: a) superluminiscentní dioda, b) spojka vláken, c) sonda, d) výstup sondy a referenční plocha, e) povrch dílce, f) kolimátorová čočka, g) dělič paprsků, h) zrcadlo 1, sklopné, i) zrcadlo 2, j) cylindrická čočka, k) řádková kamera [14]

Obrázek 13 znázorňuje princip konstrukce interferometru Werth Interferometer Probe (WIP). Světlo SLD se koncentruje pomocí spojky optických vláken do jednoho vlákna a přenáší se do vlastní měřicí sondy. Referenční paprsek vytváří obraz na výstupní ploše sondy. Odrazem od povrchu předmětu vzniká měřicí paprsek. Přes spojku vláken a další optické vlákno se oba signály přenesou na vyhodnocovací interferometr. Rozdíl mezi délkami drah se tak kompenzuje dělením drah paprsku do odpovídajících drah pomocí nastavení vzdáleností zrcadel. Tak se referenční a měřicí paprsek překryjí a dosáhne se interference. Pokud se překloupí jedno ze dvou zrcadel, tak se axiální informace o poloze paprsků přemění v laterální informaci. Ta už lze vyhodnotit. [14]

### 7.1.6 Konfokální plošné senzory

Konfokální plošný senzor vysílá světlo přes projekční systém na předmět. Velikost světelného kruhu snižuje malá clona s otvorem na velmi malou oblast. Rozostření světelného kruhu pohybem hlavy senzoru způsobí rozptýlení světla na větší plochu a odcloněný světelný bod na předmětu ztmavne. Tudíž při pohybu měřicí hlavy vzhledem k předmětu vznikne křivka intenzity, která se zaznamená fotocitlivým senzorem. Místo povrchu představuje maximum intenzity této křivky. [14]



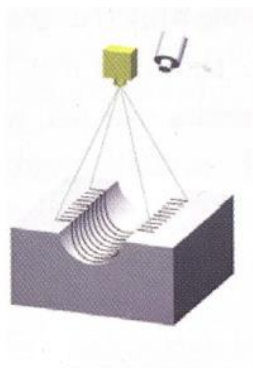
Obrázek 14: Konfokální plošný senzor: a) zdroj světla, b) maticová kamera, c) rotující clona, d) objektiv, e) měřený předmět, f) husté uspořádání clon, které se při rozostření překrývají, g) uspořádání s většími odstupy. [14]

Zamezení vzájemnému působení sousedních bodů při rozostření zaručí měření více bodů současně. Tuto možnost zajistí dostatečně velká vzdálenost mezi body. Vysokou hustotu bodů zajistí instalace rotačních clon, tzv. Nipkowův kotouč. Vysoké hustoty bodů bez vzájemného ovlivnění se docílí snímáním různých míst jedno po druhém měřeného předmětu v zorném poli senzoru. Proto je nutné synchronně seřadit integrační dobu senzoru a rotaci kotouče. Při pohybu měřicí hlavy ve směru osy postupně vzniká křivka intenzity pro každou polohu bodu. Z té je možné vypočítat množinu měřených bodů. [14]

Konfokální senzory používají maticovou kameru, která odděleně snímá intenzity měřených míst. Také mohou měřit reflexní povrchy nezávisle na kontrastu povrchu předmětu. Senzory jsou vhodné pro plošné měření drsnosti, kdy je možné docílit nízkých odchylek měření v řádu desetin mikrometru. Používá se třeba pro měření kompletní geometrie násad do nástrojů na ohýbání plechů nebo razidel mincí. Bohužel pro velikost apertury, a tedy i objektivu, je samotný objektiv velmi drahý. [14]

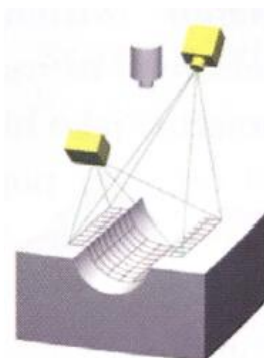
### 7.1.7 Senzory povrchu s proužkovou projekcí

Senzory povrchu s proužkovou projekcí pracují na triangulačním principu. Podle varianty provedení můžeme rozlišit senzory s proužkovou projekcí a fotogrammetrickými senzory. V obou případech se může použít vztahu úhlů mezi dráhami paprsků zobrazení a projekcí proužků, nebo mezi několika drahami paprsků projekce, nebo tyto lze kombinovat. Prostřednictvím projektoru u senzoru s proužkovou projekcí se promítá na povrch materiálu proužkový vzor s přesnou geometrií. Vzniklé vzory se snímají kamerou a vyhodnotí je příslušný software, ale je důležité zohlednit vlastnosti dráhy paprsku projekce jako je zvětšení nebo chyba zobrazení. K dosažení vyššího rozlišení s jednoznačným přiřazením bodů ke správným prostorovým souřadnicím, se postupně promítají a vyhodnocují různé vzorky přímek. [14]



Obrázek 15: Senzor s proužkovou projekcí [14]

Fotogrammetrické senzory snímají povrch předmětu ze dvou různých směrů. Na základě triangulačního principu se prostorové souřadnice prvku předmětu propočítá pomocí vztahů mezi úhly. V důsledku nedostatečné strukturovanosti se promítá na povrch dvourozměrná mřížka. Vzniklý vzor se snímá dvěma kamerami a vyhodnotí se. Výhodou oproti sensorům s proužkovou projekcí je, že nastavení projekce nemá vliv na výsledek měření, ale pouze tvoří strukturu na povrchu předmětu. Triangulační proces následuje oběma kamerami, a tím je taky méně náchylný vůči vlivům povrchu měřeného předmětu, jako jsou jeho vady nebo rozdíl ve světlosti. [14]

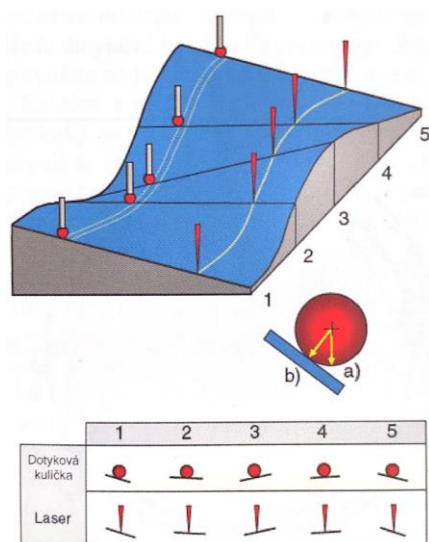


Obrázek 16: Fotogrammetrický senzor [14]

Tyto senzory se užívají v technice karoserií a v měření umělohmotných dílců.

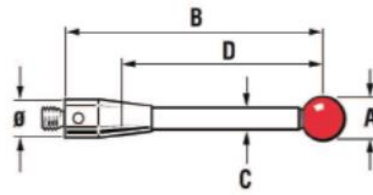
## 7.2 Dotykové senzory

Principem všech dotykových systémů je v mechanickém dotyku měřeného předmětu. Z tohoto dotyku jsou odvozeny elektrické signály pro následující zpracování. Výsledek měření zahrnuje geometrii (tvar a velikost) měřicího prvku, většinou se jedná o kuličku, prostorovou pozici a geometrickou formu měřené plochy předmětu. [14]



Obrázek 17: Vliv tvaru dotykového prvku při měření zakřivených povrchů. [14]

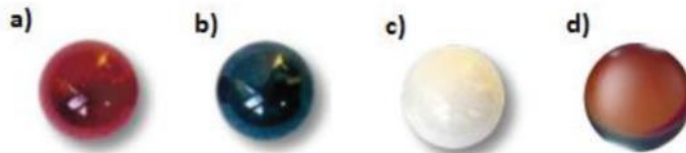
Je důležité pečlivě změřit přesnou konturu dotykového prvku (kuličky), protože pozice bodu dotyku u tohoto skenování nejde určit bez matematické úpravy na základě známých souřadnic středu dotykové kuličky (obr. 17). Chyba, která by vznikla bez změření dotykové kuličky je závislá na jejím průměru. Čím větší průměr, tím větší chyba. Velké průměry dotykové kuličky také mohou potlačit menší odchylky struktury, to může vést k nesprávnému měření. [14]



Obrázek 18: Rozměry snímacího prvku: A) průměr kuličky, B) celková délka, C) průměr dřívku, D) efektivní činná délka [3]

### 7.2.1 Materiál kuličky

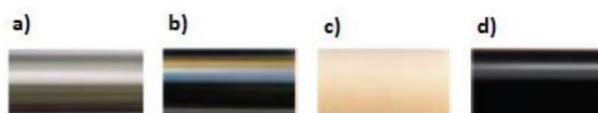
Kulička se vyrábí z různých materiálů, používá se např. rubín, nitrid křemíku, oxid zirkoničitý nebo diamant. Rubín se nejčastěji používá u většiny měřicích aplikací. Ale v případě skenování hliníkových materiálů se nedoporučuje, protože může dojít k adheznímu otěru, kdy se na povrchu kuličky usazuje hliník. Dalším materiálem, kdy se doporučuje jiný druh kuličky, je skenování litinových povrchů. Působení litinového materiálu na rubínovou kuličku může způsobit opotřebení povrchu kuličky otěrem. Nitrid křemíku má hodně společné vlastnosti s rubínem. Jedná se o velmi tvrdý materiál s odolností proti opotřebení. To se ale netýká při použití na skenování ocelových povrchů. V tomto případě kulička vykazuje opotřebení otěrem. V případě oxidu zirkoničitého se jedná o velmi pevný keramický materiál. Má podobnou tvrdost a opotřebení jako rubín. Vlastnosti povrchu zaručují materiálu ideální použití pro agresivní aplikace u litinových součástek. Diamant poskytuje nejpřesnější a nejekonomičtější měření. Extrémní tvrdost a hladký povrch udržuje opotřebení třením na minimu. Tyto kuličky jsou vhodné téměř pro každou měřicí aplikaci, včetně skenování hliníkových dílů. [3]



Obrázek 19: Materiály kuliček: a) rubín, b) nitrid křemíku, c) oxid zirkoničitý, d) diamant [3]

## 7.2.2 Materiál dříku měřicího dotyku

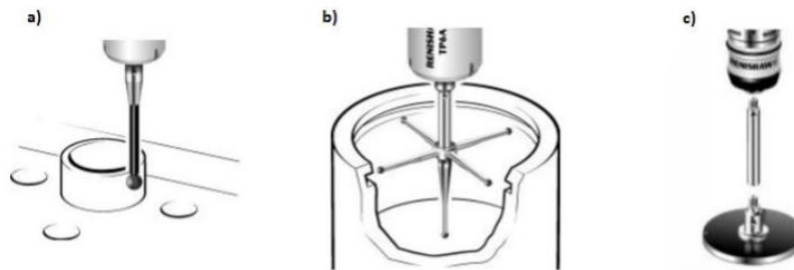
Dřík měřicího dotyku může být ocel, karbid wolframu, keramika nebo uhlíková vlákna. Dříky z nemagnetické nerezavějící oceli se využívají pro dotyky kuličky, nebo hrotem s průměrem 2 mm, nebo víc a délky do 30 mm. Toto rozmezí zaručí optimální poměr tuhosti a hmotnosti dříku. Druhá varianta, karbid wolframu, je optimální materiál pro maximální tuhost a minimální průměr dříku. Podmínkou je průměr kuličky menší než 1 mm a délka do 50 mm. Keramické dříky zajistí ochranu sondy proti havárii. Kulička o průměru nad 3 mm a délce nad 30 mm poskytne dříku tuhost, kterou lze porovnat s tuhostí oceli. Pro vysoce přesné sondy založené na tenzometrickém principu jsou ideálním řešením pro dříky uhlíková vlákna. Velmi dobře tlumí vibrace a má zanedbatelný koeficient tepelné roztažnosti. [3]



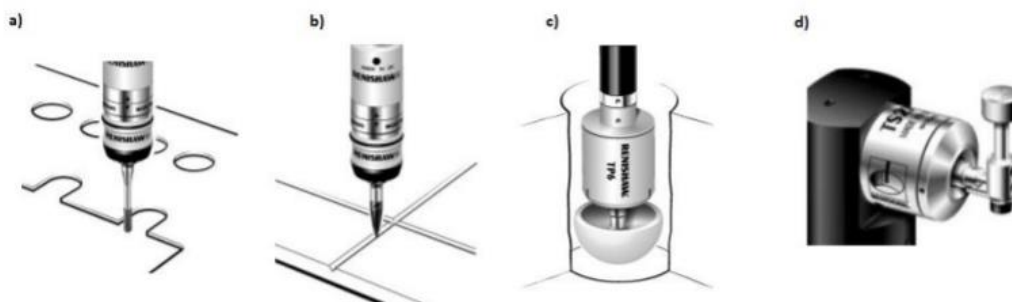
Obrázek 20: Materiály pro dříky: a) ocel, b) karbid wolframu, c) keramika, d) uhlíková vlákna [3]

## 7.2.3 Typy dotyků

- přímé – jedná se o nejjednodušší tvar, který se skládá z přesné kuličky a dříku,
- hvězdicové – konfigurace dotyků umožňuje snímání složitých předmětů a kuličky se čtyřmi, nebo pěti kuličkami jsou upevněny ke střednímu dílu,
- diskové – tento typ se používá pro snímání zápchů a drážek,
- dotyky pro speciální účely:
  - válcový dotyk,
  - špička,
  - dutá keramická polokoule,
  - dotyk na ustavení nástrojů. [3]



Obrázek 21: Základní typy senzorů: a) přímý dotyk, b) hvězdicový dotyk, c) diskový dotyk [3]

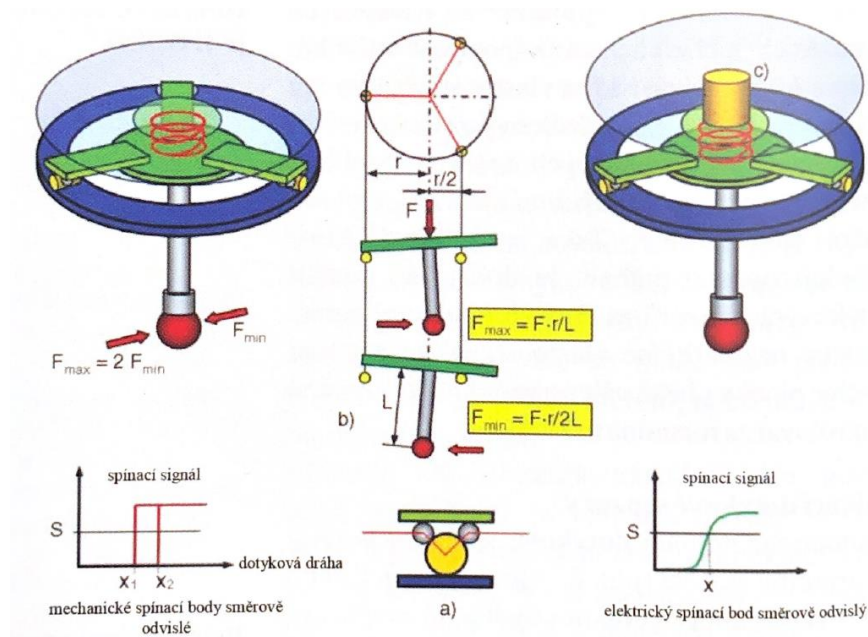


Obrázek 22: Dotyky pro speciální účely: a) válcový dotyk, b) špička, c) dutá keramická polokoule, d) dotyk na ustavení nástrojů [3]

#### 7.2.4 Spínací dotykové senzory

Spínací dotykové systémy pracují na principu stavivu (obr. 23 vlevo). Při dotyku měřeného povrchu kuličkou je generován signál, a tím se načte pozice bodu. Tento bod vyplývá ze souřadnic měřicího stroje a vztahuje se ke středu dotykové kuličky. Samotná kulička je připevněna pevným dříkem na trojbodovém ložisku, které má v každém styčném bodě spínač. Pohybem při dotyku se rozpojí minimálně jeden spínač, a tak se toto zpracovává jako spínací signál. Nevýhodou systému je síla dotyku, která je závislá na směru dotyku. To zapříčiní různá prohnutí dotykového prvku, které vedou k nezanedbatelné odchylce dotyku závislé na směru. Taková odchylka v následném zpracování jde těžko korigovat. [14]





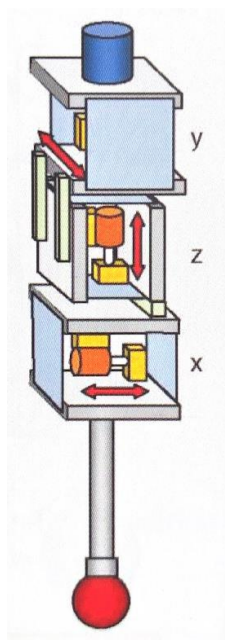
Obrázek 23: Spínací dotykové senzory: princip s mechanickými kontakty (vlevo): proudový obvod se při vychýlení přeruší (a). Uložením na třech bodech (b) je síla dotyku a poloha  $x$  spínacích bodů směrově odvislá od limitní hodnoty max. o faktor 2. Princip s dotykově elektrickým měničem (vpravo): elektromechanický měnič (c) vyrábí směrově odvislý signál, dokud jej nerozpojí třibodové uložení. [14]

Kvalitnějšího dotykového systému lze dosáhnout použitím transformátorových prvků, které přemění mechanický signál v elektrický. Jedná se např. o piezoelektrické prvky nebo tenzometry (obr. 23 vpravo). S použitím takovýchto prvků je možné měřit dotykem bez vlivu směru pohybu. Díky instalované elektronice je také možné pracovat s velmi malými silami dotyku, přičemž i nejistota měření ovlivněná senzorem je nižší. Až po rozpoznání dotykového bodu se stativ vychýlí, proto jsou dovolené relativně velké „brzděné dráhy“ v osách.

Spínací dotykové senzory mají společnou nevýhodu a to tu, že přístroj pro souřadnicové měření se musí dotknout s měřeným předmětem za účelem zjištění měřicího bodu, pak musí kontaktní bod opustit. Z tohoto důvodu vznikne prodleva v řádech sekund pro každý bod měření. Hlavní výhodou spínacích dotykových systémů je relativně nízká cena a o něco menší rozpěry v porovnání s dále popsanými dotykovými systémy. Použití se omezuje na měření prvků se zanedbatelnými odchylkami tvaru kvůli menšímu počtu měřicích bodů. [14]

## 7.2.5 Měřicí dotykové senzory

Senzor měřicího dotykového systému má k dispozici systém měření dráhy většinou ve všech souřadnicových osách. Při vychýlení v libovolné směru dotykové kuličky během dotyku s měřeným předmětem lze zjistit velikost vychýlení na základě informací těchto systémů měření dráhy. Měřený bod se zjistí překrytím vychýlení senzoru s pozicí senzoru v souřadnicovém systému přístroje. Samozřejmostí je nutná korektura dotykové kuličky, jak bylo uvedeno u spínacích dotykových senzorů, aby odpovídala poloze normálového vektoru plochy měřené dotykem a prohnutí dřívku. [14]



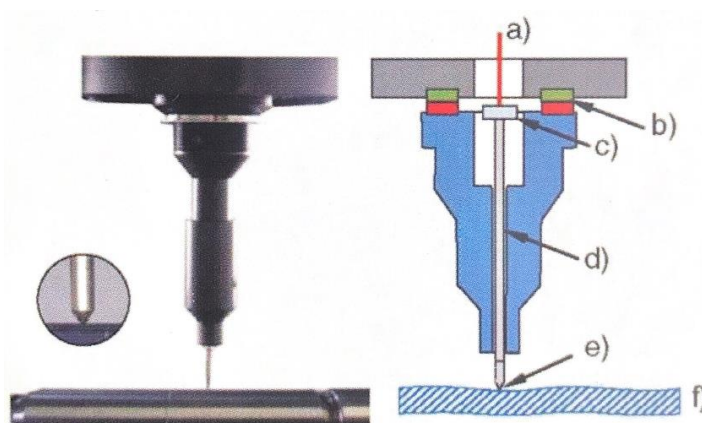
Obrázek 24: Měřicí dotykový senzor: měřicí senzory ve směru x, y a z. [14]

V kombinaci se správným ovládním je možné měřicí dotykové systémy využít pro automatické skenování povrchu měřeného předmětu. Takto se může změřit mnoho povrchových bodů v relativně krátkém čase. Je nutné seřídít souřadnicové osy měřicího přístroje, aby senzor zůstal uvnitř měřené oblasti. U tangenciálního pohybu po povrchu předmětu sleduje dotykový prvek jejich průběh. Směr této povrchové tangenty je možné určit z vektoru vychýlení dřívku, který je vždy nasměrován přibližně kolmo k povrchu. Ale musí se zanedbat tření a síla dotyku je izotropní, tzn. síla je ve všech směrech stejná.

Podobně se dají skenovat předdefinované roviny. Skenování se provádí při dodržení předem daných drah, které se získají z CAD dat. To zaručí rychlejší skenování. Skutečné algoritmy pro skenování berou v úvahu pro každou měřenou úlohu vlivové faktory, proto jsou komplexnější. [14]

## 7.2.6 Dotykově-optický senzor pro kontury

Dotykově-optický senzor pro kontury kombinuje dotykové jehly se zpracováním obrazu. S touto kombinací je možné souřadnicovým měřicím přístrojem měřit drsnosti a snímat kontury s vysokou přesností. Laserový senzor, který se používá přímo pro měření povrchu předmětu, měří vychýlení dotykové sondy. To lze vidět na obr. 25. Pokud vyjmemme dotykové čidlo pro kontury, můžeme pro měření použít samotný laserový senzor nebo senzor zpracování obrazu. Přidáním dotykově-optického senzoru kontur do souřadnicového měřicího přístroje umožní plně automatické měření kontur. Výhodou je vysoká poziční přesnost měření. [14]



Obrázek 25: Přídavné zařízení pro dotykové měření kontur optickými senzory: a) měřicí paprsek, b) magnetový spoj, c) zrcadlo, d) uložení, e) dotykový hrot, f) dílec. [14]

Naměřené hodnoty vyhodnocují softwarové funkce pro drsnost, rozměry, tvar a plochu. Tento druh senzoru lze použít pro měření profilů ozubených prvků, lisovaných plechů, měření profilových řezů vodičů s malými geometrickými rozměry, na čočkách nebo vstřikovaných dílech. [14]

## 8 Popis měřicího stroje

### 8.1 Werth ScopeCheck® FB 3D CNC

ScopeCheck® FB 3D CNC umožňuje přístup k měřenému předmětu ze čtyř stran. S novým konceptem spodního osvitů se dá skleněná deska s jednotkou spodního světla odebrat, pokud bude potřeba měřit těžké předměty, které se uloží přímo na měřicí stůl. Stroj může být vybaven dvěma sensorovými osami, které nejsou na sebe závislé. Tudíž je možné mechanické měření, optické měření, nebo jejich kombinace. Pokud se měří právě jedním senzorem, druhá osa zůstane v parkovací poloze mimo měřicí rozsah. Tak je možné měřit ze všech stran, aniž by došlo ke kolizi. V případě potřeby výměny senzoru, která je automatická, je k dispozici zasouvací osa výměňkové stanice. Stanice výměníku se pouze vysune z parkovací stanice do měřicího rozsahu pomocí souřadnicového měřicího stroje, když je třeba měnit senzor. Po výměně se vrátí zpět do parkovací pozice mimo měřicí rozsah. [13]

Tabulka 1: Měřicí rozsah [12]

Měřicí rozsah (v mm)	
X	400
Y	400
Z	300

Tabulka 2: Rozměry [12]

Rozměry (v mm, kg)	
Šířka	850
Výška	2100
Délka	1250
Váha	1000

#### 8.1.1 Technické parametry

- tělo přístroje s integrovanou Z-osou uložené ve stabilní ocelové konstrukci
- vodící dráhy v mechanickém uložení
- s volitelnou 3D-kompensací dle norem ISO 10360 resp. VDI/VDE 2617

Na úrovni měřicího stolu – MPE (maximální povolená chyba)

- E1:  $(1,8+L/200)$   $\mu\text{m}$  L=měřicí délka v mm
- E2:  $(2,0+L/150)$   $\mu\text{m}$  L=měřicí délka v mm

Všechny polohy – MPE

- E1:  $(2,5+L/200)$   $\mu\text{m}$  L=měřicí délka v mm
- E2:  $(2,9+L/150)$   $\mu\text{m}$  L=měřicí délka v mm
- E3:  $(3,9+L/100)$   $\mu\text{m}$  L=měřicí délka v mm

Platí pro podmínky: teplota  $20^{\circ}\text{C} \pm 1$  K teplotní gradient 0,5 K/h.

- standardní dle norem ISO 10360 resp. VDI/VDE 2617 snímání na nepoškozené ploše koncové měrky)

Na úrovni měřicího stolu – MPE

- E1:  $(1,8+L/200)$   $\mu\text{m}$  L=měřicí délka v mm
- E2:  $(2,0+L/100)$   $\mu\text{m}$  L=měřicí délka v mm

Všechny polohy – MPE

- E1:  $(2,5+L/200)$   $\mu\text{m}$  L=měřicí délka v mm
- E2:  $(2,9+L/150)$   $\mu\text{m}$  L=měřicí délka v mm
- E3:  $(4,5+L/75)$   $\mu\text{m}$  L=měřicí délka v mm

Platí pro podmínky: teplota  $20^{\circ}\text{C} \pm 2$  K teplotní gradient 1 K/h. [12]

Zatížení stolu max. 50 kg

Rozlišení: 0,1  $\mu\text{m}$

Dle norem ISO 10360 resp. VDI/VDE 2617

Senzorová hlava se zoomovou optikou 0,9x-4,3x

Pracovní vzdálenost optiky cca 50 mm

Strojový čas paletového měření je 12 s

Studené světlo přenášené ze zdroje, kontrované CNC systémem

Nepřetržitá kontrola stopy pro použití dynamických senzorů a skenovacích systémů

Zpracování obrazu pro multisenzorové přístroje

WinWerth – uživatelsky přátelský software pracující pod Windows

Vysoká přesnost měření v ose Z zaručená metodou vyhodnocování kontrastu

Ergonomický kontrolní panel

Elektroinstalace dle VDE 113: napětí 230 V  $\pm$  10%, frekvence 50 Hz  $\pm$  2%, příkon 1 kW [12]

## 8.1.2 Detailní popis

Hlavní jednotka se skládá z:

- ocelového lože s přesným vedením všech tří os
- servomotoru řízeným joystickem
- přírůstkového lineárního odměřování v každé ose, s rozlišením 0,0001 mm ve všech třech osách
- zrychlení:  $a_{\max}=350 \text{ mm/s}^2$
- rychlosti posuvu:  $V_{\max}=150 \text{ mm/s}$

Senzorová 3D/zoom hlava se skládá z:

- motorického zoomu (CNC)
- kamery CCD s vysokým rozlišením  $1/2''$  max. 13x10 mm, min. 1,3x1 mm zorné pole
- snímacího systému s hranovou detekcí

Osvětlení má elektrografický zdroj.

Video senzor IP – deska pro zpracování obrazu pracují na bázi odstínu šedé. Sestává se z:

- rozhraní kamery
- obrazové paměti
- rozhraní pro WinWerth

CNC řízení se skládá z:

- řídicího systému uloženého ve stojanu stroje
- 3osého servomotoru pro ruční i CNC modus
- Joysticku se základními tlačítky pro ovládání software, umožňující velice snadné ovládání
- řízení světla

Měřicí program WinWerth V7 pracuje v prostředí MS Windows XP, uživatelsky přátelský, s interaktivní grafikou, který byl navržen tak, aby mohl být obsluhován i osobami bez speciální kvalifikace. Využívá CAD dat.

- PTB-certifikovaný algoritmus pro tvarové elementy,
- balík 3D software pro geometrická měření součástí, obsahující nejrůznější funkce zapojení všech měřicích systémů zařízení při měření a vyhodnocení jedné úlohy,
- měřicí zařízení umožňující měření, vyhodnocení, zpracování a dokumentaci výsledků,
- softwarové vybavení pro geometrické prvky všech druhů měření dle DIN, ISO, EN, GPS,

- možnost filtrace pro redukci vlivů na výsledek měření,
- možnost manuálního a CNC režimu,
- CNC programování opakovaných měřicích úloh,
- graficko-numerický displej pro výpočty jednoduchých charakteristik a odpovídající dokumentaci,
- DMIS formát učení pro automatizování měřicích postupů,
- sofistikovaná analýza obrazu
  - měření bodu, úsečky a kružnice „na jedno tlačítko“
  - doby úseček a kružnic
  - kontrastní autofokus (Automatické ostření)
  - předvolené funkce pro zajištění větší přesnosti
  - plné vyhodnocování všech detekovaných pixelů (řetězový algoritmus)
  - makra pro tolerance polohování
  - matematické filtry obrazu a obrysů
  - grafické CAD okno.

Vyhodnocovací stanice se skládají z:

- PC typu: DESK-PC
- procesoru: Intel i5
- RAM (operační paměť): 3 GB
- HDD: 1 TB
- grafické karty: PCIe ATI FireGL V3700 Dual Head
- mechaniky (CD, FDD, DVD): CD/DVD-ReWriter, FDD 1,44 MB 3,5"
- síťové karty: integrované na základní desce 10/100
- ostatní (rozhraní, atd): USB
- monitorů: 2x19" LCD wide
- pracovního stůlu o rozměru 120x80x75 cm

Werth Zoom + Laser Probe – umožňuje měření jednotlivých bodů a volitelně lze kontinuálně skenovat.

- a) s předsádkovou čočkou (standard)
  - zvětšení cca 1x-10x
  - pracovní vzdálenost cca 37 mm
  - zorné pole:  $\frac{1}{2}$ " CCD-kamery max. 6x5 mm, min. 0,6x5 mm
- b) bez předsádkové čočky
  - zvětšení cca 0,6x-6,8x

pracovní vzdálenost cca 80 mm

zorné pole:  $\frac{1}{2}$ " CCD-kamery max. 10x8 mm, min. 0,9x7 mm [12]

### 8.1.3 Senzorová hlava/Skenovací sonda SP25

Senzorová hlava se sestává z:

- hlavy se spojovacími kabelem
- interfaceu pro přenos dat
- software pro kalibraci mechaniky systému
- nastavného kroužku pro korekci nulového bodu mezi optickým a mechanickým systémem

Sonda skenovací SP25 KIT1 se sestává z:

- sondy SP25 KIT1
- výměnného modulu snímače SH25-1 pro scanning pro snímače délky 20-50 mm
- interfaceového kabelu
- možnost kontinuálního snímání kontur

Nejistota sondy – a) MPE platí pro „bodové měření“

P1: 0,75  $\mu\text{m}$  (odpovídá R1)

P2: 0,95  $\mu\text{m}$  (odpovídá R2)

P3: 1,5  $\mu\text{m}$  (odpovídá R3)

b) MPE platí pro měření „scanningem“

THP2: 1,9  $\mu\text{m}$  (odpovídá R2)

THP3: 2,5  $\mu\text{m}$  (odpovídá R3) [12]

### 8.1.4 Balík programů pro kontaktní skenování

SP25-Scanner – automatické sejmnutí a zpracování kontury pro měřicí programy WinWerth. Výstup v ASCII formátu umožňuje snadnou konverzi a další zpracování.

Element Contour – umožňuje převod dotykově naskenovaných dat do prvku zobrazeného v grafickém okně měřicího programu.

ConvertinTool – umožňuje převod naskenovaných dat do prvku zobrazeného v grafickém okně měřicího programu. Schopnost spojit skenované body lomenými čarami a jejich export ve standardizovaných CAD formátech. Taktéž umožní převod dat mezi jednotlivými formáty CAD/CAM. [12]



### 8.1.5 Balík programů pro optické skenování

IP-Scanner – automatické sejmutí a zpracování kontury pro měřicí programy WinWerth. Výstup v ASCII formátu umožňuje snadnou konverzi a další zpracování.

Element Contour – umožňuje převod dotykově naskenovaných dat do prvku zobrazeného v grafickém okně měřicího programu. [12]

### 8.1.6 3D-Patch

Měření ED geometrií snímačem pro zpracování obrazu:

- měření 3D obecných ploch „v obraze“
- odvození geometrických prvků z nasnímané sítě bodů
- volitelná hustota snímaných bodů
- měření (ED sítě bodů) lze zpracovat s balíkem programů pro skenování

Zpracování s algoritmy Werth pro hodnoty kontur – systémové požadavky:

- WinWerth 7:31
- Zpracování obrazu: 3.41.004
- Balík programů pro optické skenování: 97,1020 [12]

## 8.2 Zeiss Contura

Tabulka 3: Technické rozměry, část 1. [15]

ZEISS CONTURA size	Rozměry v mm		
	Měřicí rozsah		
	X	Y	Z
7/10/6	700	700	600

Tabulka 4: Technické rozměry, část 2. [15]

ZEISS CONTURA size	Rozměry v mm		
	Celkové rozměry stroje		
	Délka	Šířka	Výška
7/10/6	1603	1381	2658

Tabulka 5: Technické rozměry, část 3. [15]

ZEISS CONTURA size	Rozměry v mm		
	Pracovní rozsah (max. velikost obrobku)		
	Délka	Šířka	Výška
7/10/6	1350	827	600

Tabulka 6: Technické rozměry, část 4. [15]

ZEISS CONTURA size	Rozměry v mm			Hmotnost v kg	
	Výška stolu	Montážní prostor	Přepravní výška	CMM	Max. obrobek
	Výška	Výška	Výška	1570	730
7/10/6	700	≥200	2348		

Pro správnost měření je nutné zajistit stabilní prostředí, ve kterém se nachází stroj. Relativní vlhkost okolí je 40-70 % a teplota okolí 17-35 °C.

Strojový čas paletového měření je 31 s.

Jmenovitý výkon – 100-240 VAC ( $\pm 10\%$ ); 50-60 Hz ( $\pm 3.5\%$ ), max. spotřeba energie 800 VA, typická spotřeba energie 200 W, množství generovaného tepla max. 2200 kJ/h.

Software – ZEISS CALYPSO, ZEISS GEAR, ZEISS HOLOS [15]

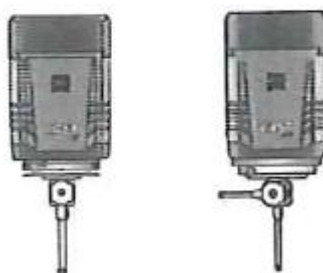
### 8.2.1 Specifikace senzorů

Zeiss Contura může k měření použít aktivní skenování nebo vícebodový senzor. Rychlost aktivního skenování je až 500 bodů za sekundu. Proměnná měřicí síla je 50-1000 mN pro sběr dat.

ZEISS VAST XT gold – stylus: max. délka 500 mm, max. hmotnost 500 g včetně adaptéru dotyku, min. průměr hrotu stylusu 0,5 mm.

ZEISS VAST XTR gold – max. délka (tuhá) 500 mm, max. délka (během otáčení) 350 mm, max. hmotnost 500 g včetně adaptéru na stylus, min. průměr hrotu stylusu 0,5 mm. [15]

**ZEISS VAST XT gold**  
**ZEISS VAST XTR gold**



Obrázek 26: Zeiss senzory [15]

Chyba měření délky v rozmezí teploty 18-22 °C –  $1,5 + L/350 \mu\text{m}$

Chyba měření délky v rozmezí teplot 18-26 °C –  $1,5 + L/250 \mu\text{m}$

Rozsah opakovatelnosti E0 – RO=1,2  $\mu\text{m}$

Chyba snímání – THP=2.0  $\mu\text{m}$

Požadovaná doba měření MPT –  $\tau=40 \text{ s}$

Chyba snímání jednoho doteku – PFTU=1,5  $\mu\text{m}$

Chyba snímání tvaru hrotu – PFTM=2.5  $\mu\text{m}$

Chyba snímání kóty s více hroty – PSTM=1,2  $\mu\text{m}$

Chyba snímání polohy více stylusů – PLTM=1.7  $\mu\text{m}$  [15]

Dynamická kloubová jednotka ZEISS RDS pro optické a kontaktní senzory. Rozsah naklonění dopředu a dozadu  $\pm 180 \text{ }^\circ\text{C}$ , velký rozsah měření, přírůstky rotace 2,5  $^\circ$ , korekce CAA pro automatickou kvalifikaci všech 20.736 úhlových poloh skenovacích senzorů (ZEISS VAST XXT TL3) a vícebodových senzorů (ZEISS XDT TL3). [15]

ZEISS RDS-D-CAA

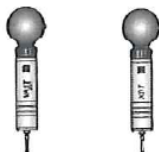


Obrázek 27: Dynamická kloubová jednotka ZEISS RDS-D-CAA [15]

ZEISS VAST XXT TL3 na ZEISS RDS skenování a vícebodový snímač.

ZEISS XDT TL3 je vícebodový snímač. Snímací rychlost měření až 500 bodů za sekundu. Délka doteku s modulem TL3=30-150 mm, max. hmotnost doteku 15 g. Max. prodloužení senzoru 100 mm, minimální průměr hrotu stylusu 0,3 mm.

ZEISS VAST XXT  
ZEISS XDT



Obrázek 28: ZEISS VAST XXT a ZEISS XDT [15]

Chyba měření délky v rozmezí teploty 18-22 °C –  $1,7 + L/350 \mu\text{m}$

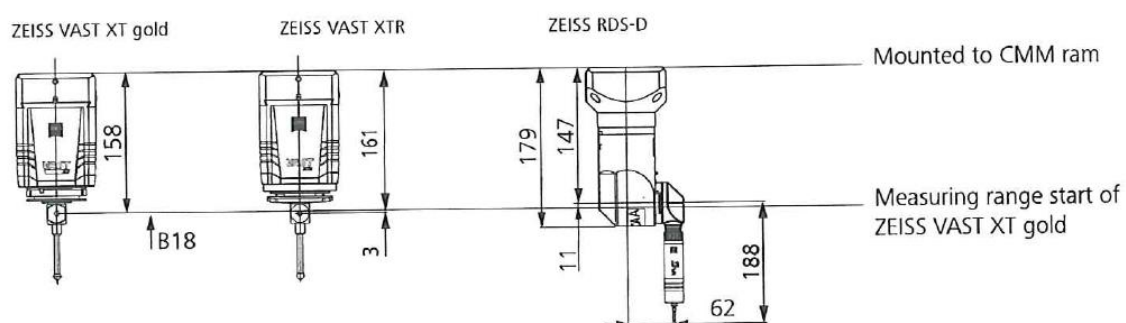
Chyba měření délky v rozmezí teplot 18-26 °C –  $1,7 + L/250 \mu\text{m}$

Rozsah opakovatelnosti  $E0 - RO = 1,7 \mu\text{m}$

Chyba snímání –  $THP = 2,7 \mu\text{m}$

Požadovaná doba měření  $MPT - \tau = 50 \text{ s}$

Chyba snímání jednoho doteku –  $PFTU = 1,7 \mu\text{m}$  [15]



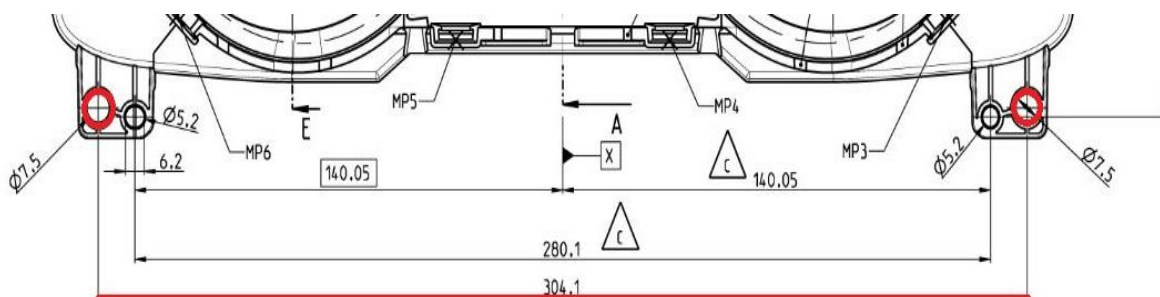
Obrázek 29: Rozměry ZEISS VAST XT gold, ZEISS VAST XTR a ZEISS RDS-D [15]

## 9 Návrh experimentu

Experiment jsem provedla na výše popsaných strojích, Werth ScopeCheck® FB 3D CNC a Zeiss Contura. Jednalo se o porovnání dvou senzorů, a to optického s dotykovým, které se používají při kontrole geometrických rozměrů a tolerancí. ScopeCheck jsem použila při měření optickým senzorem a Contura dotykovým senzorem.

Pro experiment jsem použila masku Toyota 560 (celý výkres je v příloze č. 1), na které jsou dva otvory pro přišroubování na palubní desku auta.

Kontrolní měření optickým senzorem jsem provedla opakovaně 30x. Další měření dotykovým senzorem jsem uskutečnila 10x. Průměr měřených otvorů je 7,5 mm a jejich rozteč je 304,1 mm. Toto je znázorněné na obrázku 30.



Obrázek 30: Měřené rozměry masky Toyota 560



Obrázek 31: Reálný kus masky Toyota 560

# 10 Zpracování experimentu

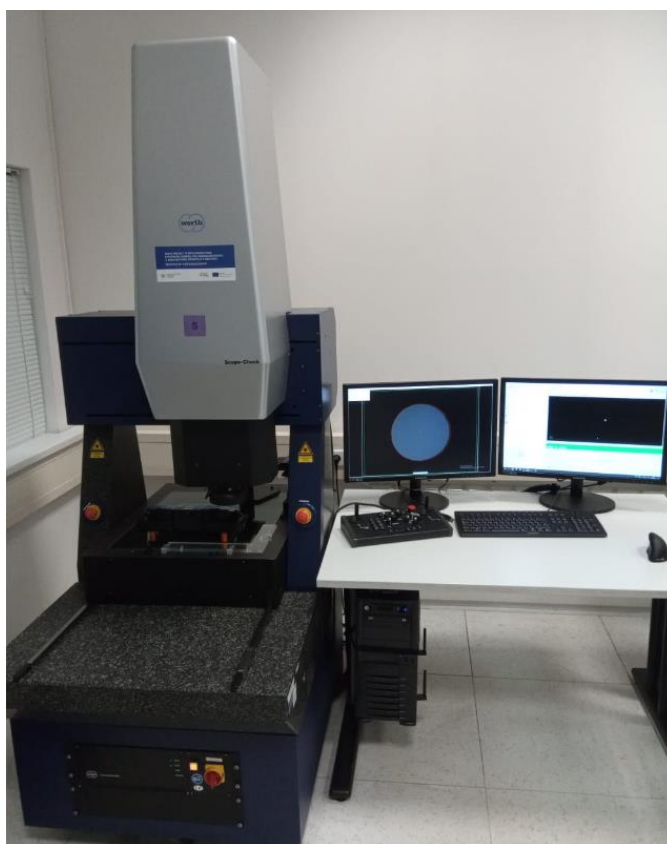
## 10.1 Naměřené hodnoty optickým senzorem na stroji Werth ScopeCheck®

### FB 3D CNC

Tabulka 7: Naměřené hodnoty Werth

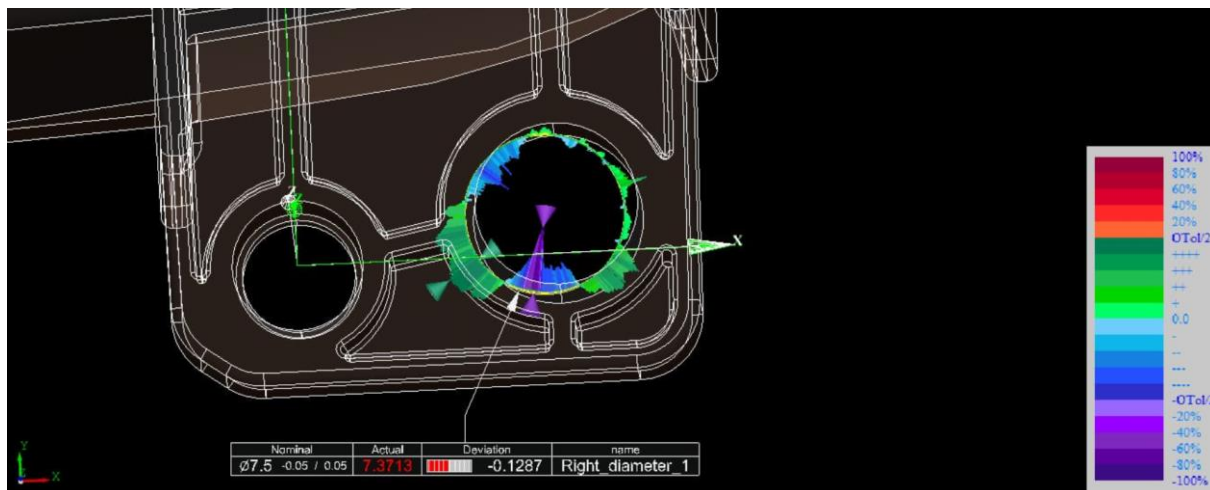
Měřený protokol č. 1693/2020	Rozměr	Horní	Dolní	Text	Aritmetický průměr	Tolerance
Kóta č. 1	7,5	0,05	-0,05	D Right_diameter_1	7,371	7,45-7,55
Kóta č. 2	0	0,1	0	FT Right_roundness_1	0,1336	0-0,1
Kóta č. 3	7,5	0,05	-0,05	D Left_diameter_1	7,4687	7,45-7,55
Kóta č. 4	0	0,1	0	FT Left_roundness_1	0,1600	0-0,1
Kóta č. 5	304,1006	0,65	-0,65	X 304.1_mm_1	303,2198	303,4506-304,7506

Celkem bylo provedeno opakovaně 30 měření na jednom kuse. Veškeré rozměry jsou uvedeny v mm. V tabulce 7 jsou zobrazeny jednotlivé rozměry, tolerance a aritmetický průměr z naměřených hodnot. Samotné naměřené hodnoty jsou přiloženy v příloze č. 2.



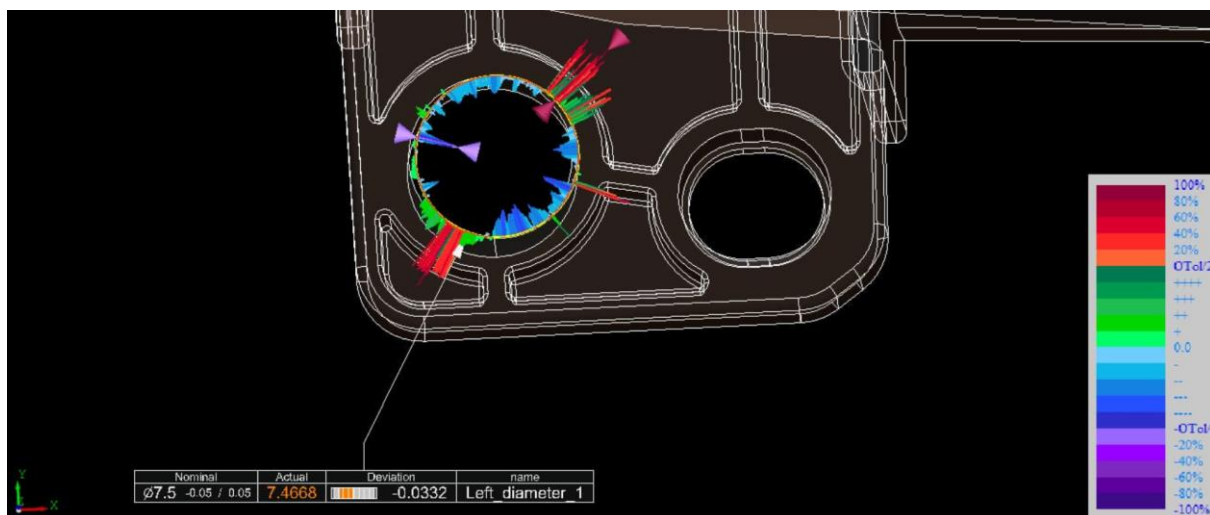
Obrázek 32: Měření na stroji Werth

Měření pravé díry ukázalo značné nerovnosti. Z aritmetického průměru je patrné, že odchylka průměru od reálného rozměru je -0,129 mm a leží mimo stanovenou toleranci. Na obrázku 33 můžeme vidět na spodní straně díry velkou nerovnost, která patrně zapříčinila vychýlení. Kvůli této výchyлке ani kruhovitost pravé díry neodpovídá požadovanému rozměru.



Obrázek 33: Pravá díra

V případě levé díry měření dopadlo trochu lépe. Velikost odchylky průměru je -0,0313 mm a nachází se v nastaveném tolerančním poli. Ale z obrázku je zjevné, že levá díra má jednu menší a dvě větší oblasti nerovností, které měly vliv na výslednou hodnotu. Z tohoto důvodu je odchylka kruhovitosti větší, než tomu bylo u pravé díry.



Obrázek 34: Levá díra

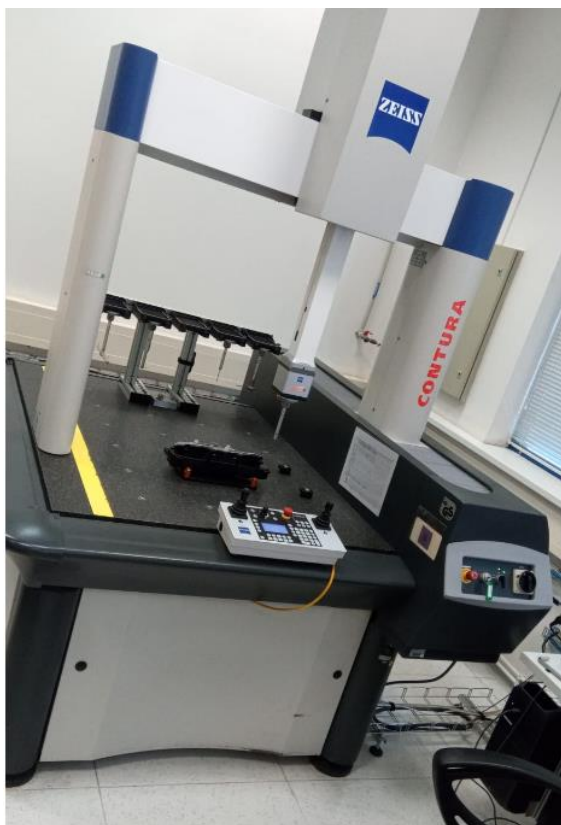
Rozteč také nevyhovuje dovolené toleranci a její odchylka od rozměru je -0,8808 mm. To nejspíše zavinilo špatné navrtání děr.

## 10.2 Naměřené hodnoty dotykovým senzorem na stroji Zeiss Contura

Tabulka 8: Naměřené hodnoty Zeiss

Měřený protokol č. 1693/2020	Rozměr	Horní	Dolní	Text	Aritmetický průměr	Tolerance
Kóta č. 1	7,5	0,05	-0,05	D Right_diameter_1	7,3729	7,45-7,55
Kóta č. 2	0	0,1	0	FT Right_roundness_1	0,0944	0-0,1
Kóta č. 3	7,5	0,05	-0,05	D Left_diameter_1	7,451	7,45-7,55
Kóta č. 4	0	0,1	0	FT Left_roundness_1	0,0551	0-0,1
Kóta č. 5	304,1006	0,65	-0,65	X 304.1_mm_1	303,2612	303,4506-304,7506

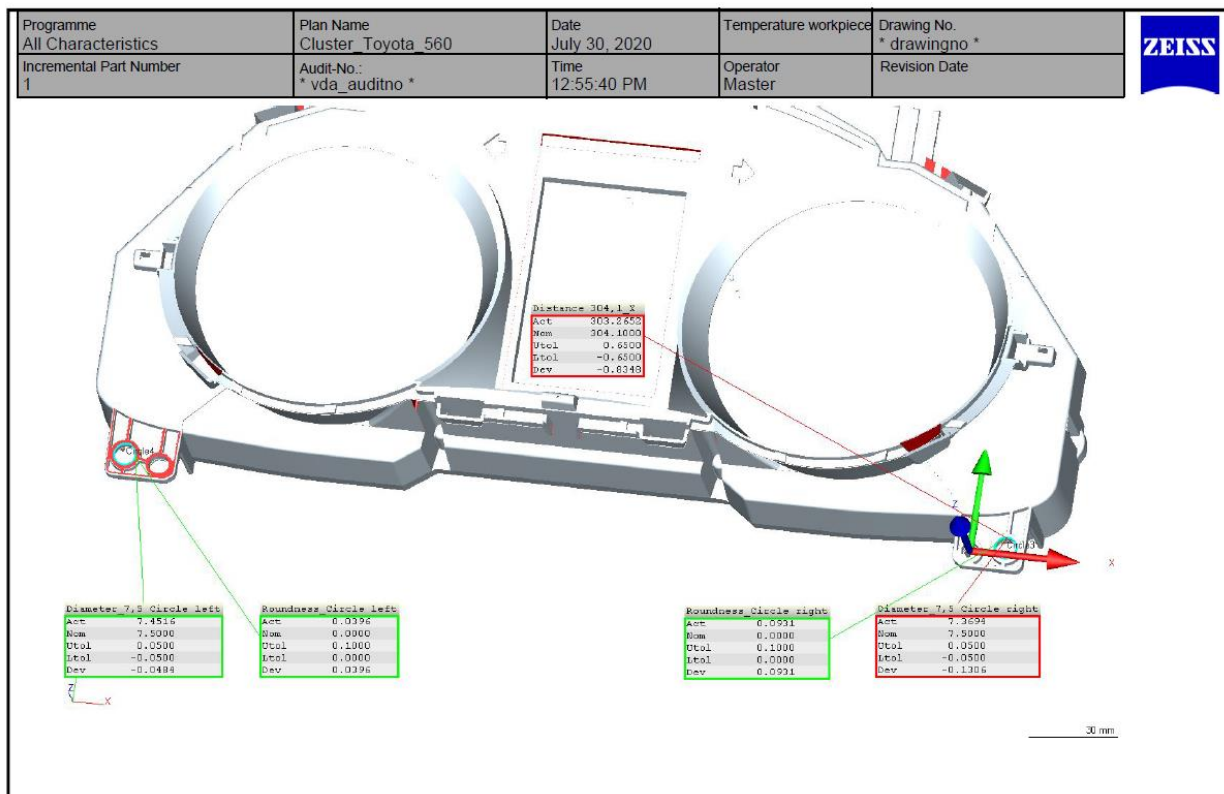
Celkem bylo provedeno opakovaně 10 měření na jednom kuse. Veškeré rozměry jsou uvedeny v mm. V tabulce 8 jsou zobrazeny jednotlivé rozměry, tolerance a aritmetický průměr z naměřených hodnot. Samotné naměřené hodnoty jsou přiloženy v příloze č. 3.



Obrázek 35: Měření na stroji Zeiss



Dotykové měření v porovnání s optickým senzorem bylo příznivější. Zatímco u optického měření se vešla do tolerance pouze jedna kóta, u dotykového to byly tři kóty. Konkrétně se jedná o obě kruhovitosti a průměr levé díry, viz obr. 36.



Obrázek 36: Výsledek měření dotykovým senzorem

Odchylka průměru pravé díry je -0,1271 mm, od odchylky u optického měření se liší přibližně o 2 setiny milimetru. Z dokumentu v příloze č. 4 je patrné, že kruhovitosť pravé díry má velké nepřesnosti, ale naměřené hodnoty vyšly lépe.

U levé díry průměr i její kruhovitosť leží v tolerančním poli. Odchylka průměru je -0,049 mm a je skoro o 2 setiny milimetru horší než u měření optickým senzorem. Odchylka kruhovitosti je 0,0551 mm a její záznam nemá takové extrémny jako kruhovitosť pravé díry (viz příloha č. 5).

Rozteč také nevyhovuje toleranci, její odchylka je -0,8394 mm a je o cca 4 setiny milimetru menší, než odchylka rozteče u optického měření.

# 11 Závěr

Kontrola geometrických rozměrů a tolerancí je velmi důležitou součástí kvalitní výroby. Stejně tak je důležité znát použitý měřicí stroj.

Provedla jsem kontrolní měření na stroji ScopeCheck® FB 3D CNC, na kterém se měřilo optickým senzorem. Na stroji Zeiss Contura se pro měření použil dotykový senzor.

Naměřené hodnoty z obou strojů jsem uvedla v kapitole výše. Zjistila jsem, že při měření optickým senzorem se naměřila data s většími odchylkami než u dotykového senzoru. Ze všech získaných hodnot od stroje Werth toleranci splnil pouze průměr levé díry. Ostatní kóty toleranci nespĺnily ani jednou.

V případě měření na stroji Zeiss byly výsledky příznivější. Do zadaného tolerančního pole se vešly obě kóty levé strany a kruhovitost pravé strany. Všechny naměřené hodnoty těchto tří kót se vešly do tolerančního pole. Zbylé dvě kóty neprošly ani jednou.

Vhodnější souřadnicový stroj na kontrolu geometrických rozměrů a tolerancí je Zeiss Conture. Optické měření snímá konturu profilu otvoru se všemi jeho nepřesnostmi (nečistoty, otřepy) a i když se použije filtr, dochází při výpočtu průměru k malým, ale přesto nezanedbatelným nepřesnostem. Odchylka měření při vyhodnocení kruhovitosti je v tomto případě ještě výraznější.

Zpracováním této práce jsem prokázala, že měření dotykovým senzorem je přesnější, protože na výsledky měření předmětu nemají vliv nečistoty nebo otřepy. Tímto jsem splnila zadané cíle práce.

## 12 Literatura

- [1] - Technická univerzita v Liberci-katedra výrobních systémů a automatizace. *Souřadnicové měřicí stroje* [online]. [cit. 2020-29-07]. Dostupné z < <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522> >
- [2] - ELUC. *ELUC* [online]. Copyright © 2020 [cit. 29.07.2020]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1111>
- [3] - PETŘKOVSKÁ, Lenka a Lenka ČEPOVÁ. *Metrologie a řízení kvality*: učební text. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2771-1.
- [4] - PETŘKOVSKÁ, Lenka. *Souřadnicové měřicí stroje*: učební text. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2013. ISBN 978-80-248-3035-3.
- [5] - Úvod do souřadnicového měření | Hexagon Manufacturing Intelligence. *Object moved* [online]. Copyright © 2020 [cit. 29.07.2020]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-cz/solutions/technical-resources/metrology-101/intro-to-coordinate-metrology>
- [6] - TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0672-x.
- [7] - Kariéra | Continental AG. *Kariéra | Continental AG* [online]. Copyright © 2020 [cit. 29.07.2020]. Dostupné z: <https://continental.jobs.cz/>
- [8] - Historie | Continental AG. *Historie | Continental AG* [online]. Copyright © 2020 [cit. 29.07.2020]. Dostupné z: <https://www.continental.com/cs-cz/spolecnost/historie>
- [9] - Naše hodnoty | Continental AG. *Naše hodnoty | Continental AG* [online]. Copyright © [cit. 30.07.2020]. Dostupné z: <https://www.continental.com/cs-cz/spolecnost/corporate-strategy/na%C5%A1e-hodnoty-68772>
- [10] - Continental Tire Logos | Continental. *Car Tires, SUV Tires, Truck Tires & More | Continental* [online]. Copyright ©2020 Continental Tire the Americas, [cit. 29.07.2020]. Dostupné z: <https://www.continentaltire.com/media/continental/logos>
- [11] - Continental Czech - *Homepage*. [online]. Copyright © 2020 Continental AG [cit. 29.07.2020]. Dostupné z: <https://www.continental.com/cs-cz>
- Interní zdroje:
- [12] - *Technická data WERTH*. Werth Messtechnik GmbH
- [13] - *Tisková zpráva*. PRIMA BILAVČÍK, s.r.o.
- [14] - *Multisenzorová souřadnicová měřicí technika: dimenzionální měření optikou, dotykovým senzorem a počítačovou tomografií*. PRIMA BILAVČÍK, s.r.o., 2015.
- [15] - *ZEISS CONTURA*, Specification. ZEISS, 2019

## 13 Seznam příloh

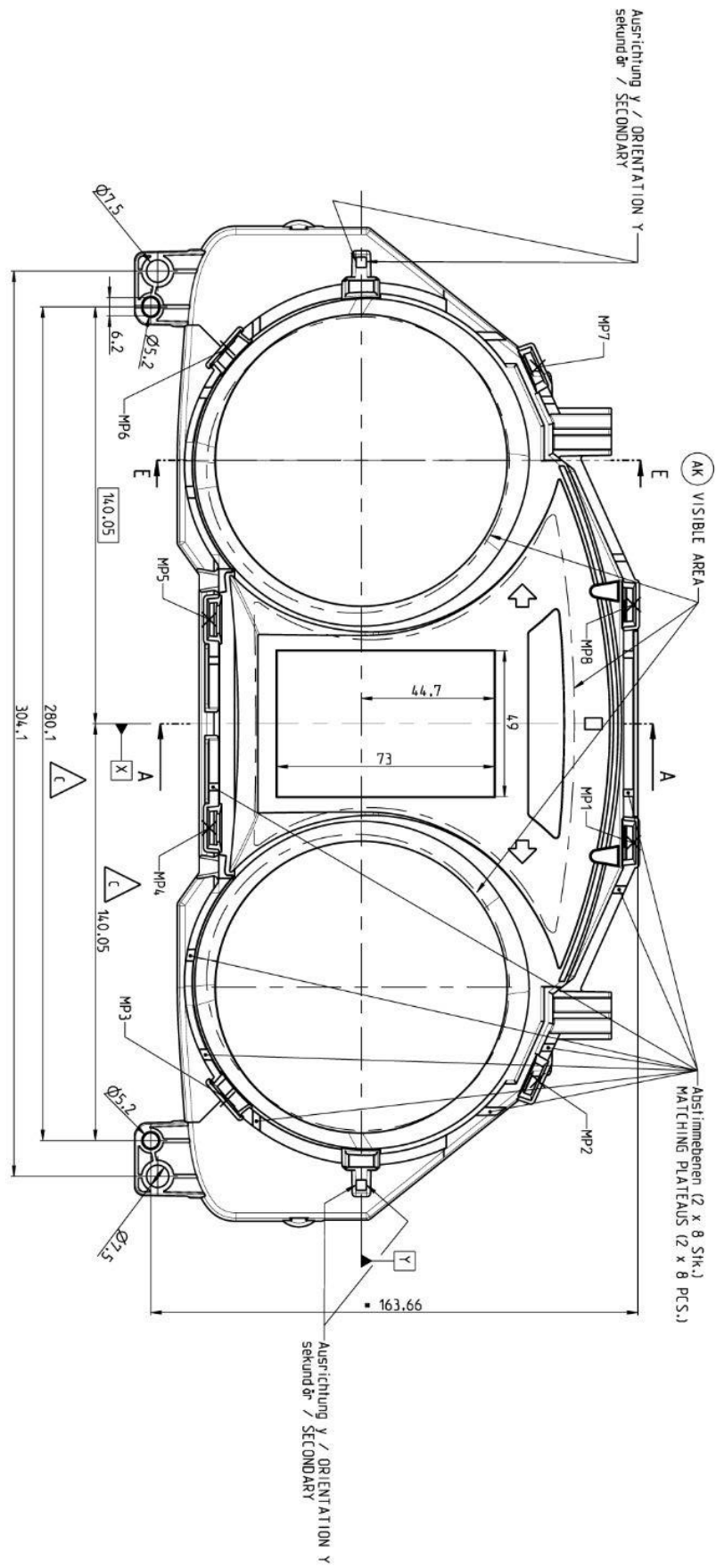
Příloha č. 1 – výkres masky Toyota

Příloha č. 2 – naměřené hodnoty strojem Werth ScopeCheck® FB 3D CNC

Příloha č. 3 – naměřené hodnoty strojem Zeiss Contura

Příloha č. 4 – kruhovitosť pravé díry

Příloha č. 5 – kruhovitosť levé díry



Příloha č. 2 – naměřené hodnoty strojem Werth ScopeCheck® FB 3D CNC

Kus 1	Kus 2	Kus 3	Kus 4	Kus 5	Kus 6	Kus 7	Kus 8
7,3718	7,3711	7,3708	7,3709	7,3714	7,3703	7,3707	7,3711
0,1326	0,1336	0,1347	0,1333	0,136	0,1328	0,135	0,1338
7,4709	7,4707	7,4721	7,4688	7,4684	7,4692	7,4736	7,4653
0,1753	0,1716	0,1713	0,178	0,1591	0,1414	0,1804	0,159
303,2183	303,2178	303,2155	303,2139	303,2135	303,2143	303,2211	303,2164

Kus 9	Kus 10	Kus 11	Kus 12	Kus 13	Kus 14	Kus 15	Kus 16
7,371	7,3713	7,371	7,3703	7,3717	7,3708	7,3711	7,3713
0,1318	0,1344	0,1344	0,1336	0,1334	0,1345	0,133	0,1339
7,4714	7,4717	7,4669	7,473	7,4722	7,4679	7,4679	7,4668
0,1747	0,175	0,1451	0,1786	0,177	0,1465	0,1746	0,1479
303,2168	303,2183	303,2174	303,2202	303,2188	303,2164	303,2206	303,2167

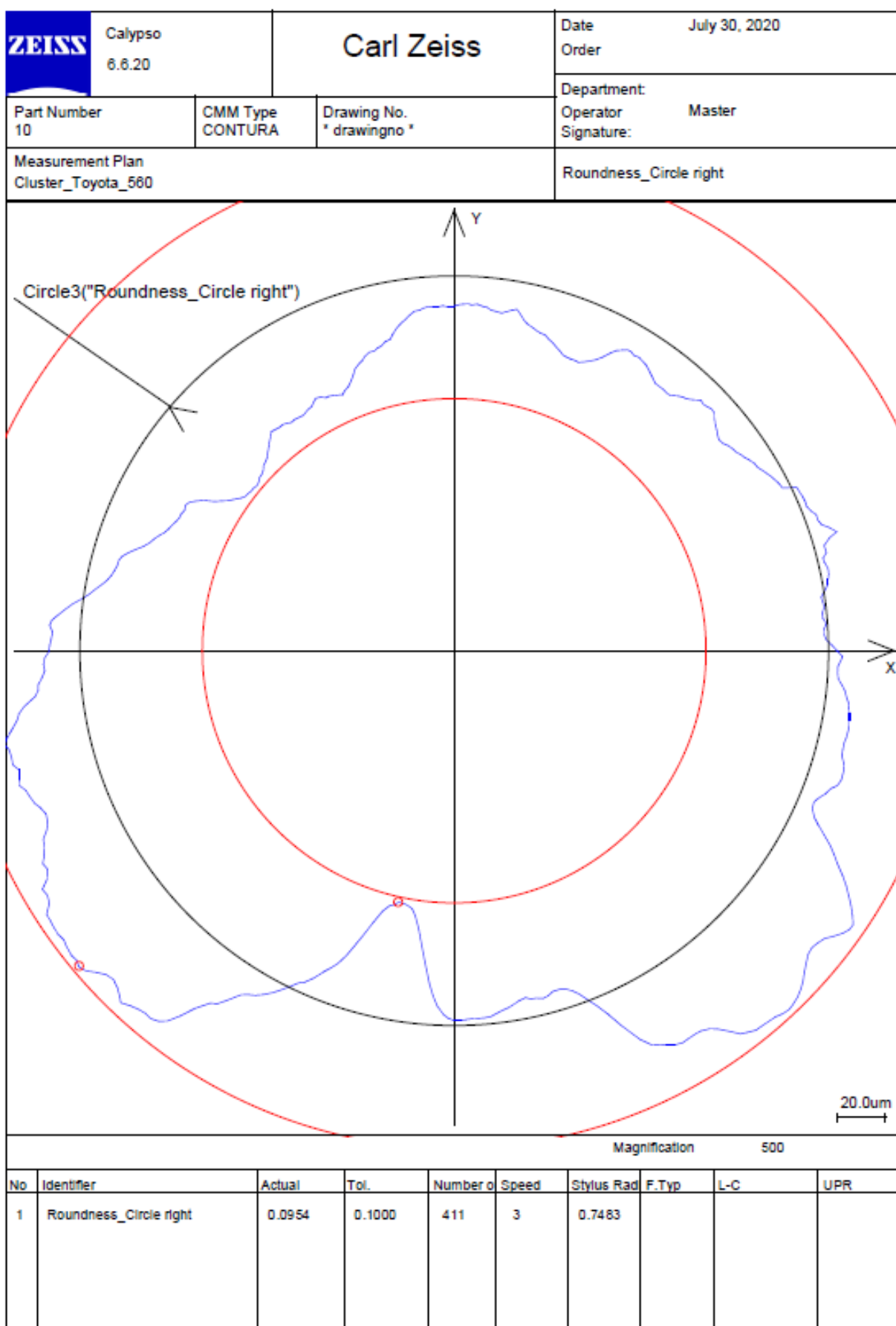
Kus 17	Kus 18	Kus 19	Kus 20	Kus 21	Kus 22	Kus 23	Kus 24
7,3715	7,3702	7,37	7,371	7,3709	7,3712	7,371	7,3707
0,133	0,1335	0,1327	0,1336	0,134	0,1328	0,132	0,1336
7,4672	7,4677	7,465	7,4668	7,4669	7,4706	7,4714	7,4668
0,1771	0,1466	0,144	0,1473	0,1504	0,1761	0,1621	0,1441
303,2213	303,2194	303,22	303,2218	303,2221	303,225	303,2246	303,2234

Kus 25	Kus 26	Kus 27	Kus 28	Kus 29	Kus 30
7,3708	7,3715	7,3713	7,3716	7,3707	7,3705
0,1331	0,1332	0,1342	0,1336	0,1336	0,1329
7,4658	7,4707	7,4672	7,4653	7,4668	7,4653
0,1486	0,1725	0,1475	0,1394	0,144	0,1458
303,2236	303,2263	303,2228	303,221	303,2227	303,2226

Příloha č. 3 – naměřené hodnoty strojem Zeiss Contura

Kus 1	Kus 2	Kus 3	Kus 4	Kus 5	Kus 6	Kus 7	Kus 8	Kus 9	Kus 10
7,3694	7,3704	7,3736	7,3738	7,3738	7,374	7,3731	7,3739	7,3733	7,3733
0,0931	0,0885	0,096	0,0957	0,0947	0,0959	0,0953	0,0948	0,0952	0,0948
7,4516	7,4523	7,4539	7,4503	7,45	7,4503	7,45	7,4509	7,4506	7,4504
0,0396	0,0486	0,0436	0,0593	0,0602	0,0594	0,0583	0,0608	0,0607	0,06
303,26	303,26	303,26	303,26	303,26	303,26	303,26	303,25	303,25	303,25
52	11	14	19	22	19	03	94	91	91

Příloha č. 4 – kruhovitost pravé díry



Příloha č. 5 – kruhovitost levé díry

