

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ  
A METROLOGIE**



**VYUŽITÍ CHROMATICKÉHO SENZORU BÍLÉHO SVĚTLA  
V RÁMCI KONTROLY KVALITY**

**CHROMATIC WHITE LIGHT SENSOR AND THEIR APPLICATION IN  
QUALITY CONTROL**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**AUTOR PRÁCE:** Bc. Jiří Kotrč  
**VEDOUCÍ PRÁCE:** Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
**STUDIJNÍ PROGRAM:** Strojní inženýrství  
**STUDIJNÍ OBOR:** Výrobní a materiálové inženýrství

Praha 2018

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kotrč** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **420459**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Využití chromatického senzoru bílého světla v rámci kontroly kvality**

Název diplomové práce anglicky:

**Chromatic white light sensor and their application in quality control**

Pokyny pro vypracování:

1. Dělení souřadnicových měřicích systémů
2. Snímací systémy využívané v oblasti souřadnicového měření
3. Výhody a nevýhody senzoru bílého světla, typické aplikace
4. Posouzení možností měření zvoleného senzoru na stroji O-Inspect
5. Návrh plánu měření vybraného dílu s využitím multisenzorového CMM

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:


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

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

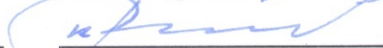
Datum zadání diplomové práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2018**

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

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

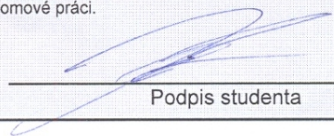
  
Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

24.4.2018  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a veškeré použité informační zdroje jsou uvedeny v příloženém seznamu.

V Praze dne 17. 7. 2018

.....

Jiří Kotrč

## **Poděkování**

Tímto bych velice rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Liborovi Beránkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a velmi ochotný, odborný přístup při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat všem kolegům z Ústavu obrábění, projektování a metrologie za rady a pomoc při realizaci praktické části této práce.

Rovněž bych tímto rád vyjádřil velký dík mé rodině za podporu během celého mého studia.

## **Anotace**

Technickým vývojem a rozvojem oboru souřadnicové měřicí techniky dochází v praxi k používání nových typů sensorik, mezi něž se řadí i chromatický sensor bílého světla, který je obsahově předmětem této práce. V práci je zkoumáno chování této sensoriky zakomponované na multisenzorovém souřadnicovém měřicím stroji v závislosti na zvolených vlivech. Výsledky zahrnuté v této práci by mohly posloužit jako vodítko pro možné použití tohoto senzoru pro případné aplikace. Dále je v praktické části chromatický sensor bílého světla aplikován pro měření tloušťek transparentních materiálů. Současně práce v teoretické části pojednává o dnes nejčastěji používaných strojích a snímacích systémech v oblasti souřadnicové měřicí techniky.

## **Klíčová slova**

Souřadnicové měřicí stroje, Souřadnicové měřicí systémy, Multisenzorová měřicí technika, Snímací systémy, Chromatický sensor bílého světla

## **Annotation**

The technical development of the field of coordinate measuring techniques brings new types of sensors, including a chromatic white light sensor, which is the subject of this diploma thesis. It studies influence of selected factors on this sensor, which is built in multisensor CMM. The results included in this work could serve as guide to the possible use of this sensor for potential applications. In addition, the chromatic white light sensor is applied to measure the thickness of transparent materials in practical part of this work. Besides other things, in theoretical part the thesis deals with the most frequently used machines and sensors in the field of coordinate measuring techniques.

## **Keywords**

Coordinate measuring machines, Coordinate measuring systems, Multisensor measuring technique, Probing systems, Chromatic white light sensor

# Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk: .....	8
<b>1. Úvod .....</b>	<b>9</b>
<b>2. Souřadnicové měřicí stroje .....</b>	<b>9</b>
2.1. Kartézsky uspořádané CMM .....	12
2.1.1. Tomograf (Počítačová tomografie) .....	17
2.2. Nekartézsky uspořádané CMM .....	19
2.2.1. CMM se sférickým souřadným systémem .....	19
2.2.1.1. Laser Tracker .....	19
2.2.1.2. Laser radar .....	21
2.2.1.3. Měřicí ramena .....	24
2.2.1.4. Trackované scannery .....	25
2.2.1.5. Optické scannery .....	26
2.2.1.6. iGPS .....	27
2.2.2. CMM s cylindrickým souřadným systémem .....	29
2.3. Možnosti automatizace souřadnicových měřicích strojů .....	30
<b>3. Snímací systémy používané v oblasti CMM .....</b>	<b>32</b>
3.1. Kontaktní snímací systémy .....	33
3.1.1. Spínací kontaktní systémy .....	33
3.1.2. Kontaktní skenovací snímací systémy .....	35
3.2. Bezkontaktní snímací systémy .....	36
3.2.1. Kamerové systémy .....	40
3.2.2. Laser scanner .....	44
3.2.3. Pruhová projekce .....	47
3.2.4. Chromatický senzor bílého světla .....	47
3.3. Hlavy snímacího systému .....	49
3.3.1. Pevné hlavy .....	49
3.3.2. Indexovatelné hlavy .....	50
<b>4. Praktická aplikace chromatického senzoru bílého světla .....</b>	<b>51</b>
4.1. Představení použité souřadnicové měřicí techniky .....	51
4.1.1. Souřadnicový měřicí stroj – Zeiss O-Inspect 543 .....	51
4.1.2. Souřadnicový měřicí stroj – Zeiss Prismo .....	56
4.2. Vliv typu povrchu, jednotlivých parametrů nastavení CWS, rychlosti a naklopení na přesnost měření CWS .....	57
4.2.1. Lapovaná plocha .....	58



4.2.1.1.	Měření rovinnosti na CMM Zeiss Prismo .....	58
4.2.1.2.	Vliv nastavení CWS na rovinnost lapované plochy .....	60
4.2.1.3.	Vliv rychlosti pohybu CWS na rovinnost lapované plochy .....	66
4.2.1.4.	Vliv naklopení lapované plochy vůči optické ose CWS na její rovinnost.....	71
4.2.2.	Broušená plocha.....	78
4.2.2.1.	Měření rovinnosti na CMM Zeiss Prismo .....	78
4.2.2.2.	Vliv nastavení CWS na rovinnost broušené plochy .....	80
4.2.2.3.	Vliv rychlosti pohybu CWS na rovinnost broušené plochy .....	87
4.2.2.4.	Vliv naklopení broušené plochy vůči optické ose CWS na její rovinnost ....	92
4.3.	Měření tloušťky chromatickým senzorem bílého světla .....	99
4.3.1.	Měření tloušťky čočky v její optické ose .....	99
4.3.2.	Měření tloušťky .....	102
4.3.3.	Měření tloušťky CWS na montážní sestavě.....	103
<b>5.</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>105</b>
	Použité informační zdroje: .....	107
	Seznam obrázků: .....	113
	Seznam tabulek:.....	115
	Seznam grafů:.....	116
	Seznam příloh:.....	116
	Přílohy: .....	117

## Seznam použitých symbolů a zkratek:

CAD	Computer Aided Design – počítačem podporované navrhování
CCD	Charge Coupled Device – zařízení s vázanými náboji
CMM	Coordinate Measuring Machine – souřadnicový měřicí stroj
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
CMS	Coordinate Measuring Systém – souřadnicový měřicí systém
CT	Computed Tomography – počítačová tomografie
CWS	Chromatic White Light Sensor – chromatický senzor bílého světla
DCC	Direct Computer Control – přímé počítačové řízení
GPS	Global Positioning System – globální polohovací systém
iGPS	Indoor Global Positioning Systém
LR	Laser Radar
MPE	Maximum Probing Error – největší dovolená chyba
MPL	Maximum Permissible Limit – největší přípustná mez
MPT	Maximum Probing Time – největší možná doba zkoušky
SMR	Spherically Mounted retro Reflector – přenosný sférický koutový odražeč
STL	Stereolithography – stereo litografická síť
ToF	Time of Flight – doba letu

# **1. Úvod**

Tato práce se zabývá problematikou úzce spjatou se systémem managementu kvality. Zajištění požadované kvality je klíčové nejen pro správnou funkčnost finálního výrobku, ale zejména pro samotný výrobní podnik, který tak dokazuje, že je schopný plnit podmínky zákazníka, a tak si zajistit konkurenceschopnou pozici na trhu. Jednou ze složek spadající do systému managementu kvality je kromě plánování kvality, prokazování kvality, zlepšování kvality i kontrola kvality, jejíž úkolem je mimo jiné i rozměrová kontrola výrobku dle výkresové dokumentace. V dnešní době velice důležitým a hojně využívaným nástrojem pro měření výrobků v rámci kontroly kvality podniku jsou tzv. souřadnicové měřicí stroje z anglického jazyka označované jako Coordinate Measuring Machines (CMM) nebo také je používán historicky mladší termín souřadnicové měřicí systémy, v anglickém jazyce označované jako Coordinate Measuring systems (CMS). V této práci je používán první zmíněný termín (CMM).

Dílčím cílem této práce je poskytnout ucelený přehled a informace o dnes nejčastěji používaných typech souřadnicových měřicích strojů a jejich využití v praxi (viz kapitola 2.). Dále pak ve třetí kapitole seznámit čtenáře se snímacími systémy, které jsou používány v oblasti CMM včetně stručného principu, na němž jednotlivé typy senzorů fungují. A nakonec podrobněji analyzovat senzor bílého světla, což je snímací systém, který existuje na trhu relativně krátkou dobu a v praxi ještě nejsou podrobně prozkoumány jeho vlastnosti.

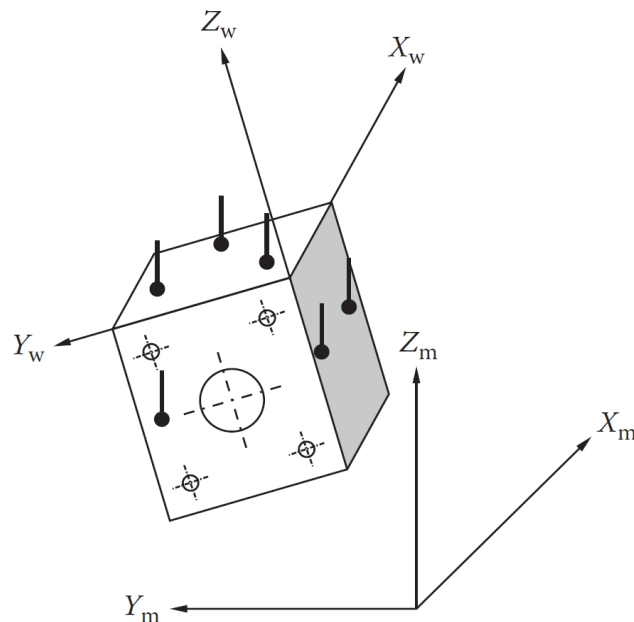
## **2. Souřadnicové měřicí stroje**

Cílem této kapitoly je seznámit čtenáře s problematikou souřadnicových měřicích strojů. V této práci tím jsou myšlena zařízení, která jsou sama schopna kontrolovat kvalitu měřených dílů bez ohledu na to, jaký typ snímacího systému k tomu využívá, neboť kvůli zvyšujícím se nárokům na kontrolu dílů a pro co největší univerzálnost použití existují stroje, jež umožňují aplikovat více typů snímacích systémů. Problematika snímacích systémů je podrobněji rozepsána v kapitole 3.

Souřadnicové měřicí stroje jsou stroje, jež fungují na principu snímání (extrakce) bodů z konkrétní součásti umístěné v pracovním prostoru tohoto stroje. A následně dochází k

porovnání tvaru vzniklého z extrahovaných bodů s požadovaným tvarem předepsaným na výkresové dokumentaci a vyhodnocení veškerých potřebných metrologických informací jako jsou rozměry, tvary, polohy a orientace. Vlivem vývoje se v dnešní době naměřené body (data) zpracovávají přes počítačové rozhraní, což umožňuje porovnávat data přímo s konstrukčním softwarem a důkladněji je analyzovat.

Body jsou z prostoru získávány buď manuálně operátorem anebo automaticky řídicím systémem stroje za použití zvolené sensoriky a následně těmto bodům jsou přiřazeny konkrétní souřadnice. Tyto souřadnice jsou provázány přes minimálně 2 souřadné systémy (viz obrázek 1). První souřadný systém je stroje a popisuje jeho pracovní prostor, který je na obrázku popsán osami  $X_m$ ,  $Y_m$  a  $Z_m$ . Další souřadné systémy jsou vztažené k měřenému objektu a může jich být teoreticky nekonečně mnoho. Tyto lokální systémy jsou vždy v pracovním prostoru stroje určeny výchozím bodem nějakým způsobem vztaženým k měřenému objektu. Na obrázku 1 je tímto bodem horní roh kvádru a určuje počátek lokálního souřadného systému (osy  $X_w$ ,  $Y_w$  a  $Z_w$  na obrázku číslo 1) [1] [2].



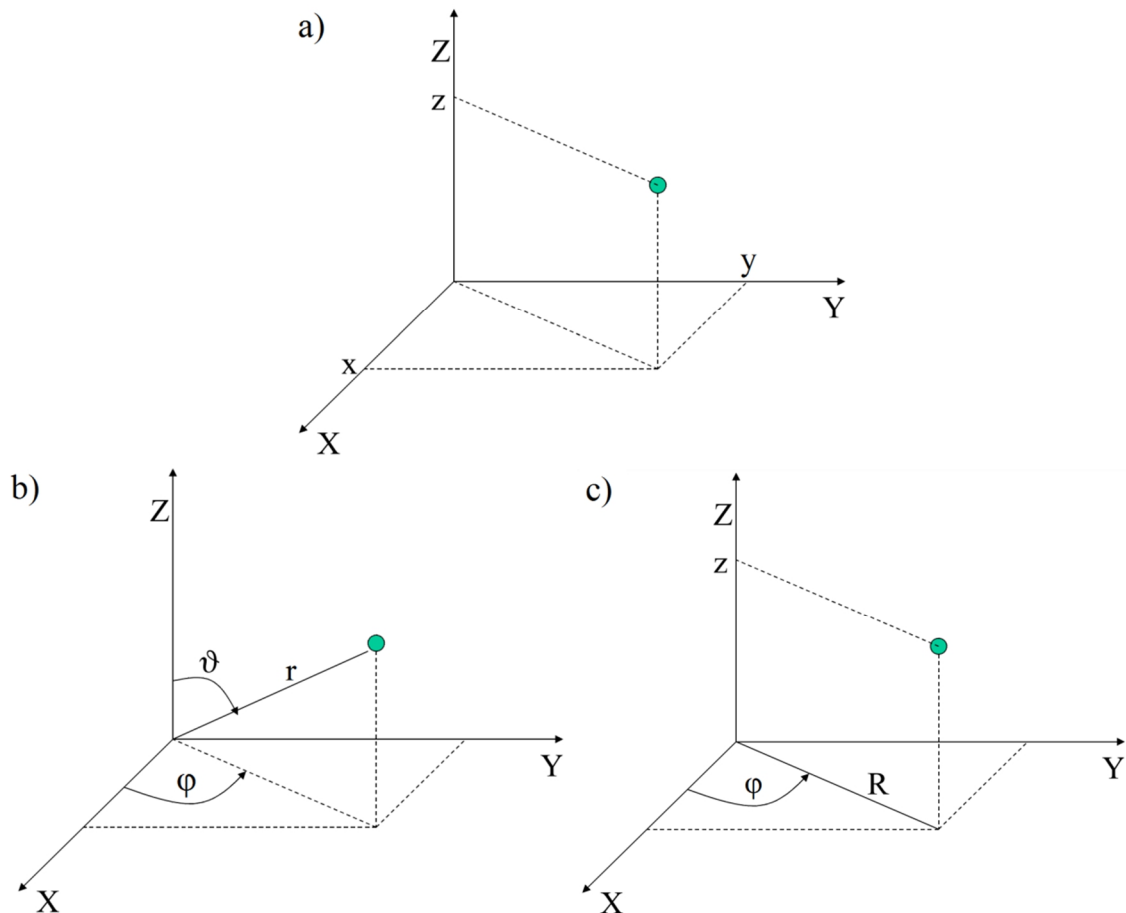
Obrázek 1: Souřadný systém stroje a lokální souřadný systém objektu [1]

V dnešní době jsou kvůli všeobecnému vývoji kladeny na nově vyráběné díly čím dál vyšší požadavky a neustále rostou. To samozřejmě souvisí i s výslednou přesností a tvarovou složitostí těchto výrobků, kdy výrobky nejsou již tvořeny pouze základními geometrickými elementy, ale čím dál častěji obecnými tvarovými plochami, z čehož logicky plynou i vyšší nároky na kontrolu, a tedy i CMM. Proto dnešní výrobci měřicí



techniky nabízejí velkou škálu souřadnicových strojů, aby si zákazník mohl vybrat takový stroj, který bude optimální pro jejich konkrétní aplikaci.

Obecně lze CMM techniku dělit z mnoha kritérií. Avšak tato práce dělí souřadnicové stroje primárně dle souřadného systému, a to na kartézsky uspořádané a kartézsky neuspořádané. Plus na konci této kapitoly bude ještě uvedeno krátké rozdělení dle možného stupně automatizace.



Obrázek 2: Souřadné systémy používané CMM: a) kartézský, b) sférický, c) cylindrický [3]

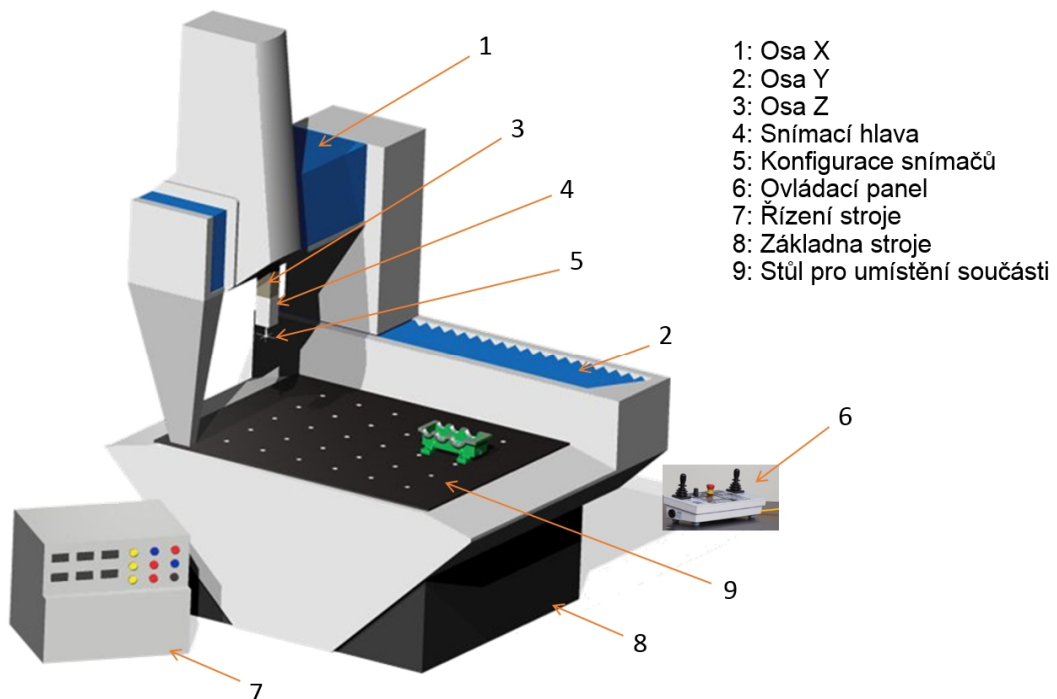
Kartézsky uspořádaný systém popisuje body v prostoru souřadnicemi X, Y a Z pomocí tří na sobě kolmých ortogonálních os, viz obrázek 2a. V případě kartézsky neuspořádaných systémů, mohou stroje pracovat ve sférickém anebo cylindrickém souřadném systému. Prostorový bod ve sférickém systému je popsán jeho vzdáleností od počátku souřadného systému, neboli radiusvektorem  $r$  a dvěma uhlovými údaji. V metrologii jsou označovány jako azimut ( $\phi$ ) a elevace ( $\vartheta$ ), oba jsou znázorněny na obrázku 2b. Posledním systémem je cylindrický (obrázek 2c), jenž bod v prostoru popisuje průvodičem  $R$  ležícím nejčastěji v rovině XY, azimutem ( $\phi$ ) a souřadnicí na ose Z, tedy výškou [3].

## 2.1. Kartézsky uspořádané CMM

Jedná se o stacionární zařízení, jehož měření je realizováno v kartézském souřadném systému a udává polohu bodu v souřadnicích X,Y a Z, jak již bylo uvedeno na začátku kapitoly (viz obrázek 2), přičemž snímací systém stroje má vlastní pohon ve všech osách. Z tohoto důvodu jsou tyto stroje vybaveny velice přesným odečítáním všech vzdáleností v jednotlivých osách, které je plně kooperováno s počítačem. Pro dosažení co nejvyšší přesnosti konstrukce těchto strojů, by měly být respektovány následující požadavky:

- nízká hmotnost,
- rozměrová stabilita,
- vysoká schopnost tlumení vibrací,
- nízký koeficient teplotní roztažnosti,
- vysoká tepelná vodivost.

Ilustrační obrázek kartézsky uspořádaného stroje i s jednotlivými komponenty je uveden na obrázku 3. Stroj se obecně skládá ze základny, která musí splňovat vysoké nároky na tuhost i při dynamickém zatížení. Dále z pracovního stolu, ke kterému se upíná měřená součást, u moderních CMM bývá nejčastěji vyroben z granitu, neboli žuly. Jedná se o kámen, který je velice odolný proti opotřebení a má velice dobrou rozměrovou stabilitu.



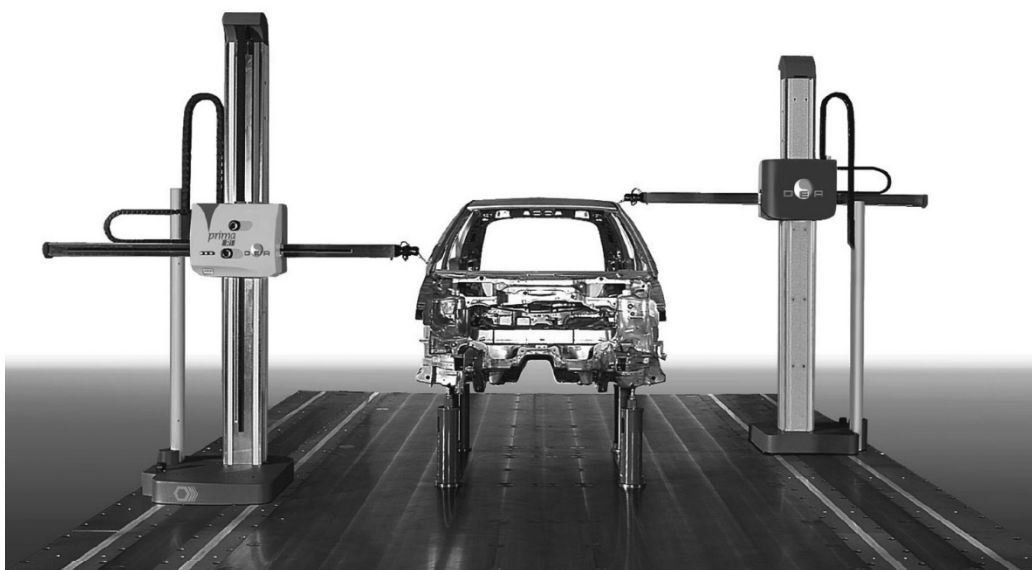
Obrázek 3: Ilustrační obrázek kartézsky uspořádaného CMM [4]

Další důležitou částí stroje je konstrukce, ke které je upnuta snímací hlava, což může být dle typu CMM například most, portál, rameno atd. I na tuto konstrukční část je kladen důraz především na tuhost, rozměrovou a tvarovou stálost.

Nicméně z fyzikálního principu (mechanické opracování dílu, materiálové vlastnosti) nikdy nebude souřadnicový stroj vyroben tak, aby jeho konstrukce neovlivňovala přesnost měření. Pro vyšší přesnost měření jsou souřadnicovým strojům vytvářeny tzv. korekční mapy, jejichž účelem je kompenzovat nepřesnosti způsobené samotnou konstrukcí stroje. Jako příklad lze uvést kompenzaci ohybových účinků na nosníku, jenž nese hmotnost supportu s pinolou. Mimo tuto statickou kompenzaci některé stroje navíc ještě disponují tzv. dynamickými korekcemi, které slouží pro kompenzaci nepřesností vznikajících vlivem setrvačných účinků konstrukce při pohybu stroje, které způsobují nepřesnost zejména při vysokorychlostním skenování kontaktními skenovacími systémy (viz kapitola 3.1.2.). Kartézsky uspořádané stroje dle konstrukčního uspořádání lze rozdělit na tyto 4 základní a nejběžnější typy, které budou podrobněji rozepsány na následujících stránkách. V závorce jsou vždy uvedeny jejich anglické ekvivalenty [4] [5] [6].

### **Stojanový typ (Horizontal arm)**

Základním konstrukčním prvkem tohoto typu je nosný sloup, k němuž je horizontálně upevněné měřicí rameno, které nese na svém konci snímací hlavu. Sloup a rameno buď zajišťují pohyb ve všech třech osách, tudíž se měřený díl nepohybuje nebo pohybuje



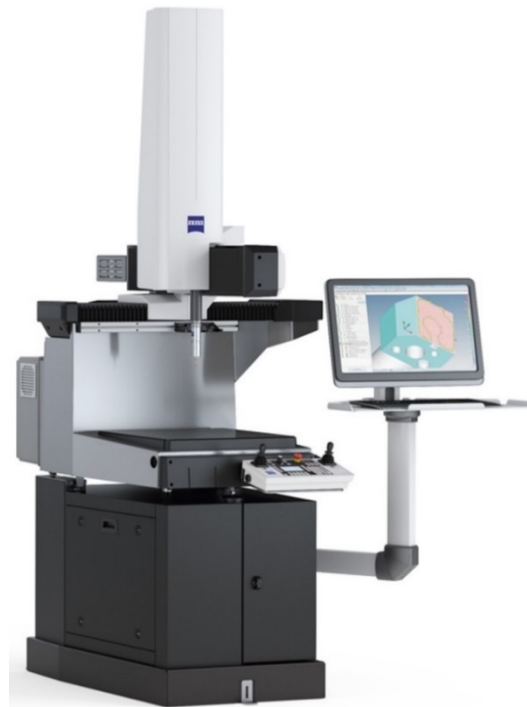
*Obrázek 4: Aplikace stojanového CMM pro měření karoserie automobilu [1].*

měřicí sondou ve dvou osách (vertikální a horizontální) a pohyb ve třetím horizontálním směru je zajišťován pracovním stolem, ke kterému je upnutý dílec. Příklad stojanového typu souřadnicového měřicího stroje je uveden na obrázku 4. Rychlost a přesnost měření závisí především na velikosti měřené součásti. Pro měření velkých součástí, jako je například karoserie automobilu (viz obrázek 4), lze využít dvou synchronně měřících CMM stojanového typu pro zvýšení produktivity měření.

Výhodou tohoto typu CMM je jednoduchá konstrukce a dobrý přístup ze všech stran k měřené součásti. Naopak nevýhodou je nízká dynamická tuhost způsobená především pohybující se velkou hmotností buď samotného stroje, nebo dílů s vyšší hmotností, která má vliv i na konečnou přesnost [1] [5].

### **Výložníkový typ (Cantilever)**

Tento typ stroje je tvořen konzolovým pohyblivým ramenem, které koná pohyb v horizontální ose. Na tomto rameni je dále umístěn pojezd s pinolou, který se pohybuje v druhém horizontálním směru a poslední pohyb, ve směru vertikálním, koná samotná pinola, která nese i snímací hlavu. Jelikož se u tohoto typu nepohybuje měřený díl, tak lze měřit i relativně těžké díly bez ztráty přesnosti. Charakteristikou tohoto typu je nízká hmotnost pohybujících se částí stroje, což umožňuje používat vysoké rychlosti



Obrázek 5: Výložníkový typ CMM - Carl Zeiss Duramax [7]

pojezdů. Další výhodou je přístup k měřenému dílu, který je otevřen ze tří stran. Naopak mezi hlavní nevýhody patří vznik ohybového momentu, a to zejména v okamžiku, kdy se pojezd s pinolou dostane do krajní polohy konzolového ramene. Z tohoto „tuhostního“ důvodu bývá toto rameno poměrně krátké, což souvisí s další nevýhodou tohoto typu, a to je omezený pracovní prostor, který je právě limitován délkou tohoto ramene [5] [8]. Ukázka výložníkového typu CMM je na obrázku 5.



## Mostový typ (Moving/Fixed Bridge)<sup>1</sup>

Jedná se v současné době asi o nejrozšířenější typ kartézsky uspořádaného souřadnicového stroje a používá se především pro středně velké díly. Obecně je tento typ stroje konstrukčně tvořen mostem, na němž se pohybuje support s pinolou a pracovním stolem, na kterém je upnut měřený objekt. Existují dvě varianty tohoto typu stroje lišící se svou kinematikou. U první varianty se v jedné horizontální ose pohybuje celá mostová konstrukce a u té druhé zmiňované ji zajišťuje pracovní stůl. Zbývající dva pohyby v kartézských osách vždy zajišťuje support a pinola. Ukázka obou variant je uvedena na obrázku číslo 6. Obě varianty mají své výhody a nevýhody. Předností pohyblivého mostu je ten fakt, že se vždy pohybuje stejná hmotnost, a to hmotnost mostu, která se maximálně může měnit podle hmotnosti použité konfigurace snímačů, což znamená, že stroj používá přibližně stejnou dynamickou korekci bez ohledu na hmotnost dílu. Zatímco v případě pohyblivého stolu je v pohybu rozdílná hmotnost, která se odvíjí od hmotnosti měřeného dílu, s nímž stůl hýbe, a tak stroj vždy musí kompenzovat jiné dynamické účinky. Tímto faktem je ovlivněna přesnost měření, neboť dynamické korekce pro jednu hmotnost pohyblivé mostové konstrukce lze určit přesněji než pro různé kombinace v případě pohyblivého stolu. Naopak u pohyblivého mostu dochází ke kroucení konstrukce tím, že je poháněna jedna strana konstrukce a druhá je pouze táhnuta. To má za následek určitou nepřesnost vlivem úhlových chyb, neboť odměřování není umístěno centrálně jako u pevného stolu.



Obrázek 6: Mostový typ CMM - vlevo s pohyblivým mostem (Carl Zeiss Accura), vpravo s pevným mostem (Hexagon Leitz Infinity) [9] [10]

Obecně výhodou mostové konstrukce je především redukce ohybových momentů oproti výložníkové konstrukci a zároveň i vysoká tuhost, která je ještě vyšší u varianty s pevným mostem, ale ovšem na úkor snížení rychlosti pojezdu v důsledku vysoké hmotnosti granitového stolu. Mimo jiné tento typ má velice dobrou přesnost a opakovatelnost, proto se používá pro přesné měření v laboratorních podmínkách. Na stranu druhou, nevýhodami jsou omezený pracovní prostor a jeho horší přístupnost [1] [5].

### **Portálový typ (Gantry)<sup>2</sup>**

Již z obrázku 7, na kterém je portálový typ vyobrazen, je patrné, že tento typ CMM je specifický svým velkým pracovním prostorem, který je vhodný pro měření objektů o velkých rozměrech, jako jsou velká vozidla nebo letadlové konstrukce. Základem této

masivní konstrukce je nosná část tvořená sloupy, na níž se pohybuje v jednom horizontálním směru portál. Portál je poháněn z každé jeho strany jedním motorem, aby se neměl tendenci vychylovat při pohybu. Na portálu je opět přítomen support vykonávající pohyb v druhém horizontálním směru a v posledním vertikálním směru se pohybuje



*Obrázek 7: Portálový typ CMM - Carl Zeiss MMZ E [11]*

pinola vystupující ze supportu. Zařízení je zpravidla sestaveno až u koncového zákazníka a následně musí být vytvořena korekční mapa.

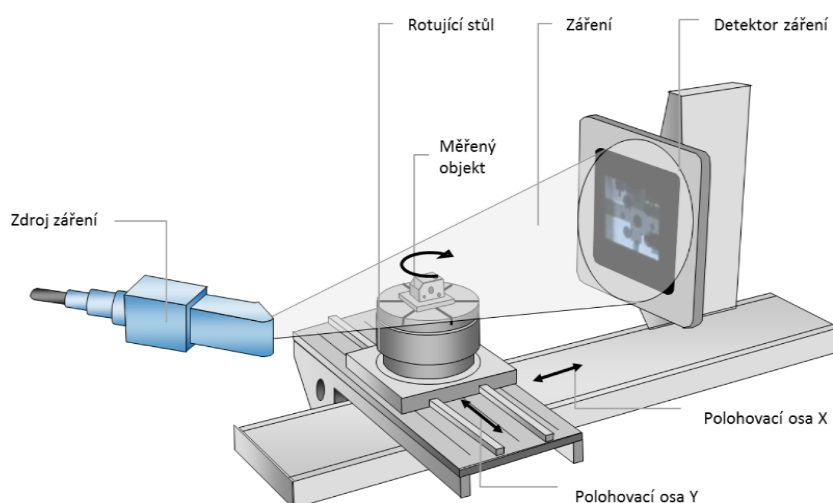
Mezi přednosti tohoto stroje, kromě jeho velkého pracovního prostoru, patří také velice dobrý přístup ze všech stran k měřenému objektu. Základní nevýhodou je především jeho přesnost, která z důvodu pohybu značné hmoty ve velkých rozsazích je nižší než u menších typů CMM [1] [4].

---

<sup>1,2</sup> Poznámka: V této práci jsou názvy jednotlivých konstrukčních typů převzaty z anglické literatury, ve které se liší oproti české normě ČSN EN ISO 10360-1, jež uvádí portálový typ jako typ mostový a naopak [12].

### 2.1.1. Tomograf (Počítačová tomografie)

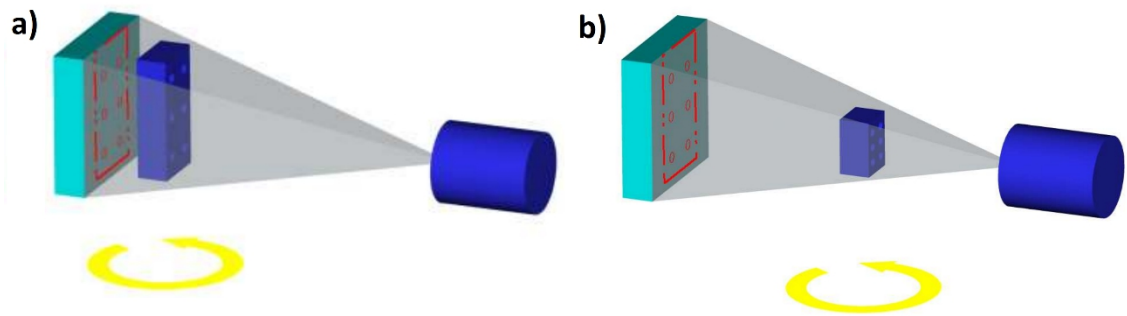
Do kartézsky uspořádaných strojů je možné rovněž zařadit tomografy, které kromě jedné rotační osy také využívají tři na sebe kolmých translačních os. Počítačová tomografie, nebo také anglicky computed tomography (CT), je z hlediska použití v metrologii relativně novou technologií. Dříve byla tomografie v průmyslových odvětvích používána zejména pro inspekci materiálu, a to především z důvodu nedostatečné přesnosti. Někteří výrobci řešili nedostatečnou přesnost například kombinací s dotykovým snímačem, avšak postupným vývojem se přesnost této technologie zvýšila takovou mírou, že moderní tomografy se používají pro metrologické účely i bez dotykových sond. Konstrukční uspořádání tomografů je obdobné a skládá se ze tří základních prvků: zdroj rentgenového záření, rotační stůl a detektor. Schéma tomografu je vyobrazeno na obrázku 8.



Obrázek 8: Schéma tomografu [4]

Princip počítačové tomografie je založen na schopnosti rentgenového záření pronikat skrz objekty. Vytvořené záření, které projde měřeným dílem, je částečně pohlcováno v závislosti na materiálu a složitosti dílce. Tato absorpce záření přímo souvisí s protonovým číslem daného prvku, což znamená, že například se budou snáze prozařovat díly plastové než díly ocelové. Procházející záření je následně zachyceno detektorem záření a pomocí výpočetní techniky je vytvořen dvourozměrný obraz (rentgenogram). Pro získání 3D objemového modelu se využívá rotačního stolu, na němž je umístěn měřený dílec a otáčí se kolem své svislé osy. Během tohoto pohybu jsou

nasnímány stovky 2D rentgenogramů na detektoru, z nichž se složí výsledný 3D model. Kromě rotačního pohybu kolem osy stolu se dílem ještě polohuje ve třech osách (osy X, Y a Z), které byly zmiňovány v úvodu podkapitoly. Osou X se nastavuje potřebné zvětšení obrazu, viz obrázek 8 a 9. Polohovací osa Y slouží k vycentrování dílu tak, aby jeho obraz byl snímán na středu detektoru a osa Z se využívá k výškovému nastavení rotačního stolu.



Obrázek 9: Zvětšení dílu dle polohy a) nízké zvětšení b) vysoké zvětšení [13]

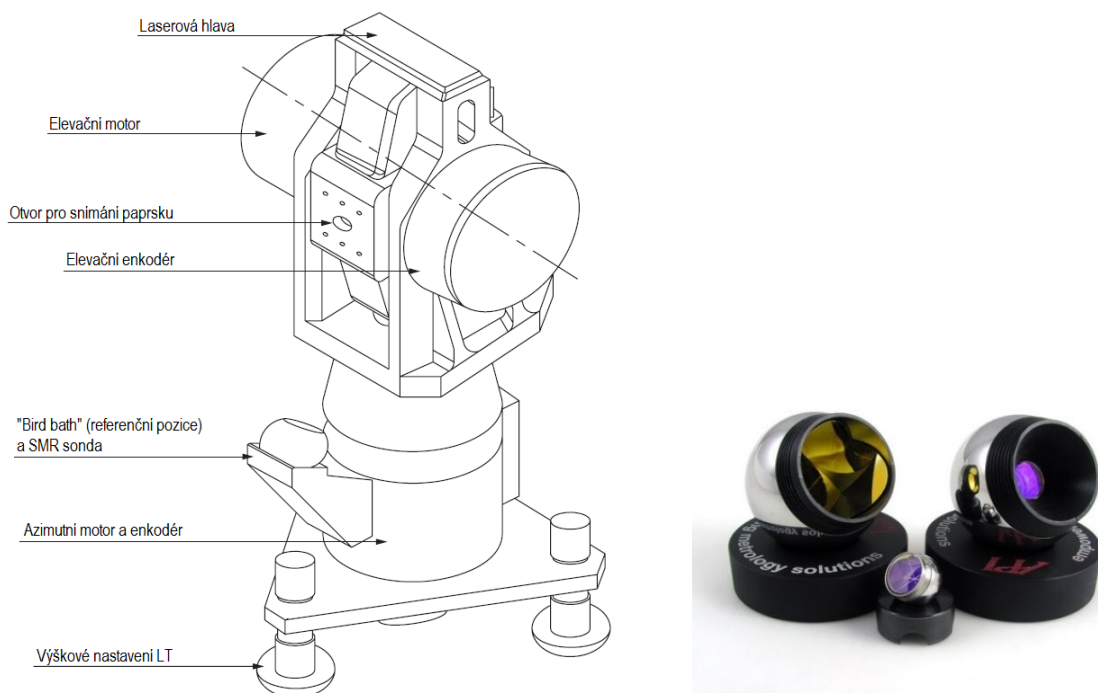
Mezi přednosti této technologie patří zejména možnost vytvářet virtuální řezy snímaného tělesa. CT tak umožňuje kromě dat o povrchu snímaného tělesa, získat i informace o jeho vnitřní struktuře, jako jsou vnitřní tvary nebo například porozita a dutiny u odlévaných dílů, aniž by byla nutná jeho destrukce. Zároveň dokáže analyzovat i celé montážní sestavy sestavené za takových podmínek, aby v praxi korektně vykonávaly svou funkci. Hlavní nevýhodou je limitovaná velikost dílce, kterým jsou ještě veškeré složky rentgenového záření schopné prostoupit a být pohlceny na detektoru. Tato technologie se používá zejména pro nedestruktivní kontrolu dílů, které mají nedostupné nebo těžce dostupné vnitřní geometrické elementy. Dále se aplikuje pro kontrolu dílů, u kterých je potřeba analýza jejich homogenity anebo dílů, které se skládají z rozdílných typů materiálů. Mimo jiné se tomografie používá při vývoji a zavádění nových výrobků do výroby, které se mohou snáze odlaďovat detailní tomografickou analýzou [1] [13] [14].

## 2.2. Nekartézsky uspořádané CMM

### 2.2.1. CMM se sférickým souřadným systémem

#### 2.2.1.1. Laser Tracker

Laser tracker je mobilní souřadnicový stroj určený především pro velkoobjemovou metrologii. Celé zařízení se většinou skládá ze stojanu, na kterém je umístěn samotný laser tracker a sondy s koutovým odražečem SMR (= Spherically Mounted retro Reflector). Výrobci ve většině případech nabízejí více velikostí SMR sond, kdy každá je vhodná pro jinou aplikaci a k nim různé nástavce pro snazší použití. Schématické vyobrazení laseru trackeru a SMR sond je na obrázku 10. Laser tracker v sobě sdružuje přesný laserový interferometr, polovodičový laser, uhlové polohovací motory, uhlové odměřovací systémy (enkodéry) a kompletní laserovou optiku a elektroniku v jednom kompaktním celku. Mimo jiné se na laser trackeru nachází tzv. „bird bath“, což je referenční pozice pro SMR sondu, která se využívá na začátku měření [1][15][16].



Obrázek 10: Schéma Laser Trackeru (vlevo) a ukázka SMR sond (vpravo) [1] [16]

Bod, který má být laser trackerem odměřen, je určený polohou SMR sondy v prostoru. Jelikož se jedná o zařízení pracující ve sférickém souřadném systému, tak souřadnice SMR sondy jsou určeny azimutem a elevací, které jsou odměřovány úhlovými senzory polohy (enkodéry). Pro určení vzdálenosti bodu v prostoru může laser tracker využít

dvou režimů. Tím prvním je režim založený na principu „time of flight“ (ToF), při kterém je do prostoru emitován laserový paprsek o známých charakteristikách a vzdálenost se poté vyhodnotí z doby, za kterou se vrátí zpět do laser trackeru. Druhý režim, který je přesnější, využívá interferometru pro odměření vzdálenosti v prostoru. Ačkoliv je tento režim přesnější nelze ho využít pro všechny aplikace, neboť pro interferometrické odměřování je potřeba neustálého vizuálního kontaktu mezi laser trackerem a SMR sondou. Jakmile je tento kontakt jednou přerušen, musí být sonda znovu umístěna do výchozí polohy (birth bath) a celé měření se opakuje. Veškeré získané údaje jsou následně přenášeny do počítače a příslušný software je vyhodnocuje a vytváří obraz měřené součásti, který je schopný poté porovnat s CAD modelem. Jak oba výše zmiňované principy (interferometrický a time of flight princip) fungují, je podrobněji vysvětleno v kapitole 3.2.

Hlavní uplatnění tohoto stroje je ve velkoobjemové metrologii, například pro měření velkých svařovacích konstrukcí, částí turbín, částí letadel, komponentů v energetickém průmyslu atp. [1] [15].

Obecné výhody laser trackerů:

- Velký měřicí rozsah, který se v závislosti na výrobci pohybuje v desítkách metrů a u některých výrobců dokonce překračuje hranici sto metrů. Jako příklad lze uvést laser tracker Vantage od firmy Faro, která udává maximální měřicí rozsah až 160 metrů [17].
- Mobilita, která je zaručena nízkou hmotností a malými rozměry celého zařízení, proto lze Laser tracker přenášet v transportním kufru.
- Relativně vysoká produktivita měření, která je mnohonásobně vyšší než v případě klasických metod. Zařízení umožňuje snímání nejen v bodovém režimu, ale i v režimu skenovacím, což opět zvyšuje produktivitu procesu. Navíc měřicí software umožňuje vytvořit protokoly ihned na místě měření [15].
- Vysoká univerzálnost z hlediska prostředí, ve kterém bude zařízení pracovat. Laser tracker je navržen pro práci v těžkém i průmyslovém prostředí. Většina těchto strojů má již od výrobce deklarováno určitý stupeň krytí IP (norma ČSN EN 60529), což umožňuje trvalé použití zařízení v těžkém průmyslovém i venkovním prostředí s vysokou prašností nebo vlhkostí a velkým rozptylem teplot. Jako

příklad lze uvést již jednou zmiňovaný laser tracker Vantage, kterou firma Faro zaručuje stupeň krytí IP 52 [15] [17].

Obecné nevýhody laser trackerů:

- Neustálý kontakt mezi laser trackerem a SMR sondou při přesnějším režimu měření interferometrem, což znesnadňuje celý proces měření.
- Nutnost přítomnosti osoby, která bude v prostoru pohybovat sondou, když není sondou pohybováno roboticky.

### 2.2.1.2. Laser radar

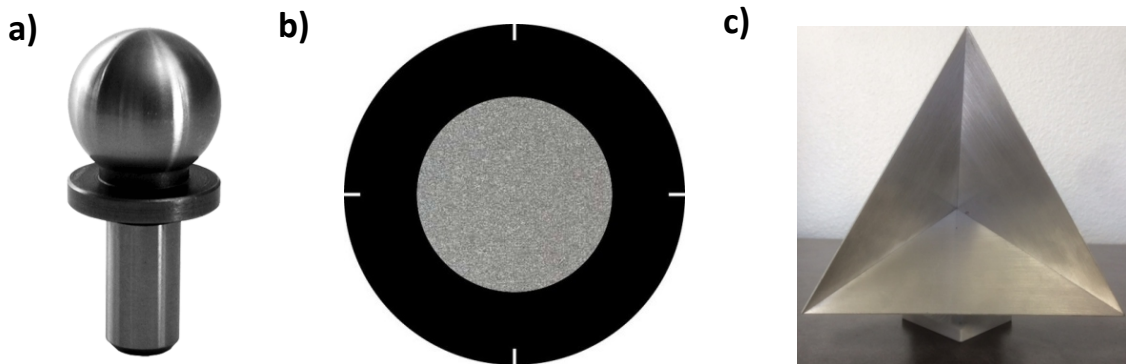
Laser radar (LR) je technologie bezkontaktního měření, jenž je historicky mladší než technologie laser trackeru a dalo by se říci, že z ní do určité míry vychází. LR může být používán manuálně operátorem nebo plně automaticky, kdy je vše řízeno pomocí počítačové techniky. Velkou výhodou tohoto zařízení je, že eliminuje jakoukoliv potřebu SMR sond nebo ručních sond, jako je tomu v případě laser trackerů a měří přímo předem nadefinované body. Používá se opět pro měření velkoobjemových dílů, například laser radar od společnosti Nikon, který je vyobrazen na obrázku 11, dokáže měřit díly až v rádiu 50 metrů [18]. Zařízení popisuje bod v prostoru pomocí elevace a azimutu plus radiusvektoru. Každý úhel je měřen jedním úhlovým senzorem polohy (enkodérem) a vzdálenost od měřeného bodu je měřena pouze jediným způsobem, a to time of flight.

Princip ToF je podobný principu, na kterém funguje radar. Nicméně laser radar vysílá do prostoru vlnění ve formě laserového paprsku a nikoliv rádiové vlny jako v případě radaru, proto se také někdy označuje jako lidar [1] [19].



Obrázek 11: Ukázka laser radaru - Nikon MV351 [18]

V praxi proces měření začíná tím, že LR zaměří předem rozmístěné referenční objekty, jako jsou záměrné koule, terče nebo trojboké odražeče (viz obrázek 12), jež slouží pro počáteční zjištění přesné polohy měřeného dílu v prostoru a pro následné navázání jednotlivých poloh měření po přepolohování LR.



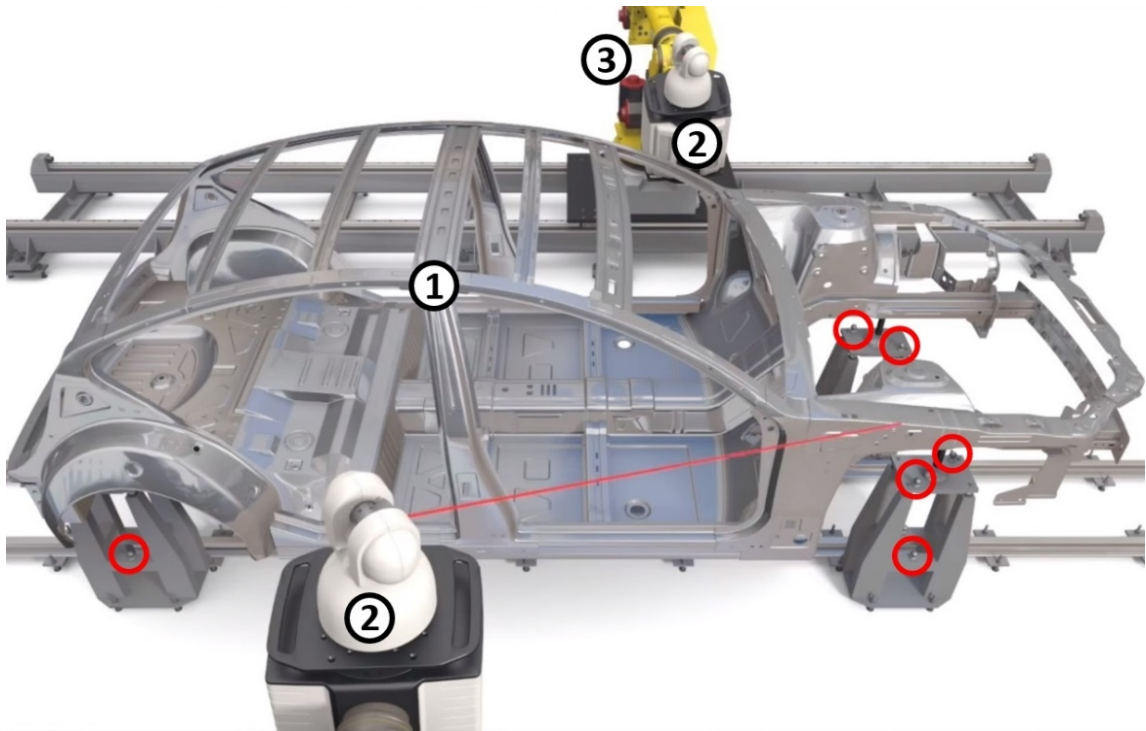
Obrázek 12: Referenční objekty: a) záměrná koule [20] b) záměrný terč [21] c) trojboký odražeč [22]

Tyto referenční objekty mohou být umístěné buď přímo na dílu, přípravku, na němž je díl připevněn nebo kdekoliv v prostoru laseru radaru. Například na obrázku 13 jsou tyto objekty (červeně zvýrazněné) umístěné na přípravku, na kterém je uchycena karoserie automobilu. Po získání souřadného systému měřeného dílce pak zařízení snímá předem nadefinované body tohoto dílce, pomocí počítačové techniky je následně porovná s CAD modelem a vyhodnotí. Celý proces může probíhat plně automaticky při předpřipravení měřicího programu, který umožňuje být vytvořen z CAD modelu v offline režimu, to znamená bez připojení ke stroji [23] [24].

Hlavní uplatnění má LR v automobilovém, leteckém a energetickém průmyslu. Zároveň má velký potenciál pro inline kontrolu dílů, především v oblasti automotive, jako je například kontrola karoserie automobilu. Zde se stává přímým konkurentem pro tradiční dotykové CMM stojanového typu (horizontal arm), kdy pro přesné měření je potřeba karoserii odebrat z produkční linky, přesunout ji do finančně nákladné metrologické místnosti, zde karoserii upevnit k dotykovému CMM a připravit veškeré potřebné dotykové sondy pro měření. V případě LR lze měřit karoserii inline, to znamená přímo ve výrobní lince, čímž odpadá čas a prostředky pro její přepravu. Další čas je šetřen samotným měřením, protože snímání bodů pomocí laseru je mnohonásobně produktivnější, pro představu zmiňované zařízení od firmy Nikon dokáže snímat až 2000 bodů za sekundu, přitom přesnost a opakovatelnost je dostatečná pro tuto aplikaci. Další výhodou je fakt, že nebude potřeba další čas související s výměnou dotykových sond pro



získání všech metrologických dat anebo pro změření karoserie jiného automobilu, neboť na moderních linkách se nemusí vyrábět pouze jeden typ karoserie.



Obrázek 13: InLine inspekce karoserie automobilu [25]  
1-měřená karoserie; 2-laser radar; 3-robotizované rameno; v červených kroužcích – kalibrační objekty

Proces měření karoserie pomocí laser radaru je ilustrován na obrázku 13. Kontrolní stanoviště se většinou skládá ze dvou paralelně pracujících LR, každý z nich je připojen v prostoru k šestiosému robotickému rameni, které LR polohuje tak, aby byly zpřístupněny ty oblasti karoserie, které nejsou dostupné z jedné polohy. Při každém tomto přepolohování se musí LR opět dostat do souřadného systému karoserie přes kalibrační koule, které jsou na obrázku v červených kroužcích. Naopak nevýhodou LR oproti dotykovému CMM je nižší dosahovaná přesnost, která velkou mírou závisí na robotickém rameni a jeho přesnosti napolohovat LR v prostoru [24] [26] [27].

### 2.2.1.3. Měřicí ramena

Jedná se o mobilní souřadnicové měřicí stroje, schopné měřit i ve výrobním prostředí a pracující ve sférickém souřadném systému. Pohyb měřicího ramena je určen manuálním naváděním snímací hlavy kolem měřené součásti a pracovním prostorem měřicího ramene je koule. Přes senzorku snímací hlavy se pak v prostoru zaznamenávají jednotlivé body, které se poté pomocí výpočetní techniky a vhodného softwaru vyhodnotí nebo přímo porovnájí s CAD modelem. Popřípadě se hojně využívá pro reverzní inženýrství k získání nového CAD modelu měřené součásti. Ukázka měřicího ramena je na obrázku 14.



Obrázek 14: Měřicí rameno Nikon MCAx [28]

Rameno se skládá ze základny s upínacím systémem, kterým lze rameno upevnit ke stativu, na plochu nebo k měřenému dílci. Dále se skládá ze samotné konstrukce ramene, která je vyrobena z lehkých materiálů jako jsou hliníkové slitiny nebo uhlíková vlákna. Jednotlivé části této konstrukce jsou vzájemně propojeny pomocí kloubů, které umožňují ramenu se v prostoru pohybovat, jednotlivé rotační pohyby ramene jsou naznačeny na obrázku 14.

V každém kloubu je zároveň zakomponován snímač úhlové polohy (enkodér) měřicí úhlové vychýlení pro určení souřadnic. V dnešní době se ramena vyrábějí buď se šesti nebo sedmi klouby. Obecně lze říci, že více kloubů sice umožňuje lepší manipulovatelnost a přístup k měřenému objektu, avšak to také znamená zhoršení výsledné přesnosti měření, neboť každým přidaným enkodérem vzniká další chyba. Na

konci ramene je uchycena snímací hlava, která je tvořena dotykovou sondou nebo laser scannerem, popřípadě kombinací této sensoriky. Zároveň, aby obsluha zvládala pohodlně a bez větší fyzické námahy manipulovat se zařízením, bývá konstrukce ramena vybavena u kloubů vyvažovacím členem, který manipulaci usnadňuje.

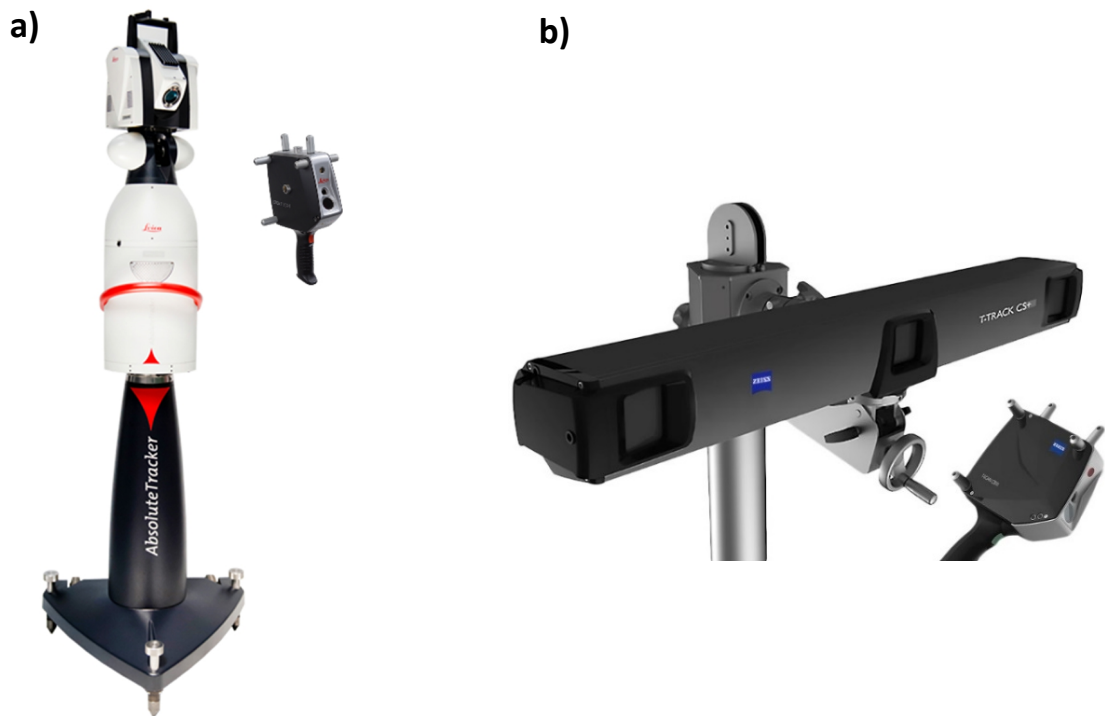
Hlavní výhodou tohoto zařízení je již jednou zmiňovaná mobilita, která je velice dobrá především kvůli nízké hmotnosti a velikosti samotného ramene. S mobilitou zároveň souvisí i schopnost ramene adaptovat se na prostředí, ve kterém se nachází, a tak s ním lze například pracovat přímo v pracovním prostředí. Další předností měřicích ramen je jejich pohybová flexibilita, zajištěná jednotlivými klouby, která umožňuje velice dobrý přístup ke všem částem měřeného objektu. A v neposlední řadě jsou to pořizovací náklady, které patří k těm nižším v oblasti souřadnicových strojů. Avšak generální nevýhodou měřicích ramen je jejich nízká přesnost, ovlivněná především enkodéry v kloubech, které musí být kvůli konstrukci ramene velice malé. Malé enkodéry odečítají polohu s větší chybou než velké enkodéry. Mimo to nepřesnost roste se zvětšující se vzdáleností měřeného bodu od kloubu [1] [29].

#### **2.2.1.4. Trackované scannery**

Další kategorií CMM, které lze používat pouze manuálně stejně jako měřicí ramena, jsou tzv. trackované scannery. V principu se jedná o zařízení, které se skládá ze dvou základních celků, viz obrázek 15.

První celek je scanner ovládaný operátorem a slouží k extrakci bodů ze součásti pomocí vhodné sensoriky, nejčastěji se jedná o laser scanner nebo dotykovou sondu (viz kapitola 3.). Poloha scanneru při snímání bodů v prostoru však musí být známa, aby bylo možné určit absolutní polohu extrahovaných bodů z objektu. K tomuto účelu slouží druhý zmiňovaný celek, a to trackovací zařízení, jenž má v prostoru při procesu snímání bodů konstantní polohu a zaznamenává pohyb scanneru. Avšak v případě nutnosti je možné po ukončení extrakce bodů v konkrétní poloze trackovací zařízení přemístit do jedné, či více nových poloh a následně nové výsledky spojit s výsledky předchozími. Trackovací zařízení může sledovat polohu scanneru v prostoru pomocí emitovaného laserového paprsku, principiálně stejně jako laser tracker určuje polohu SMR sondy anebo pomocí kamerových systémů, kdy triangulací (viz kapitola 3.2.) je určována poloha referenčních

značek, které jsou upevněny na scanneru. Příklady těchto zařízení jsou na obrázku 15. Zařízení s laserovým trackováním je na obrázku 15a a na obrázku 15b je tracker fungující na principu triangulace. Hlavní výhodou této skupiny CMM oproti měřicím ramenům je daleko větší měřicí rozsah.



Obrázek 15: Trackované scannery: a) trackovaný scanner od společnosti Hexagon [30] b) trackovaný scanner od společnosti Zeiss [31]

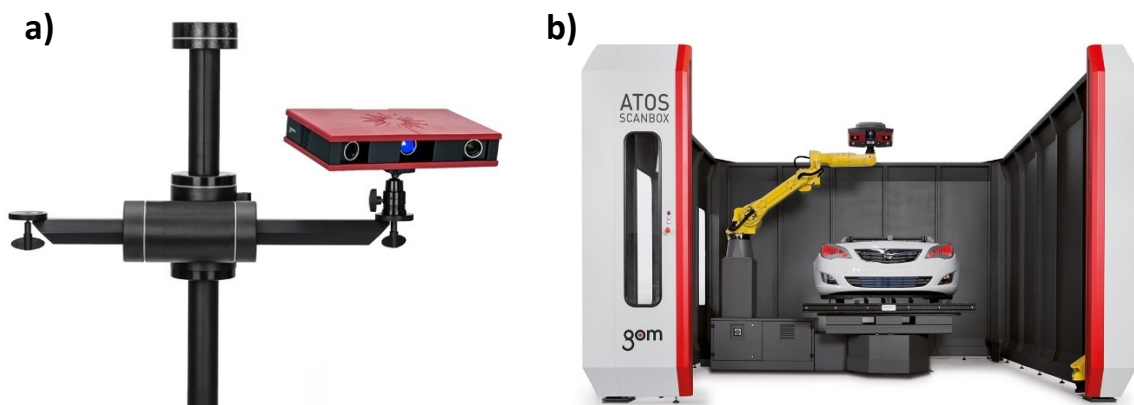
### 2.2.1.5. Optické scannery

Další skupinou CMM, které se využívají pro kontrolu výrobku jsou tzv. optické scannery. Jedná se o zařízení, fungující na principu triangulace. Velice často jsou využívány optické scannery, které snímají body prostřednictvím tzv. pruhové projekce, což je snímací systém fungující na principu aktivní triangulace, problematika spjatá s triangulačním principem je podrobněji popsána v kapitole 3.2.

Optické scannery jsou mobilní zařízení, které pro extrakci bodů z kontrolovaného objektu, využívá snímeků vytvořených kamerovými snímači. Aby bylo možno zkontrolovat celou součást je potřeba přepolohovat scanner nebo součást tak, aby došlo k nasnímání součásti ze všech potřebných směrů. Toto polohování lze provádět manuálně obsluhou, nebo velice často je polohování automatizováno pomocí robotického ramena na něž se

zařízení umístí, popřípadě pomocí rotačního stolu, na který je umístěn kontrolovaný objekt. Již samotní výrobci nabízejí zákazníkům tzv. scannovací boxy, ve kterých jsou scannery nainstalovány na robotických jednotkách a v pracovním prostoru může být umístěn rotační stůl, který slouží k natáčení kontrolovaného dílu kolem osy. Ukázka optického scanneru a skenovacího boxu je na obrázku 16.

Jedná se o velice produktivní způsob kontroly dílů, typickou aplikací je například kontrola celé, popřípadě jednotlivých částí karoserie automobilu. Tato kontrola trvá relativně krátký časový okamžik a dokáže značně snížit měřicí časy, například oproti kartézsky uspořádanému CMM stojanového typu, který se hojně využívá pro kontrolu karoserií. [32] [33].



Obrázek 16: a) optický scanner Gom Atos Core b) scannovací box Gom Atos ATOS ScanBox Series 6 [33]

#### 2.2.1.6. iGPS

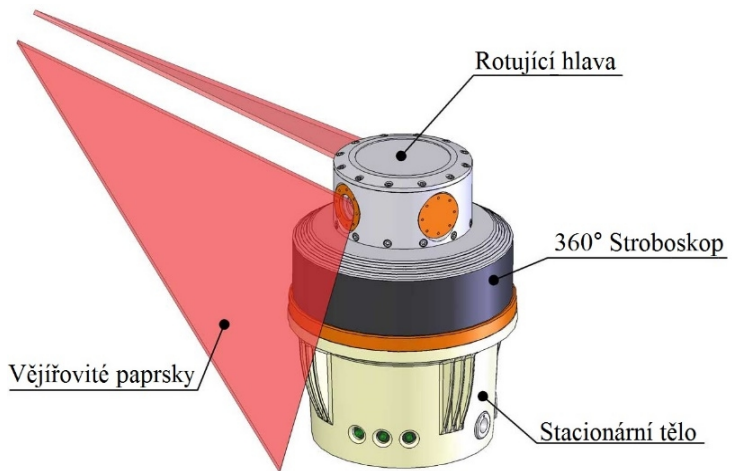
Indoor GPS, neboli iGPS je vnitřní modulární sledovací systém, umožňující lokaci objektů s metrologickou přesností uvnitř výrobních prostor. Používá se především pro velkoobjemovou metrologii. Celý modulární systém se skládá ze dvou nebo více laserových vysílačů, kontrolního střediska a neurčitého počtu potřebných senzorů. U samotných vysílačů je předem známa jejich poloha a fungují tak jako referenční body. Proto před začátkem měření musí být určeny polohy vysílačů, a to pomocí zaměření bodů o známých parametrech v měřeném prostoru. Vysílače generují do měřicího prostoru tři signály. Dva jsou generovány z rotující hlavy ve formě plošně rozprostřených (vějířovitých) infračervených laserových paprsků. Třetí signál je vysílán stroboskopem do prostoru a pokrývá 360° azimutu. Popsané schéma laserového vysílače je na obrázku 17.

Senzory jsou pasivními elementy celého systému, používají se k měření dílu a obsahují fotodiody, které zaznamenávají signály vysílané vysílačem.

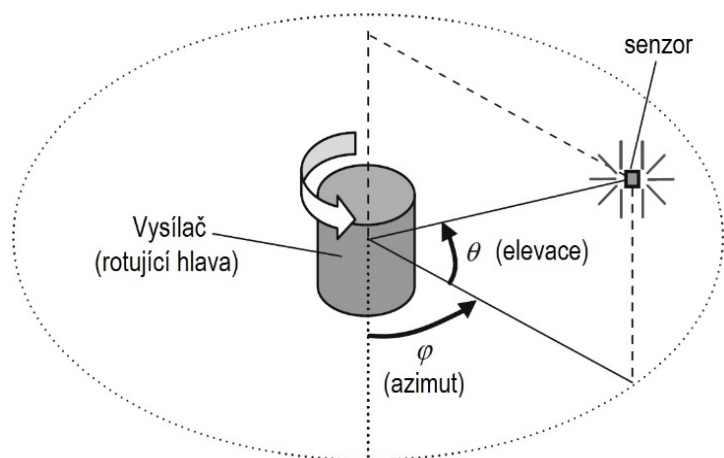
Celý proces funguje na principu triangulace obdobně jako u GPS (Global Positioning System). S tím

rozdílem, že u iGPS plní funkci satelitů laserové vysílače a nevysílají k senzoru rádiové signály, ale infračervené signály. Sensor je schopný detekovat výskyt optických signálů a určit horizontální úhel (azimut) a vertikální úhel (elevation) od vysílače, viz obrázek 18. Sensor prostřednictvím fotodiody konvertuje optické signály na časové signály a následně pak z časových rozdílů mezi jednotlivými signály, úhlové rychlosti rotující hlavy a úhly mezi jednotlivými paprsky se určí oba zmíněné uhlové údaje. Následně, aby mohla být určena poloha senzoru pomocí triangulace z předem známých souřadnic vysílačů, musí sensor přijímat signály alespoň od dvou vysílačů [34] [35]. Velkou výhodou tohoto systému je, že umožňuje použít teoreticky nekonečně mnoho senzorů a měřicí objem lze jednoduše rozšířit přidáním dalších vysílačů. Navíc každým přidaným vysílačem se vlivem triangulace zvyšuje přesnost určení polohy senzoru.

Další výhodou systému iGPS je jeho rovnoměrná přesnost v celém měřicím objemu. Navíc nedochází ke snížení přesnosti se zvětšující se vzdáleností jako u tradičních metrologických řešení. Nevýhodou tohoto sledovacího systému je nižší dosažitelná přesnost, která se pohybuje kolem 200  $\mu\text{m}$  [35] [36].



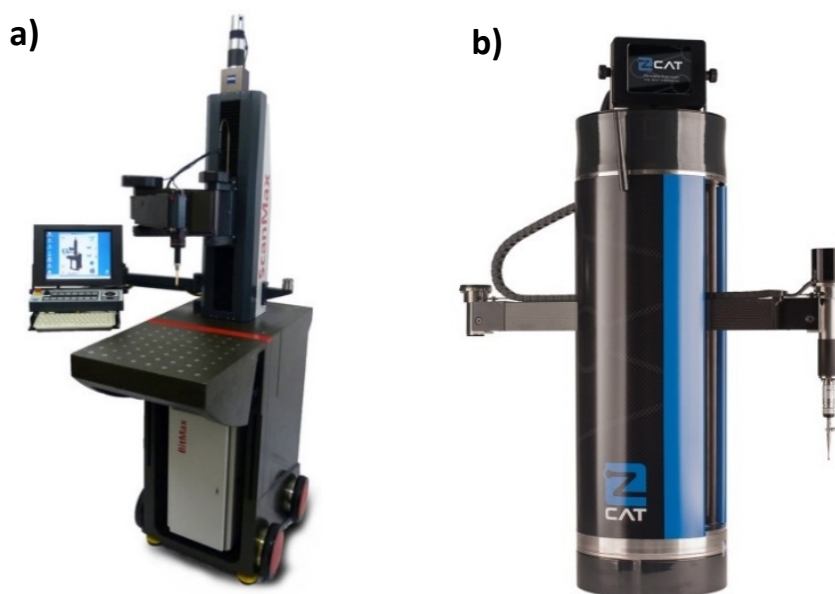
Obrázek 17: Laserový vysílač iGPS systému [34]



Obrázek 18: Měřené úhly mezi vysílačem a senzorem [35]

## 2.2.2. CMM s cylindrickým souřadným systémem

Mimo výše uvedené souřadnicové stroje ještě existují stroje, jejichž souřadný systém je řešen v cylindrických souřadnicích. Tyto stroje mají menší zastoupení na trhu a patří do minority v oblasti souřadnicových strojů. Zpravidla tyto stroje mají jednu rotační osu a rameno, jež umožňuje senzorce se pohybovat ve dvou translačních osách. Pro ukázkou v této práci jsou uvedeny dva stroje s tímto systémem. Oba dva stroje jsou menších rozměrů, jsou mobilní a využívají pouze kontaktní senzorky pro snímání (viz kapitola 3.1.).



Obrázek 19: CMM s cylindrickým souřadným systémem: a) Zeiss ScanMax [37] b) zCat [38]

První, vyobrazený na obrázku 19a je Zeiss ScanMax. Tento stroj je manuální, tudíž obsluha musí ručně navádět snímací systém k povrchu měřeného objektu, avšak rameno je poháněné a tím je obsluze ulehčena manipulace se strojem. ScanMax lze používat i pro měření ve výrobním prostředí, neboť disponuje korekčními technikami, které omezují vliv vnějších podmínek na měření. Navíc jeho konstrukce je odolná vůči oleji, prachu a dalším vlivům typickým pro výrobní prostředí [39]. Druhé zařízení zastupující CMM s cylindrickým souřadným systémem je zCat od společnosti Fowler High Precision (obrázek 19b). Tento stroj se vyznačuje velice malými rozměry. Výškový rozměr je pouze 24,4 palce ( $\approx 62$  cm) a hmotnost činí pouze 30 liber ( $\approx 13,6$  kg). Stroj je plně automatizovatelný, ale dokáže snímat pouze jednotlivé body, nikoliv skenovat, proto je vhodný pro kontrolu pouze základních geometrických elementů [38].



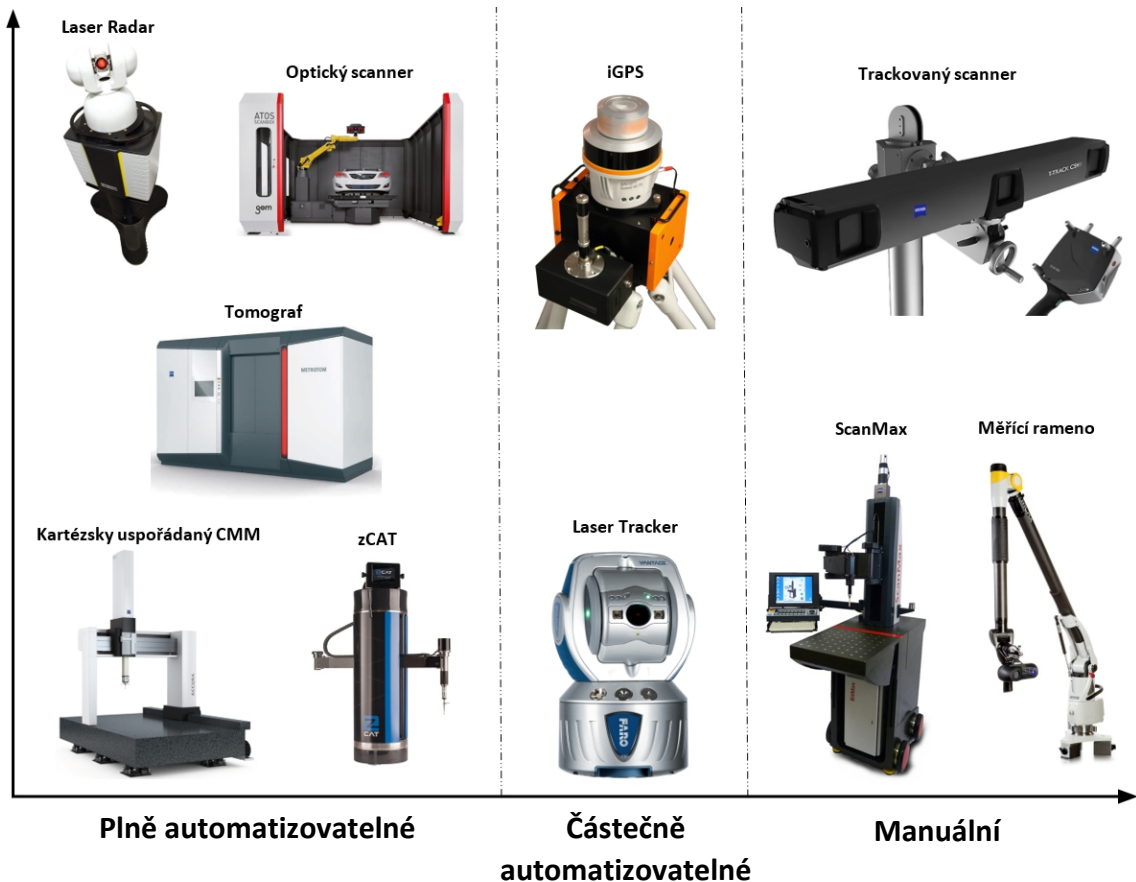
## 2.3. Možnosti automatizace souřadnicových měřicích strojů

Možnost automatizovat měřicí stroj je velice důležitým aspektem pro koncové uživatele souřadnicové měřicí techniky. A jistou mírou souvisí i s výběrem stroje, a to zejména z hlediska požadavku na množství dílů, které bude potřeba za určitý časový okamžik zkontrolovat. Protože například pro výrobní linky s vysokými takty produkující výrobky, u kterých je ještě vyžadována kontrola velkého procenta z celkového vyrobeného množství, bude určitě vhodné zvolit měřicí techniku s vysokou produktivitou. V těchto případech je automatizace velice podstatná. Naopak pro příležitostnou nebo nesériovou kontrolu bude nejvhodnější vybrat manuálně ovládané měřicí stroje. Dále je na tuto problematiku potřeba nahlížet i z hlediska nákladů, kdy automatizovatelný stroj bude zpravidla dražší, nicméně odpadnou náklady na operátora, který by musel manuální stroj obsluhovat.

Výše zmíněná souřadnicová měřicí technika byla pro účely této práce rozdělena graficky dle možnosti automatizace na obrázku 20. V tomto grafu jsou uvedeny obrázky reprezentující jednotlivé kategorie strojů, které byly blíže přestaveny na předchozích řádcích. Čím více vlevo na horizontální ose se daná kategorie nachází, tím lepší jsou jejich dispozice k automatizaci. V levé části podélné osy se nacházejí stroje, jež jsou plně automaticky schopny měřit určitý dílec po vytvoření příslušného programu. Stroje jsou řízeny počítačově, tzv. DCC (Direct Computer Control) řízení. Tento kontrolní systém je zabudován v souřadnicových strojích a ovládá pohyb zvolené sensoriky stroje. Veškeré pohyby stroje jsou poháněny motoricky. Tato kategorie strojů má obvykle velice dobrou přesnost i opakovatelnost a samotný proces měření zpravidla trvá kratší časový okamžik než v případě operátorem ovládaných CMM. Ve střední části horizontální osy jsou stroje, které nejsou samy o sobě schopny provádět automatické měření, nicméně po jeho propojení s robotizovanou jednotkou, například s robotickým ramenem, lze celý proces měření zautomatizovat. Jako příklad lze uvést laser tracker, jehož princip měření vyžaduje částečný nebo nepřetržitý vizuální kontakt s koutovým odražečem. Tento kontakt může být zajišťován buď manuálně pracovníkem, který musí se sondou pohybovat v prostoru, kde se nachází měřený objekt nebo kontakt může být zautomatizován, kdy sondou pohybuje v prostoru naprogramované robotické zařízení.



Nakonec do pravé části osy se řadí ty stroje, jež musí být během měřicí operace ovládány ručně operátorem. Z čehož vyplývá, že tyto stroje mají nižší přesnost a opakovatelnost, a to právě kvůli vlivu vneseným do průběhu měření operátorem. Navíc operátor musí být velice dobře proškolen, mít potřebné znalosti a zkušenosti, aby měření bylo korektně provedené.



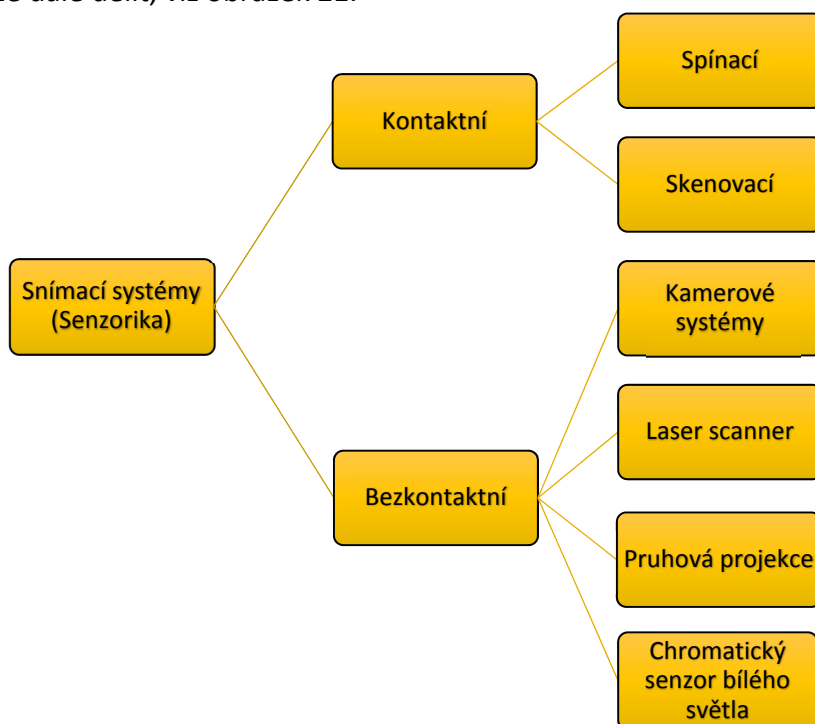
Obrázek 20: Možnosti automatizace souřadnicových měřicích strojů [9] [17] [18] [28] [31] [33] [36] [38] [37] [60]

### 3. Snímací systémy používané v oblasti CMM

Samotný snímací systém (senzorika) je velice podstatnou částí souřadnicového stroje, neboť právě přes něj jsou snímány body z kontrolovaného objektu. Lze ho označit jako mezičlánek zprostředkávající spojení mezi strojem a kontrolovaným objektem. V dnešní době mohou být souřadnicové stroje konstruovány tak, že je na ně aplikován fixně pouze jeden typ snímacího systému anebo mohou disponovat vyměnitelným snímacím systémem, který umožňuje použití více typů sensoriky. Popřípadě existují stroje, které umožňují použití více typů snímacích systémů pro jednu aplikaci, viz multisenzorový stroj v kapitole 4.1.1.

Obecně uživatelé souřadnicových měřicích strojů by měli porozumět jednotlivým charakteristikám a rozdílům ve velké škále dnes nabízené sensoriky, aby mohla být zvolena adekvátní sensorika pro konkrétní aplikaci, neboť neexistuje taková, která by byla vhodná pro každou aplikaci měření. Vhodnost konkrétní sensoriky pro dané použití se ve velké míře odvíjí především z fyzikálního principu, na němž sensorika funguje a jejích výkonnostních charakteristikách.

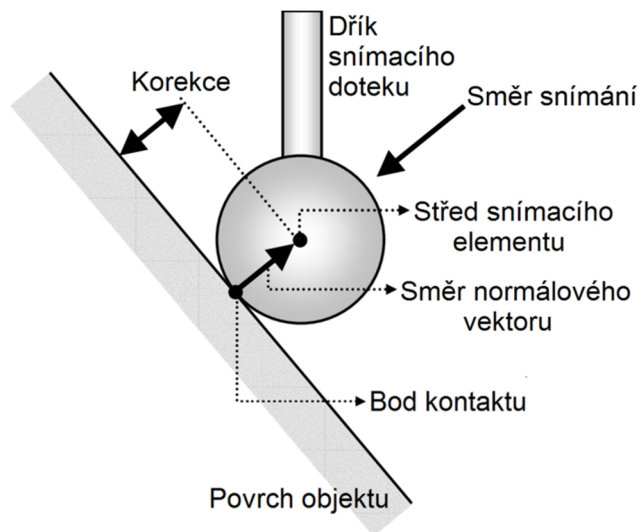
Z generálního hlediska lze sensoriku rozdělit podle toho, zda stroj potřebuje ke snímání bodů z měřeného objektu fyzický kontakt, na kontaktní a bezkontaktní. Ovšem tyto dvě hlavní skupiny lze dále dělit, viz obrázek 21.



Obrázek 21: Schématické rozdělení snímacích systémů

### 3.1. Kontaktní snímací systémy

Do této skupiny se řadí ty snímací systémy, které využívají přímého fyzického dotyku s měřeným dílem pro extrakci bodů z jeho povrchu. Obecně se kontaktní snímací systémy skládají ze snímacího elementu, jenž zajišťuje kontakt mezi snímacím systémem a dílem, dříku nesoucí snímací element a mechanismu,



Obrázek 22: Snímání bodu kontaktním snímacím systémem

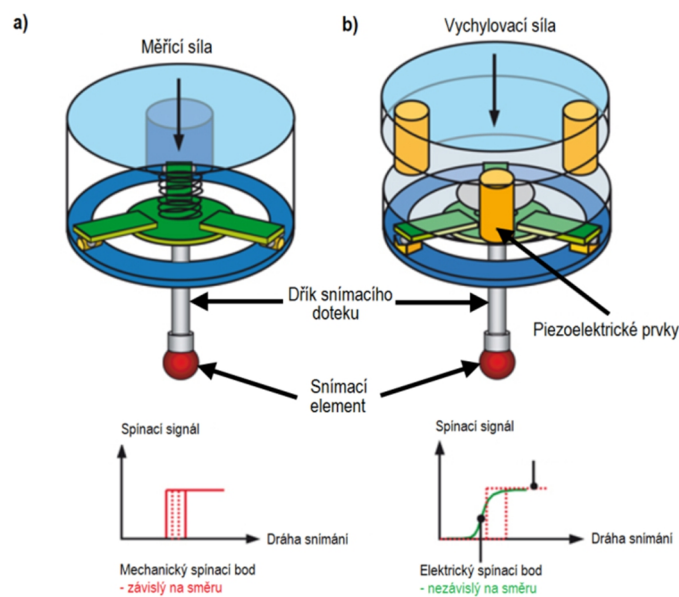
který zajišťuje zaznamenání souřadnic měřeného bodu.

Poloha bodu dotyku na povrchu dílu získaného přes kontaktní snímač nelze určit bez matematické korekce. Pro správné stanovení této korekce je potřeba znát směr normálového vektoru v místě kontaktu snímacího elementu s povrchem a souřadnice středu snímacího elementu, neboť korekce je dopočítávána vůči středu snímacího elementu v konkrétním směru normálového vektoru. Aby tato korekce byla přesná, musí samotnému měření předcházet kalibrace celé sondy. Nepřesnost určení polohy bodu dotyku, která by vznikla při zanedbání této korekce, je závislá na rozměrech snímacího elementu a na přesnosti určení normálového vektoru v místě snímání, neboť souřadnice bodu kontaktu jsou dopočítávány vůči středu snímacího elementu v konkrétním směru normály. Celá tato problematika je znázorněna na obrázku 22. Typ elementu (nejčastěji kulička, talířek nebo váleček) a jeho velikost se odvíjí od konkrétní aplikace měření [14] [41]. Princip funkce kontaktních snímačů spočívá ve schopnosti vrátit snímací element do původní polohy při jakémkoliv vychýlení z této polohy [30]. Obecně lze tuto skupinu snímačů dále dělit na spínací kontaktní a skenovací snímací systémy.

#### 3.1.1. Spínací kontaktní systémy

Jedná se o jednoduché kontaktní systémy, které snímají pouze jednotlivé body, to znamená, že nejsou schopny skenovat velké množství bodů z povrchu součásti, a proto

jsou vhodné zejména pro standardní geometrické prvky, u kterých je dostačující relativně malý počet bodů. Fungují na principu soustavy tří bodů, jež se skládá ze tří válečků a každý z nich je tlačěn pružinou proti páru kuliček. Tyto kinematické kontakty odebírají všech 6 stupňů volnosti dířku, na jehož konci je umístěn snímací element. A zároveň tato konstrukce navrácí dířek s elementem do původní polohy při vychýlení. K zaznamenání polohy snímaného bodu souřadnicovým strojem musí dojít k vyslání spouštěcího signálu. Tento signál je vyvolán při spínacím kontaktu (touch trigger). Je to okamžik, kdy snímací element je vychýlen v jakémkoliv směru ze své původní polohy. Vychýlení generující spínací signál je způsobeno silou, která vznikne při najetí snímače do povrchu měřeného dílu. Tato snímací síla musí být dostatečně velká, aby překonala sílu pružiny a došlo k rozpojení alespoň jednoho ze tří kinematických kontaktů. Takovýmto způsobem fungují tzv. **kinematické sondy**, které zaznamenávají kontakt boolevským výstupem (kontakt: ano – ne). Jejich nevýhodou je, že rozdílné snímací síly závislé na směru snímání vedou k různému prohnutí snímačů a tím dochází k různému chování při snímání, které je závislé na směru, což se dá jen obtížně korigovat [1] [14] [42]. Touto nevýhodou nedisponují spínací senzory, jež používají převodníky, nejčastěji piezoelektrické prvky, k převodu mechanického signálu na elektrický. Tímto způsobem lze dosáhnout snímání, které není závislé na směru [14]. Oba dva způsoby, kterými dochází ke tvorbě spínacího signálu jsou ilustrovány na obrázku 23. Obecně hlavními přednostmi spínacích kontaktních senzorů je nízká cena, hmotnost a velikost [1].



Obrázek 23: Spínací kontaktní senzory: a) spínání mechanicky (kinematická sonda) b) spínání pomocí převodníků [14]

### 3.1.2. Kontaktní skenovací snímací systémy

Skenovací systémy na rozdíl od spínacích systémů, které jsou pouze schopné detekovat kontakt, ještě zaznamenávají snímací vektor, tedy normálu a směr. Tento typ kontaktní sondy umožňuje bodové snímání, jako v případě spínacích sond anebo skenování. Po prvním kontaktu s měřenou součástí se sonda během skenování pohybuje tak, aby byla v neustálém kontaktu s povrchem této součásti. Tímto pohybem sonda snímá body z jejího povrchu. Počet nasnímaných bodů závisí na nastavených parametrech celého procesu a může se pohybovat až v řádech tisíců bodů. Z tohoto důvodů jsou skenovací systémy vhodné pro kontrolu dílů s obecnými tvarovými plochami, k jejichž kontrole je účelné extrahovat co nejvíce bodů. Skenovací systémy operují podle aplikace buď v tzv. freefloating režimu, kdy pracuje současně ve všech třech osách anebo v režimu, jenž umožňuje uzamknutí těch os, které nejsou používány k měření. První skenovací snímací systém byl představen společností Carl Zeiss v roce 1973 [1] [14] [42].

Skenovací systém je tvořen trojicí pružinových paralelogramů, každý pracuje ve směru jedné osy (viz obrázek 24). Účelem těchto paralelogramů je, aby výchylky při snímání byly přibližně lineární a obvyklý rozsah vychýlení bývá  $\pm 3$  mm ve směru každé měřicí osy. Vyvozování měřicí síly u skenovacích snímačů se liší v závislosti na výrobci, může být realizována pomocí mechanických nebo elektrických prvků, například společnost Zeiss využívá lineárních motorů, jež jsou schopny produkovat konstantní měřicí sílu. V případě, že lze měřicí sílu nastavovat v daném rozsahu a udržet její velikost nezávislou na velikosti výchylky snímacího systému, tak tyto skenovací systémy označujeme jako **aktivní**. Pokud je měřicí síla generována mechanickými elementy (např. pružinami), je velice obtížné zajistit konstantní velikost měřicí síly v závislosti na výchylce, takovéto skenovací systémy označujeme jako **pasivní**. Ke snímání polohy bodů se opět dle konstrukce jednotlivých



Obrázek 24: Skenovací snímací systém Zeiss [42]

výrobců používají různé principy odměřování, jako příklad lze uvést indukční odměřování nebo optické odměřování [1] [42].

Obecně výhodami skenovacích systémů oproti spínacím je vyšší přesnost, lepší opakovatelnost, možnost kompenzace měřicí síly a vyšší produktivita měření, neboť pro odečtení souřadnice každého bodu není nutno odjet od povrchu měřeného dílu [1].

### **3.2. Bezkontaktní snímací systémy**

Princip snímání bodů bezkontaktními snímacími systémy nevyžaduje fyzický kontakt mezi měřenou součástí a souřadnicovým měřicím strojem. Bezkontaktní systémy bývají zpravidla produktivnější než kontaktní systémy, neboť za stejný časový okamžik dokáží extrahovat mnohonásobně více bodů než v případě kontaktních systémů. Pro představu, dnešní kontaktní systémy jsou schopny snímat řádově stovky bodů za sekundu, zatímco ty bezkontaktní řádově tisíce až statisíce bodů za sekundu v závislosti na typu sensoriky. Bezkontaktní technologie se aplikuje především na ty díly, které jsou pružné nebo křehké, u nichž by přítlačná síla kontaktních sond mohla značně zkreslit přesnost měření. Zároveň se používají pro takové díly, u nichž je obtížné nebo úplně nemožné zkontrolovat veškeré charakteristiky dotykově. Další výhodou oproti kontaktním snímačům je odstranění rizika kolize snímače s dílem. Naopak nevýhodami této kategorie snímačů je zpravidla horší přesnost a nemožnost aplikace na všechny materiály, a to zejména kvůli fyzikálnímu principu, na němž tato sensorika pracuje.

Bezkontaktní snímače jsou ve většině případů optická zařízení sloužící k digitalizaci reálného 3D objektu. Avšak při tomto procesu dochází k transformaci trojrozměrné scény na dvojrozměrný obraz (přes kameru, CCD snímače atd.), a tak dochází ke ztrátě informace o třetí souřadnici. U těch aplikací, u kterých je nutné získat informace o všech třech prostorových souřadnicích, využívají bezkontaktní snímací systémy převážně tyto tři následující metody, které poskytují data o třetí chybějící souřadnici:

- triangulace,
- měření doby letu světla (time of flight),
- optická interference světla [43] [44].

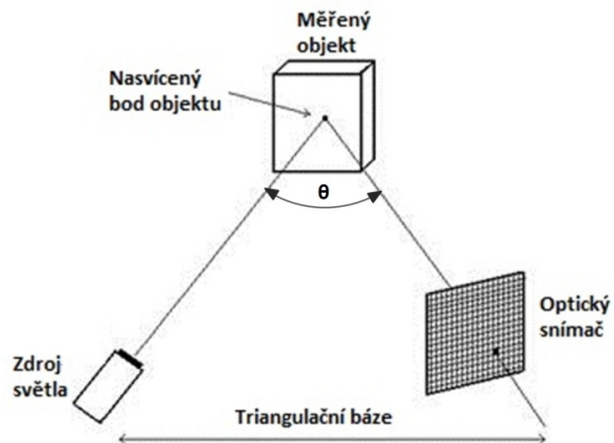
Tyto jednotlivé metody budou podrobněji rozebrány na následujících řádcích.

## Triangulace

Optické měření založené na triangulačním principu je v dnešní době nejčastěji používané. Triangulace je založena na vytvoření imaginárního triangulačního trojúhelníku mezi jednotlivými triangulačními prvky a následnému dopočítání potřebné souřadnice. Základní dělení triangulačních metod je na aktivní a pasivní.

### Aktivní triangulace

Princip fungování aktivní triangulace popisuje obrázek 25. Triangulační trojúhelník se skládá ze zdroje světla (nejčastěji emitovaného laserového paprsku), měřeného objektu a objektivu optického prvku, což nejčastěji bývá CCD snímač, který snímá nasvícený povrch



Obrázek 25: Aktivní triangulace [44]

měřeného objektu a převádí optické signály na digitální obraz z nasnímaných bodů. Spojnice mezi světelným zdrojem a snímačem se nazývá triangulační báze. Rozměr triangulační báze, stejně jako úhel mezi triangulační bází a světelným zdrojem je konstantní. Kdežto na straně snímače je úhel proměnný a závisí na pozici vysvíceného bodu na optickém snímači. Z velikosti tohoto úhlu a na základě konstantních veličin triangulační báze lze určit vzdálenost nasvíceného bodu na povrchu dílu, tedy jeho z-ovou souřadnici.

Dle promítaného světelného vzoru lze aktivní triangulaci dále dělit na:

- 1D triangulaci (světelný paprsek),
- 2D triangulaci (světelný pruh),
- 3D triangulaci (strukturovaný světelný svazek) [43] [44].

### Pasivní triangulace

Hlavní odlišnost oproti aktivnímu způsobu triangulace je, že nedochází k žádnému promítání na povrch součásti z externího světelného zdroje. Tento druh triangulace pracuje na velice podobném principu jako lidský zrak při vnímání vzdálenosti, kdy

vzdálenost je vyhodnocována na základě dvou obrazů. Místo očí je však použito dvojice kamerových snímačů s rovnoběžnými optickými osami, jejichž vzájemná vzdálenost středů je přibližně 65 mm. Tímto se získají dva stereoskopické snímky, jež jsou zároveň perspektivními obrazy. Podstatný je úhel, který svírají oba sdružené paprsky (takzvaná úhlová paralaxa), neboť z tohoto údaje lze získat vzdálenost povrchu od středu pohledu obou snímačů. Tato metoda se nazývá stereovidění [43].

Mimo stereovidění lze obecně do pasivní triangulace zařadit i následující metody:

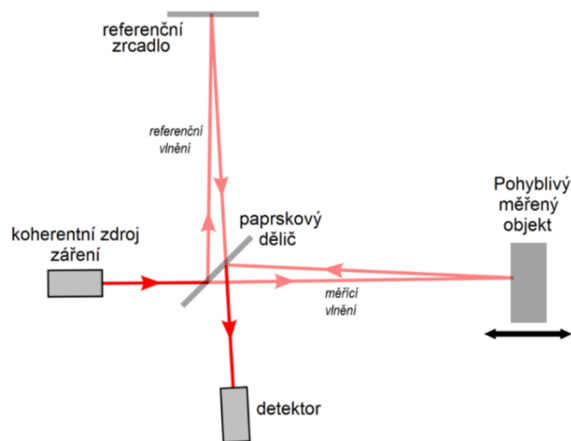
- více kamer se známou orientací,
- více kamer se samokalibrací,
- jedna kamera v různých polohách se samokalibrací.

První dvě metody se používají pro dynamické systémy, kdy se využívá znalosti relativních poloh nebo samokalibrace. Pro statické scény se využívá jedné kamery, která nasnímá snímky ze dvou nebo více pohledů. U samokalibračních metod musí být v pracovním prostoru umístěn kalibrační předmět, což je předmět o známých rozměrech a většinou s definovaným vzorem. Tento předmět se musí objevit na všech zachycených obrazech, neboť vůči němu se pak určuje relativní poloha kamery nebo kamer vzhledem k měřené součásti. Všechny potřebné parametry pro měření jsou pak určeny z natočení a změny měřítka předmětu [44].

### **Optická interference světla**

Optická interferometrie je měřicí metoda založená na interferenci světelných vln. Tento jev spočívá ve skládání různých příspěvků vlnění v určitém místě. Projevem tohoto jevu je vznik interferenční struktury, jenž se u monochromatického světla projevuje vznikem světlých a tmavých proužků, v případě polychromatického světla vznikem barevných proužků dle spektra. Podstatnou podmínkou pro vznik interference je koherence světla, tedy uspořádanost světla, což znamená světelné vlnění stejné frekvence, jehož fázový rozdíl se v daném bodě s časem nemění [45]. Tohoto jevu využívají zařízení nazývané interferometry, první a zároveň asi i nejznámější interferometr se nazývá Michelsonův interferometr a byl sestaven A. A. Michelsonem již v roce 1881 [1]. Od této doby se toto zařízení značně vyvinulo, avšak funkční princip je obdobný. Schéma interferometru je ilustrováno na obrázku 26.





Obrázek 26: Schéma interferometru [46]

Ze světelného zdroje je emitován koherentní světelný paprsek, který se na papřkovém děliči (nejčastěji polopropustném zrcadle) rozdělí na dvě vlnění, a to měřicí a referenční vlnění. Referenční vlnění se pohybuje k referenčnímu zrcadlu, zatímco měřicí vlnění putuje k měřenému objektu. Po odražení obě vlnění směřují zpět k papřkovému děliči, kde dochází ke spojení rozptýleného vlnění od předmětu s referenčním. Rozdílné dráhy vlnění způsobí fázový rozdíl, který vytvoří interferenční strukturu, která je zaznamenána a vyhodnocena detektorem, což může být například CCD snímač. Tento výstup z interferometru je snímačem zaznamenáván jako intenzita světla, která je funkcí podélné souřadnice a tato závislost se nazývá interferogram. Z interferogramu je poté možné určit podélnou souřadnici povrchu měřeného objektu. Obecně interferometrie se vyznačuje vysokou přesností měření [44] [46] [47].

### **Měření doby letu světla (time of flight)**

Informaci o vzdálenosti bodu z povrchu objektu, lze poměrně jednoduše stanovit z doby letu světla, která je měřena od emitace světelného papřsku zdrojem, následného odražení od objektu až do zachycení senzorem. Tato metoda vychází z fyzikálního faktu, že světelný papřsek je forma elektromagnetického vlnění, které se ve vakuovém prostoru pohybuje rychlostí světla. Potom lze vzdálenost zdroje papřsku od měřeného objektu vyjádřit podle následujícího vzorce:

$$L = c \cdot \frac{t}{2}$$

Kde: L - vzdálenost [m]

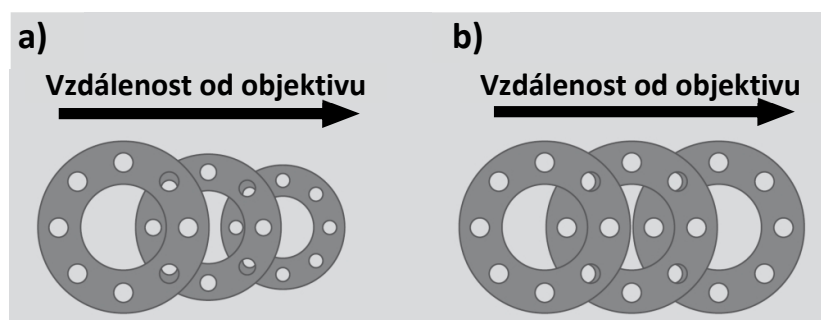
t - celkový čas letu papřsku [s]

c - konstanta, rychlost světla ve vakuu ( $c = 299792458$  [m/s]) [1] [44].

Jelikož rychlost světla je extrémně vysoká, tak je nutné stanovení doby letu paprsku co nejpřesněji. Například pro laserový paprsek je vyžadováno, aby jeho čas návratu ke snímači byl změřen s lepší přesností než je 66 ps, aby nepřesnost získané vzdálenosti byla maximálně 1 cm [1]. Kromě určení přesné rychlosti světla pro dané prostředí, neboť nikdy nebude možné měřit v absolutním vakuu, je přesnost určení časové hodnoty doby letu ovlivněna ještě vysokofrekvenční elektronickou částí, z níž se kromě optické části celé zařízení fungující na metodě měření doby letu světla skládá. Tato vysokofrekvenční část sice zajišťuje modulaci paprsku, ale zároveň vnáší do celého procesu značná časová zpoždění. Z těchto důvodů se tato metoda používá na aplikace, u nichž nejsou kladeny tak vysoké nároky na přesnost, jako je měření velkých vzdáleností, kde relativně velká nejistota měření nebude příliš vadit [1] [44].

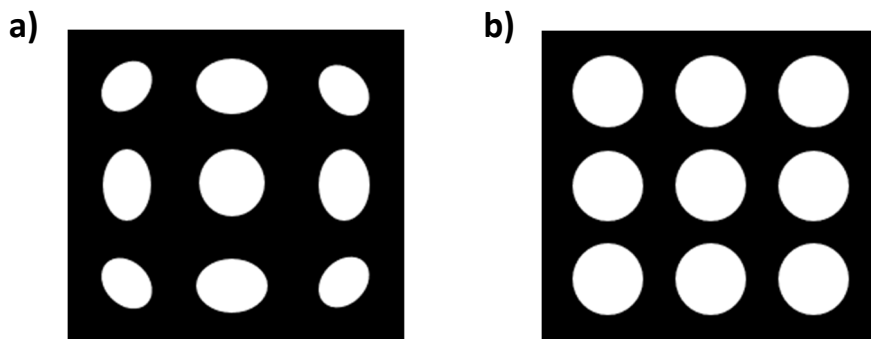
### 3.2.1. Kamerové systémy

Obecně kamerový systém je bezkontaktní snímač, který je schopný vytvořit dvojrozměrný obraz objektu v prostoru z optických signálů procházejících ke snímači skrz objektiv. Na finální obraz má vliv mnoho aspektů, jako je například objektiv, nasvícení, kamerový čip, software pro vyhodnocení atd. Pro vysokou přesnost měření se u kamerových systémů často využívá tzv. **telecentrických objektivů**. Tyto objektivy se vyznačují tím, že při posunutí objektu axiálně podél optické osy v rámci telecentrického rozsahu zůstává měřítko zobrazení konstantní a tím nedochází k dalším odchylkám měření. Pojem telecentricita je demonstrován na obrázku 27, na obrázku 27a je objekt snímán netelecentrickým objektivem, což znamená, že čím dále se objekt nachází od tohoto objektivu, tím se jeví menší a naopak. Zatímco na obrázku 27b je ke snímání objektu využíván telecentrický objektiv, který zachovává konstantní měřítko nezávisle na vzdálenosti objektu od objektivu [14] [48].



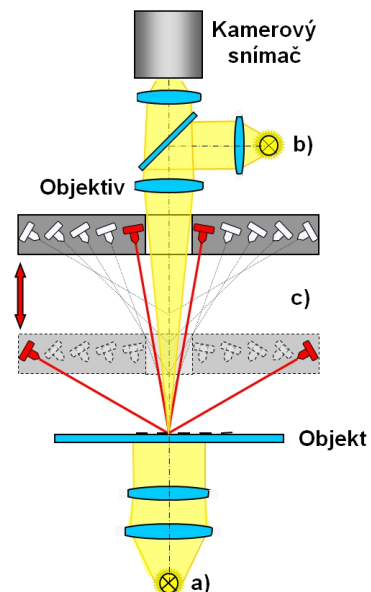
Obrázek 27: Obrazy z objektivů a) netelecentrického b) telecentrického [48]

Další vlastností telecentrických objektivů, která rovněž zvyšuje přesnost měření, je vytvoření obrazu, jenž je zanedbatelně zdeformovaný ve směru od jeho středu k okrajům, tudíž objekty mají stejnou velikost i se zvyšující se radiální vzdáleností od optické osy. Tato vlastnost je patrna z obrázku 28, kde v levé části je objekt s kruhovými otvory nasnímán netelecentrickým objektivem, zde je zřetelná deformace jednotlivých otvorů se zvětšující se vzdáleností od středu. Zatímco v pravé části je obraz nasnímán telecentrickým objektivem, u kterého nedochází k deformaci otvorů směrem od středu obrazu. Obecně lze tedy konstatovat, že telecentrické objektivy nám vždy zaručují stejnou velikost objektu, pokud se nachází v oblasti hloubky ostrosti objektivu [49].



Obrázek 28: Obrazy demonstrující objektiv a) netelecentrický b) telecentrický

Zároveň pro co nejlepší obraz a následné jeho vyhodnocení je účelné objekt vhodně nasvítit. Obecně lze světelné zdroje rozdělit podle směru na spodní a horní osvit. Spodní osvit nebo také procházející světlo je znázorněno na obrázku 29a. V tomto případě je světelný zdroj umístěn pod měřeným objektem, svítí proti kamerovému snímači a slouží zejména k vyhodnocování kontury objektu. Horní osvit lze dále dělit na koaxiální, kdy světelný zdroj je umístěn v ose kamerového snímače (obrázek 29b) a na tzv. kruhové světlo. Při použití kruhového světla je objekt nasvícen světelným zdrojem, který je umístěn kolem objektivu kamerového snímače (obrázek 29c) [14] [50].



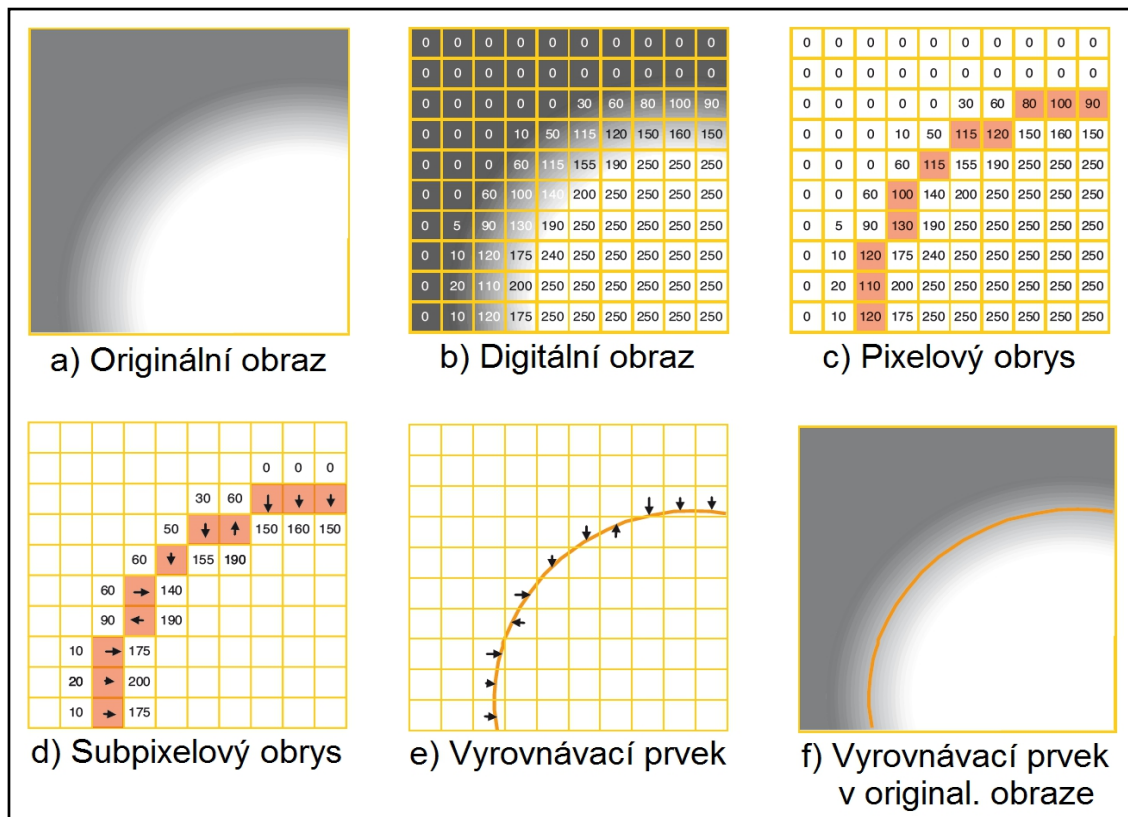
Obrázek 29: Schéma nasvícení: a) nasvícení procházejícím světlem b) koaxiální nasvícení c) nasvícení kruhovým světlem [14]

K digitalizaci obrazu se dnes v oblasti metrologie nejčastěji využívá CCD (Charge Coupled Device) nebo CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) snímač. Obrazový snímač je integrovaný obvod umístěný na silikonovém povrchu a tvoří velký počet těsně uspořádaných světlocitlivých polovodičových elementů, tzv. pixelů, které se dopadem světla nabijí. Rozlišení snímače je pak dáno celkovým počtem těchto pixelů. Principiálně fotony dopadající na snímač vytvářejí elektrický náboj, který je úměrný intenzitě světla a tento náboj je následovně elektronikou převeden na digitální obraz. Získaný obraz je následovně pomocí výpočetní techniky a vhodného softwaru pro zpracování obrazu použit k výpočtu měřených bodů [1] [51].

Existuje mnoho algoritmů sloužících k vyhodnocování obrazu, avšak obecně se dají rozdělit na dvě základní koncepce, a to „edge finder“ (vyhledávač hran) a zpracování obrysového obrazu. Pomocí softwaru s koncepcí edge finder se určují průsečíky předem nadefinovaných přímek v obraze prostřednictvím viditelných obrysů objektu. Toto se postupně opakuje v mnoha rozdílných místech v předdefinované vyhodnocovací oblasti nebo okně. Výsledkem je množství měřených bodů, které jsou oknem sloučeny do skupiny. Pro určení každého diskrétního bodu dochází však k jednorozměrnému vyhodnocení, a tak dvojrozměrná informace z obrazu není zohledněna. To způsobuje problémy, zejména pro měření v dopadajícím světle.

Jak funguje software pro zpracování obrysového obrazu, je znázorněno na obrázku 30. Na obraz objektu se nahlíží jako na plošný celek ve vyhodnocovacím okně. Kontury nacházející se v tomto obraze jsou pak extrahovány vhodnými matematickými algoritmy. Na začátku vyhodnocování sensorika registruje originální obraz ve stupních šedi (obr. 30a), jednotlivé pixely tohoto obrazu jsou následovně převedeny na digitální amplitudy a vzniká tak digitální obraz (obr. 30b), z něhož je následovně vytvořen pixelový obrys kontury přes operátor pro prahové hodnoty (obr. 30c). V dalším kroku se pro každý bod pixelového obrysu interpolací určí ze sousedních hodnot tzv. subpixelový bod. Tyto body pak tvoří subpixelový obrys (obr. 30d), ze kterého se poté vhodnou metodou, například Gaussovou „best-fit“, vypočítá vyrovnávací prvek (obr. 30e), který se poté vyobrazí v originálním obraze pro vizuální kontrolu (obr.30f). Při tomto procesu je každému pixelu přiřazen jeden měřený bod, tyto body se pak řadí za sebe. Tím je možno při vyhodnocování odhalit rušivé vlivy při měření a odfiltrovat tak data ovlivněná těmito

vlivy, aniž by došlo k změně tvaru kontury. Rozlišení, popřípadě nejistota měření je přímo závislá na vzdálenosti pixelů mezi sebou [1] [14].

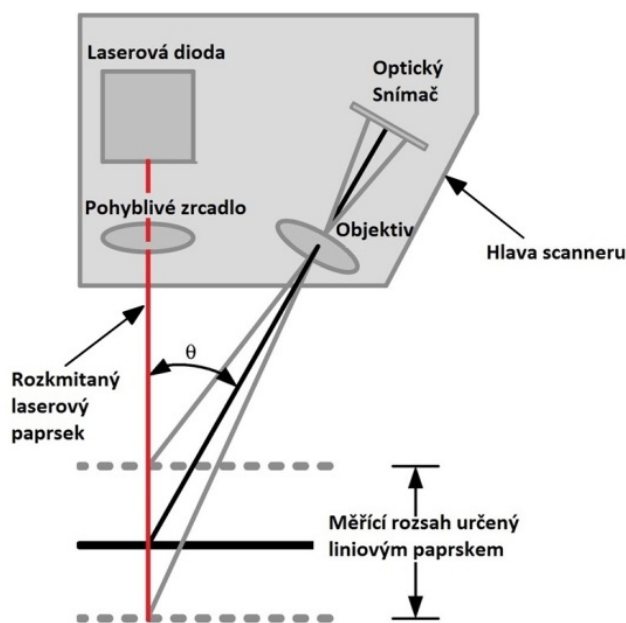


Obrázek 30: Zpracování obrysového obrazu [14]

2D obrazy zaznamenané kamerovými snímači jsou vhodné především pro vyhodnocování profilů a kontur objektu. Objektivy kamerových systémů umožňují měřit i třetí souřadnici pomocí tzv. autofokusu. Nicméně aby byla přesnost ve třetí souřadnici dostačující, tak musí mít kamerový systém dostatečně malou hloubku ostrosti, která je přímo provázaná se zvětšením. Tento fakt z fyzikálního principu, na němž optika funguje, přímo limituje velikost zorného pole, neboť čím menší je hloubka ostrosti, tím menší je i velikost zorného pole. Zmiňovaná závislost je například patrná v tabulce 3 v kapitole 4.1., jenž popisuje jednotlivé zvětšení kamerového snímacího systému. Z tohoto důvodu je měření pomocí autofokusu neproduktivní, a proto se pro získání třetí souřadnice kamerovými snímači často využívá principu triangulace (viz začátek kapitoly 3.). Popřípadě další možností je kamerový systém zkombinovat s dalším typem sensoriky, například dotykovým snímacím systémem, který dokáže získat data o třetí souřadnici. Takový souřadnicový měřicí stroj se poté nazývá multisenzorový (viz začátek kapitoly 4.1.1.)

### 3.2.2. Laser scanner

Laser scannery pro získání třetí souřadnice využívá principu aktivní triangulace, konkrétně 2D triangulace, kdy na měřený objekt není laserovým zdrojem promítán pouze jeden bod, ale laserová linie, proto se také často nazývají laserovými liniovými snímači. Schéma laser scanneru je popsáno na obrázku 31. Promítaná linie se vytvoří rozpohybováním laserového monochromatického paprsku za



Obrázek 31: Schéma laser scanneru [52]

pomoci pohybuujícího se zrcadla umístěného ve snímací hlavě scanneru, například rotujícího polygonového zrcadla [14]. Jednotlivé body jsou poté zaznamenávány snímačem například CCD kamerou z linie, která se deformuje na povrchu součásti vlivem jeho tvaru. Tím, že na součást není promítán pouze bod, ale celý laserový pruh, je snímání bodů mnohem produktivnější, neboť snímač zaznamenává všechny body na povrchu, které jsou nasvícené touto laserovou linií. Moderní laser scannerové hlavy dokážou snímat až 200 000 bodů za sekundu, ukázka takového laser scanneru je na obrázku 32 [53].



Obrázek 32: Laser scanner Nikon L100 [53]

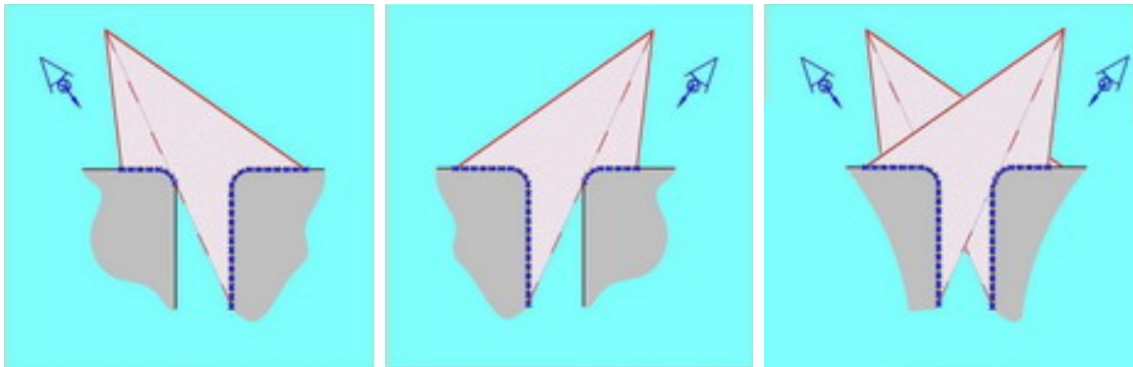
Mezi laser scannery se zároveň řadí tzv. **Cross scannery**, viz obrázek 33. Je to scanner, který se používá jako sensorika pouze pro stacionární kartézsky uspořádané stroje. Tento druh scanneru digitalizuje součást za pomoci tří laserových zdrojů, které na povrchu součásti vytvoří křížový vzor z tří laserových linií uspořádaných po  $120^\circ$  a tří kamerových snímačů. Z této konstrukce plyne oproti běžným laser scannerům několik výhod.



Obrázek 33: Cross scanner Nikon XC65Dx-LS [54]

Tou první je větší zaznamenaná plocha a dále ta výhoda, že tři paprsky zaznamenají povrch z více směrů, což je velice přínosné zejména pro skenování složitých tvarů, různých výstupků nebo obyčejných otvorů. Přínos spočívá v eliminaci několikanásobného opakovaného skenování v různých

orientacích scanneru při použití pouze jedné laserové linie, čímž se velice výrazně zredukuje potřebný čas a zvyšuje se produktivita pro měření dílů se složitějšími elementy. Příklad této problematiky je uveden na obrázku 34, kde v levé a prostřední části je naznačeno skenování otvoru jedním paprskem, kdy vždy dojde k vynechání určité zóny v otvoru, proto je pro zaznamenání celého otvoru zapotřebí obou skenů. Zatímco v pravé části je ke skenování využito cross scanner, jenž dokáže nasnímat otvor v jediném skenu. Naopak nevýhodou je, že cross scannery nedosahují takové přesnosti jako běžné laser scannery.



Obrázek 34: Skenování otvoru laser scannerem a cross scannerem [54]

Obecně celý proces skenování součásti probíhá tak, že laser scanner se pohybuje v určité pracovní vzdálenosti od povrchu. Pohyb, při kterém jsou extrahovány jednotlivé body součásti je dána typem CMM, na kterém je tento druh sensoriky upevněn. V případě kartézsky uspořádaných strojů je scanner řízen ve třech na sobě kolmých osách. Při umístění na měřících ramenech je manuálně naváděn kolem součásti. Během tohoto pohybu laser scanner zaznamenává jednotlivé snímky, které jsou určeny laserovým nasvícením. Výsledkem celého procesu skenování je enormní množství bodů nasnímaných v pracovním prostoru, které se také nazývá mračno bodů.

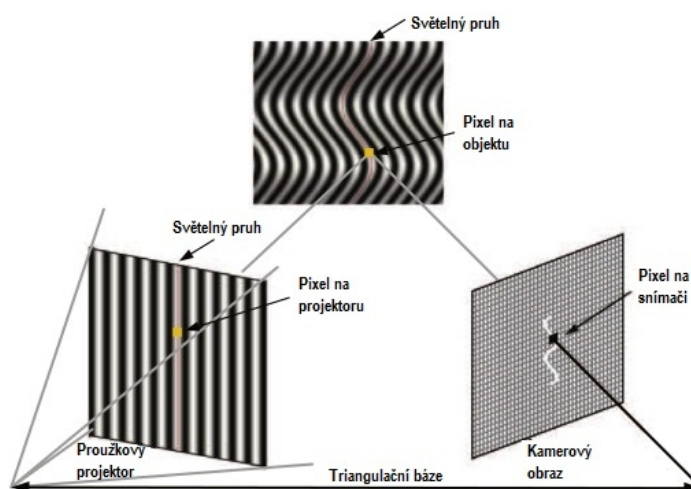
Kvalita naskenovaných dat závisí na hustotě mračna bodů, kterou lze nastavit před skenováním podle toho, jak moc kvalitní informace od skenu jsou očekávány. Nicméně pro vyhodnocení měřené součásti nelze využít veškerých naskenovaných bodů, neboť ne všechny body správně definují měřený objekt. Jedná se například o body upínacího systému, v němž je díl upnut atp., a proto po procesu skenování zpravidla následuje další operace s nasnímaným mrakem, které se realizují prostřednictvím příslušného softwaru. V prvním kroku dochází k mechanickému odstranění bodů, které na první pohled nejsou součástí měřeného objektu. V případě, že povrch byl nasnímán více než jednou, následuje odstranění těch bodů, které se v jednotlivých skenech vzájemně překrývají. Odstranění všech přebytečných bodů je přínosné i z toho důvodu, že software nemusí pracovat s takovým množstvím dat a ulehčuje tak další manipulaci s mrakem bodů. Po tomto odstranění následuje filtrování dat. Na mrak bodů se v softwaru navolí konkrétní filtr podle účelu nasnímaných dat. Pro metrologické účely, zejména v těch případech, u kterých má dojít k porovnání mraku s CAD modelem stačí aplikace jednoduchého filtru, popřípadě vůbec nemusí být aplikován. Naopak pro účely reverzního inženýrství, kdy má dojít k vytvoření nového CAD modelu musí být použity komplikovanější filtrovací algoritmy. Takto komplexně profiltrovaný mrak je následně proložen trojúhelníkovou sítí a lze z něj vytvořit model ve výměnném formátu, například STL [55].

Obecně výhodou technologie laser skenování je její produktivita. Naopak její nevýhodou je nemožnost aplikace na všechny materiály. Mezi tyto materiály patří ty, které mají vysoce lesklé, transparentní, nebo semi-transparentní povrchy. Lesklé materiály jsou nevhodné, neboť laserový paprsek se odrazí mimo a není zaznamenán snímačem nebo tvoří zdvojené obrazy. V případě transparentních a semi-transparentních materiálů projde paprsek skrz materiál nebo se odrazí jen částečně, což způsobí nekorektní zaznamenání dat [56].



### 3.2.3. Pruhová projekce

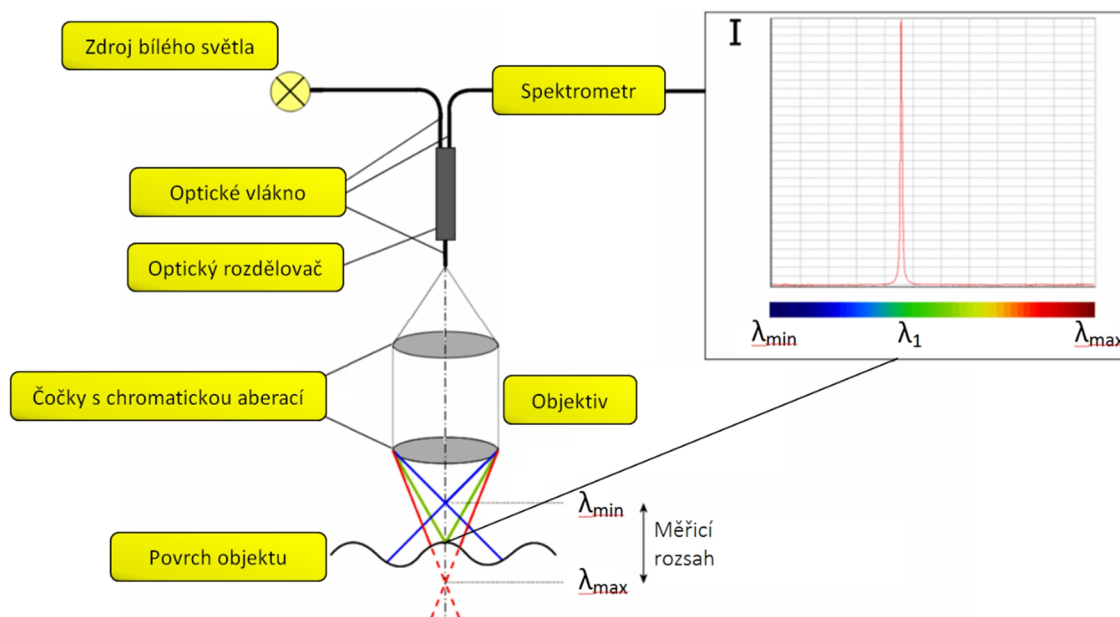
Další bezdotyková technologie, která pracuje také na principu triangulace se nazývá pruhová projekce. Schéma této technologie je vyobrazeno na obrázku 35. Na povrch měřené součásti jsou pomocí projektoru promítány vzory pruhů. Velice často jsou pruhy nasvíceny modrým světlem, aby bylo dosaženo co nejvyššího kontrastu pruhového vzoru na povrchu objektu a docházelo tak k co nejmenšímu ovlivnění měření vlivem okolního prostředí. Tyto pruhy se podle profilu povrchu deformují a jedním nebo více kamerovými snímači jsou zachytávány obrazy těchto zdeformovaných pruhů. Obvykle nestačí zaznamenání obrazů pouze v jedné poloze, proto je objekt nasnímán z více poloh. Model snímaného objektu je poté skládán v příslušném softwaru z jednotlivých obrazů, jež jsou vzájemně provázány přes referenční značky (terče), které se musí umístit na objekt před zahájením celého procesu skenování [57] [58].



Obrázek 35: Schéma pruhové projekce [58]

### 3.2.4. Chromatický senzor bílého světla

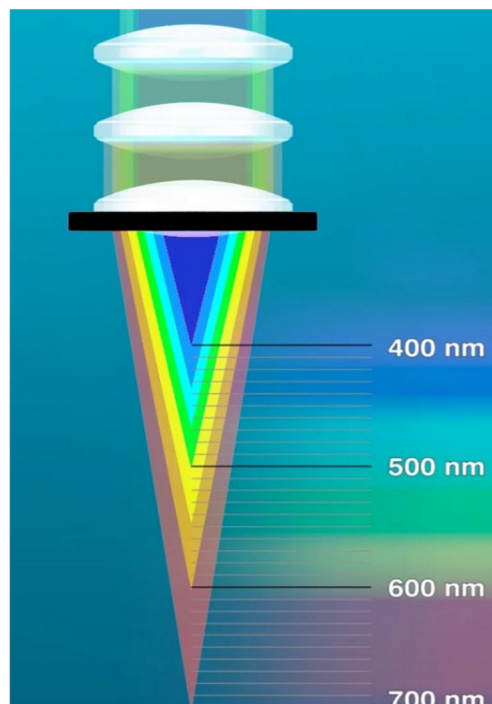
Chromatický senzor bílého světla nebo také anglicky Chromatic White Light Sensor (CWS) je optická, bezkontaktní sensorika s vysokou rozlišovací schopností. Pro získání dat z povrchu dílu využívá tato technologie chromatické aberace polychromatického bílého světla, ke které dochází na čočkách uvnitř objektivu. Obecně slovo aberace znamená chyba nebo odchylka, v tomto případě je tímto myšlena úmyslná odchylka v lomu světla tak, aby došlo k rozkladu bílého světla. Celý funkční princip je viditelný na obrázku 36.



Obrázek 36: Schéma chromatického senzoru bílého světla [59]

Bílé světlo je od zdroje přiváděno pomocí optického vlákna do snímací hlavy a fokusováno pomocí vícečočkového optického systému na cílený povrch. Čočky v tomto systému jsou koncipovány tak, aby došlo podél optické osy ke zmiňovanému rozkladu polychromatického bílého světla na celé spektrum jednotlivých vlnových délek patřící příslušným monochromatickým zářením, viz obrázek 37. Každá barva světla (vlnová délka) odpovídá jednomu bodu zaostření podél optické osy vyjadřující specifickou hodnotu ve směru osy Z. Odražené záření od povrchu prochází zpět konfokálními čočkami v objektivu a následně přes optický rozdělovač je směřováno do spektrometru. Počítač připojený ke spektrometru následně vyhodnotí odražené světelné spektrum a podle maxima intenzity příslušící konkrétní vlnové délce určí související výšku, tedy rozměr ve směru osy Z [60] [61] [62] [63].

Měřicí rozsah této sensoriky je roven axiální chromatické disperzi mezi nejkratší a nejdelší vlnovou délkou. A běžný měřicí rozsah výškového rozměru se pohybuje v rozsahu od desítek mikrometrů až po několik milimetrů.



Obrázek 37: Rozklad bílého světla na jednotlivé vlnové délky [64]

Zároveň jelikož má tato technologie relativně vysokou rozlišovací schopnost, která může být až 10 nm, lze ji rovněž využít pro vyhodnocení topografie povrchu. Senzor je rovněž vhodný pro skenování povrchu, kdy dokáže zaznamenávat až 1000 bodů za sekundu nebo je použitelný pro inline inspekci, u které dokáže pracovat s frekvencí až 70 kHz [62] [64] [65].

Přednostmi této technologie je vysoká přesnost měření, rychlost měření, velice malý konstantní měřicí bod, ale hlavně univerzální použití pro téměř všechny materiály. Optické uspořádání chromatického senzoru omezuje odraz zdroje záření, potlačuje záření z jiných směrů, což zvyšuje rozlišovací schopnost a umožňuje kontrolovat téměř všechny materiály, to znamená kontrolu více či méně transparentních skel nebo vysoce reflexivních povrchů. Typické aplikace například jsou: laminovaná skla, plošné spoje, lékařské implantáty, mikročochky atd. Naopak nevýhodou je malý měřicí rozsah, to znamená, že tato technologie není vhodná pro velké objekty [59] [63] [64] [65].

### **3.3. Hlavy snímacího systému**

Hlavní funkcí hlavy snímacího systému je nést zvolenou sensoriku pro konkrétní aplikaci. Konstrukce tohoto nosiče se odvíjí od typu CMM, pro nějž je určený a některé typy CMM dokonce umožňují volit z více druhů hlav. Hlava by měla být volena s ohledem na splnění všech měřicích požadavků konkrétní aplikace. Volba zároveň i význačně ovlivňuje výkonnost celého měřicího systému. Obecně lze hlavy dělit podle toho, zda přidávají k výchozím pohybovým osám stroje další možnosti v pohybu sensoriky, na pevné a otočné (indexovatelné) [42].

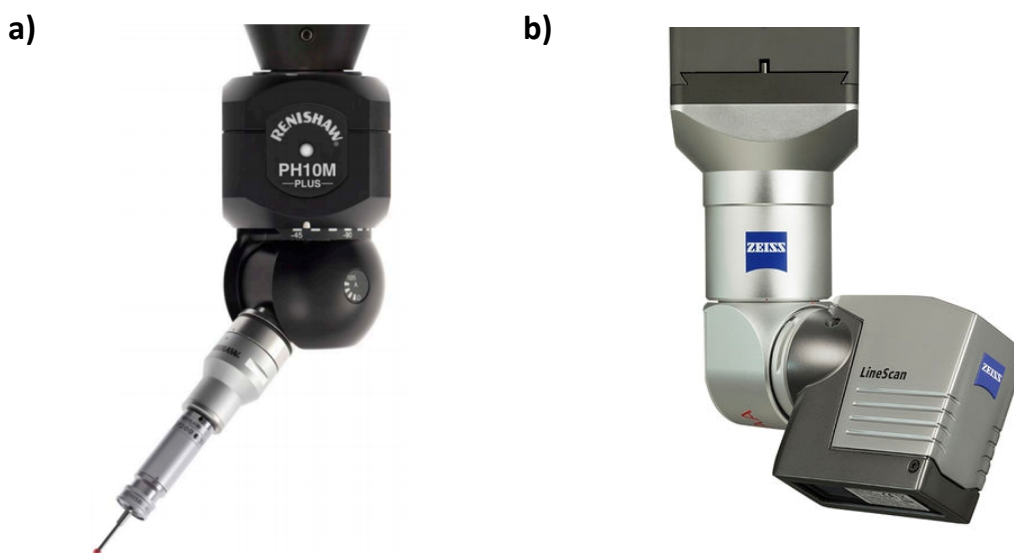
#### **3.3.1. Pevné hlavy**

Tyto hlavy nepřidávají sensorice žádné další pohybové osy a snímací systém je tak upevněn v hlavě v jedné fixní pozici. Sensorika se tak může pohybovat pouze podle pohybových os stroje a v případě kontaktní sensoriky musí být pro složitější díly sestaveny složitější konfigurace snímačů, aby bylo možné zkontrolovat i hůře dostupné elementy. Hlavní výhodou pevných hlav je jejich přesnost a opakovatelnost, neboť je eliminován pohyblivý mechanismus, jenž by do celého procesu měření vnášel další nepřesnosti [1] [42].

### 3.3.2. Indexovatelné hlavy

Indexovatelné hlavy přidávají stroji jednu nebo více pohybových os, a tak umožňují polohovat sensoriku v mnoha různých směrech. Většinou to bývají dvě rotační osy s určitým úhlovým krokem. Tento krok může mít různou velikost v závislosti na výrobci a typu hlavy, například 15°, 7,5° nebo 2,5°. Otočné hlavy jsou vyráběny ve dvou základních variantách, manuální a motorizovaná. Manuální vyžaduje napohování senzoru potřebným směrem a následnou jeho aretaci manuálně od operátora. U této hlavy je nutné poznamenat, že vnesené teplo od obsluhy při polohování může ovlivnit měření vlivem tepelné roztažnosti materiálu. Zatímco u motorizované hlavy je změna polohy senzoru prováděna strojem prostřednictvím programu, proto lze tuto variantu otočných hlav použít pouze na plně automatizovaných strojích. Příklad takové hlavy je uveden na obrázku 38a.

Jak již bylo uvedeno v předchozí podkapitole, tak předností otočných hlav je použití zpravidla jednodušších konfigurací kontaktních snímačů ve srovnání s pevnými hlavami. Avšak konstrukční provedení otočných hlav neumožňuje nést složité konfigurace nebo konfigurace se značným prodloužením, a to kvůli hmotnostním omezením. Velice přínosné je například použití otočné hlavy pro polohování bezkontaktní laser scannerů, které pak jsou schopny skenovat součást z více směrů, viz obrázek 38b [1] [42].



Obrázek 38: Ukázka indexovatelných hlav: a) s kontaktním snímačem [66] b) s bezkontaktním snímačem (laser scannerem) [67]

## **4. Praktická aplikace chromatického senzoru bílého světla**

### **4.1. Představení použité souřadnicové měřicí techniky**

Veškerá praktická měření byla prováděna na dvou souřadnicových strojích. První používaný stroj byl Zeiss O – Inspect 543, který disponoval chromatickým senzorem bílého světla. Druhý stroj, jenž sloužil k porovnání výsledků získaných pomocí chromatického senzoru bílého světla, se nazývá Zeiss Prismo. Specifikace a bližší představení těchto strojů je popsáno na následujících řádcích.

#### **4.1.1. Souřadnicový měřicí stroj – Zeiss O-Inspect 543**

Zeiss O-Inspect 543 (obrázek 39) je kartézsky uspořádaný stroj pevné mostové konstrukce (fixed bridge). Stroj je schopný se v pracovním prostoru pohybovat ve třech na sebe kolmých osách, popřípadě je možné přidat čtvrtou osu ve formě rotačního stolu. Pracovní prostor je vymezen 500 mm v ose X, 400 mm v ose Y a 300 mm v ose Z.

Toto zařízení se řadí do kategorie tzv. multisenzorových CMM, jejichž hlavní charakteristikou je možnost použití více typů snímacích systémů pro extrakci bodů z měřeného objektu. Multisenzorové CMM reagují na ten fakt, že každý typ sensoriky má své výhody a nevýhody, a neexistuje univerzální sensorika vhodná pro

všechny metrologické aplikace. Principiálně multisenzorové stroje většinou vycházejí z měřicího mikroskopu a přidáním dalších typů senzorů eliminují nedostatky kamerového systému měřicího mikroskopu. Zároveň přidaná sensorika dokáže rozšířit možnosti měření samotného kamerového systému, a tak zvětšit okruh aplikací, na které je toto zařízení využitelné. A proto se multisenzorové CMM využívají zejména pro komplexní výrobky s velkou škálou rozdílných geometrických prvků nebo nehomogenní výrobky sestávající se z více typů materiálů [1].



Obrázek 39: Zeiss O-Inspect 543 [68]

Konkrétní stroj byl vybaven kamerovým snímacím systémem, jenž slouží především pro měření ve 2D obraze, kontaktním snímacím systémem, který kompenzuje nevýhody kamerového systému, to znamená především měření ve výškové ose a z boku dílů. Protože je tento stroj velice často využíván pro měření dílů z plastu, silikonu a obecně materiálů, jejichž měření by mohlo být ovlivněno přitlačnou silou kontaktního snímače, tak pro rozšíření přesného měření ve výškové souřadnici stroj navíc disponuje chromatickým senzorem bílého světla. Bližší specifikace konkrétních snímacích systémů budou rozepsána na následujících řádcích.

### **Kontaktní snímací systém – Zeiss Vast XXT**

Jedná se o pasivní skenovací sondu, která umožňuje i bodové snímání při užití velice nízkých hodnot přitlačných sil. Nízké síly jsou účelné zejména pro kontrolu plastových tenkých dílů, u nichž by velké přitlačné síly mohly výrazně ovlivnit výsledky měření. Bližší specifikace o kontaktním snímacím systému jsou uvedeny v následující tabulce [69].

<b>Kontaktní snímací systém – Zeiss Vast XXT TL3</b>	
Max. rychlost bodového snímání [sekund na bod]	2,5
Max. rychlost skenování [body/s]	500
Snímací síla [N]	0,01-0,13 <sup>3</sup>
Max. měřicí rozsah [mm]	±1,7
Axiální délka dřívku snímacího doteku [mm]	30 - 150
Max. radiální délka dřívku snímacího doteku [mm]	65
Průměr snímacího doteku [mm]	0,3 - 8
Max. dovolená chyba při měření délky v 1D (X/Y/Z) MPE E <sub>0</sub> [μm]	1,6 + L/250 <sup>3,4</sup>
Max. dovolená chyba při měření délky v 2D (XY) MPE E <sub>0</sub> [μm]	1,7 + L/250 <sup>3,4</sup>
Max. dovolená chyba při měření délky v 3D MPE E <sub>0</sub> [μm]	1,9 + L/250 <sup>3,4</sup>
Max. dovolená mez rozsahu opakovatelnosti MPL R <sub>0</sub> [μm]	1,2
Max. dovolená chyba snímání při skenování MPE T <sub>HP</sub> [μm]	2,7 <sup>3</sup>
Max. možná doba zkoušky skenování MPT τ [s]	55 <sup>3</sup>
Max. dovolená chyba jednotlivého dotyku MPE P <sub>FTU</sub> [μm]	1,9 <sup>3</sup>
Max. dovolená chyba tvaru složeného doteku MPE P <sub>FTM</sub> [μm]	4,8 <sup>3</sup>
Max. dovolená chyba rozměru složeného doteku MPE P <sub>STM</sub> [μm]	1,2 <sup>3</sup>
Max. dovolená mez hodnoty polohy složeného doteku MPE P <sub>LTM</sub> [μm]	3,8 <sup>3</sup>

Tabulka 1 Specifikace kontaktního systému Vast XXT TL3 [70]

<sup>3</sup> Platí pro teplotní rozmezí 18 °C - 22 °C

<sup>4</sup> Platí pro testovací talířek Zeiss a závisí na délce dřívku

### **Kamerový systém – Zeiss Discovery V12**

Jedná se o 2D optický kamerový senzor s CMOS snímačem se schopností zpracování obrazu a autofokusem. Pro optimální nasvícení jednotlivých elementů měřeného objektu je k dispozici více světelných zdrojů, a to: procházející světlo, koaxiální zdroj světla i kruhové světlo. Diody kruhového světla jsou uspořádány do dvou soustředných kruhů. Vnější kruh je tvořen 16 červenými a 16 modrými LED diodami, které umožňují operátorovi odfiltrovat vliv vnějších světelných zdrojů a dokáží vhodně nasvítit barevné materiály s vysokým kontrastem. Menší vnitřní kruh se rovněž skládá z 16 červených a 16 modrých diod a zvyšuje kontrast povrchové textury materiálu [69]. Bližší specifikace jsou popsány v tabulce 2.

<b>Kamerový systém – Zeiss Discovery V12</b>	
Zoom	12x
Maximální počet snímků za sekundu [snímky/s]	30
Pracovní vzdálenost [mm]	87
Max. dovolená chyba při měření délky v 1D MPE $E_U$ (X/Y) [ $\mu\text{m}$ ]	$1,6 + L/250^{5,6}$
Max. dovolená chyba při měření délky 2D MPE $E_U$ (XY) [ $\mu\text{m}$ ]	$1,7 + L/250^{5,6}$
Max. dovolená mez 1D rozsahu opakovatelnosti MPL $R_U$ (Z) [ $\mu\text{m}$ ]	$1,9^{5,6}$
Max. dovolená mez 2D rozsahu opakovatelnosti MPL $R_U$ (XY) [ $\mu\text{m}$ ]	$1,2^{5,6}$
Max. dovolená chyba snímání MPE $P_{F2D}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$1,7^{5,6}$
Max. dovolená chyba snímání zobrazovací sondou MPE $P_{FV2D}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$1,2^{5,6}$

Tabulka 2: Specifikace kamerového systému Discovery V12 [70]

Zároveň kamerový systém má přednastaveno 10 hladin, kdy u každé z nich je pevně definovaná velikost zvětšení, přičemž v jedné této hladině, konkrétně při zvětšení 1,61x, má objektiv telecentrické vlastnosti. A pouze při dvou největších zvětšeních (3,20x a 6,3x) dokáže kamerový systém měřit v ose Z. Jednotlivé hladiny včetně jednotlivých zorných polí a hloubek ostrosti jsou uvedeny v tabulce 3.

<sup>5</sup> Platí při zvětšení 6,3x

<sup>6</sup> Platí pro teplotní rozmezí 18 °C - 22 °C

Přednastavené hladiny zvětšení (magnification levels)										
Zvětšení	0,50x	0,56x	0,65x	0,76x	0,93x	1,18x	1,61x	2,14x	3,20x	6,30x
Zorné pole [mm]	9,8 x 7,3	8,7 x 6,4	7,5 x 5,6	6,4 x 4,8	5,3 x 3,9	4,2 x 3,1	3,0 x 2,3	2,3 x 1,7	1,5 x 1,1	0,8 x 0,6
Hloubka ostrosti [mm]	±1,5	±1,3	±1,1	±0,9	±0,7	±0,5	±0,3	±0,2	±0,1	±0,03

Tabulka 3 Přednastavené hladiny zvětšení kamerového systému

### **Chromatický senzor bílého světla**

Chromatický senzor bílého světla je bezdotykový výškový senzor a dokáže pracovat ve třech režimech:

- snímání jednotlivých diskrétních bodů,
- skenování známé kontury (pohyb senzoru ve středu měřicího rozsahu podle nominálních dat),
- skenování neznámé kontury (nejsou známy nominální data a využívá se celý měřicí rozsah senzoru).

Bližší specifikace o chromatickém senzoru bílého světla jsou uvedena v tabulce 4.

Chromatický senzor bílého světla 3 mm	
Měřicí rozsah [mm]	3
Rozlišení [ $\mu\text{m}$ ]	0,1
Pracovní vzdálenost [mm]	22,5
Měřitelný rozsah natočení vůči senzoru [°]	90°±30°
Max. dovolená chyba měření délky $E_{\text{Uni:Tr:ODS}}(Z)$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,2 + L/250 <sup>7</sup>
Max. dovolená chyba celková snímání rozměru MPE $P_{\text{Size.Sph.All:Tr:ODS}}(Z)$ [ $\mu\text{m}$ ]	5 <sup>7</sup>

Tabulka 4: Specifikace chromatického senzoru bílého světla [70]

<sup>7</sup> Platí pro teplotní rozmezí 18 °C - 22 °C



Velice podstatným procesem při měření senzorem bílého světla je proces nastavení optických parametrů senzoru pro povrch, který má být měřen. Jedná se především o tyto parametry, jejichž doporučené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5:

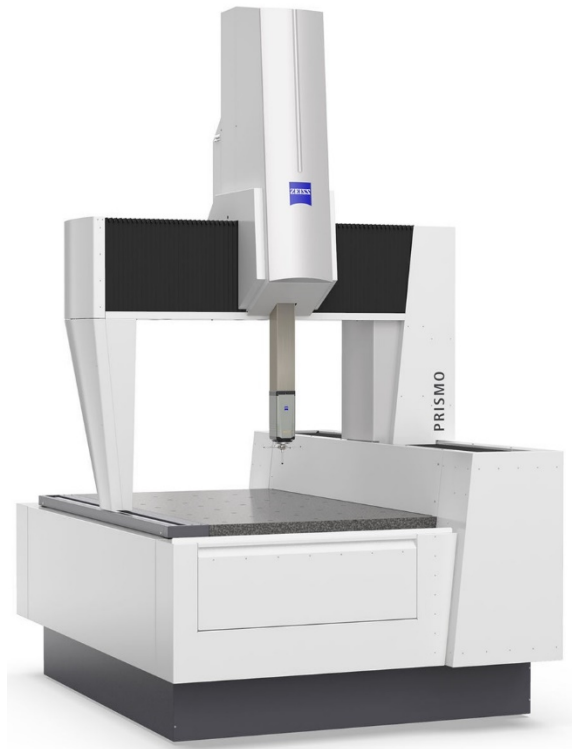
- **Vzorkovací frekvence** (sample rate) udává počet měření za sekundu, a tedy její hodnotou je určena i doba jednoho měřicího cyklu. Doba měřicího cyklu je měřena od zapnutí zdroje bílého světla až po vyhodnocení odraženého světla od vzorku. Tato doba ovlivňuje množství světelné energie, která se odrazí do měřicí buňky.
- **Automatická expozice** (automatic exposure) definuje nominální hodnotu pro množství světla, které se odrazí do měřicí buňky za jeden měřicí cyklus. Jakmile je tato nominální hodnota dosažena, světelný zdroj se vypne.
- **Práh** (treshold) pro odrazy interferujícího světla v oblasti kontrolovaného objektu. Čím vyšší hodnota bude nastavena, tím více světla bude potlačeno [71].

<b>Materiál</b>	<b>Vzorkovací frekvence [Hz]</b>	<b>Automatická expozice [-]</b>	<b>Práh [-]</b>
Zelený plast	750	200	30
Bílý plast	1500	200	30
Červený plast	500	170	30
Modrý plast	750	180	30
Pochromovaný plast	1750	200	30
Sklo	750	205	30
Matný černý plast	750	200	30
Lesklý černý plast	1000	190	30
Broušená ocel	1000	180	30
Hliník	1750	170	30

*Tabulka 5: Doporučené hodnoty parametrů pro jednotlivé typy materiálů*

#### 4.1.2. Souřadnicový měřicí stroj – Zeiss Prismo

Druhým používaným strojem pro měření byl Zeiss Prismo (ilustrační obrázek 40). Opět se jedná o kartézsky uspořádaný CMM, jehož konstrukce je typu pohyblivého mostu. Pracovní rozsah konkrétního stroje Prismo je 900 mm v ose X, 1200 mm v ose Y a 650 mm v ose Z. Nejedná se o multisenzorový stroj, neboť pro extrakci bodů z objektu nelze použít kombinaci více typů snímacích systémů. Konkrétní stroj používal pro snímání bodů kontaktní skenovací systém Vast Gold fungující na aktivním principu skenování. Bližší specifikace o snímacím systému jsou uvedeny v tabulce 6.



Obrázek 40: Zeiss Prismo [72]

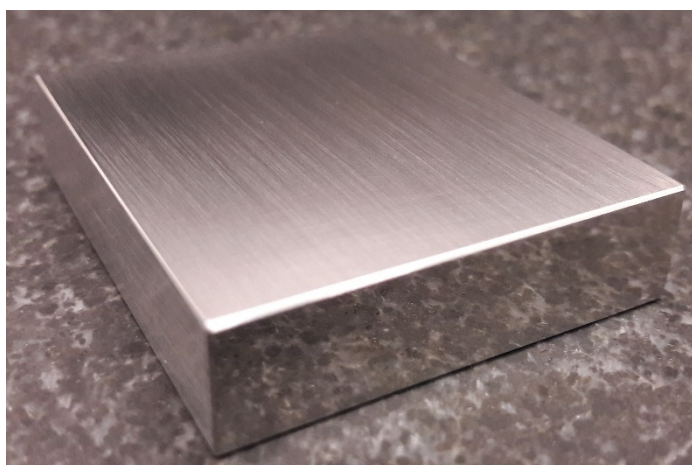
Kontaktní snímací systém – Zeiss Vast gold	
Max. rychlost bodového snímání [sekund na bod]	2,5
Max. rychlost skenování [body/s]	200
Snímací síla [mN]	50-1000
Max. měřicí rozsah [mm]	±1,7
Max. délka dřívku snímacího doteku [mm]	800
Max. hmotnost konfigurace snímacího doteku [g]	600
Min. průměr snímacího doteku [mm]	0,3
Max. dovolená chyba při měření délky v 1D (X/Y/Z) MPE E0 [μm]	2,2+ L/300 <sup>8</sup>
Max. dovolená chyba při měření délky v 3D MPE E0 [μm]	2,7 + L/300 <sup>8</sup>
Max. dovolená chyba jednotlivého dotyku MPE PFTU [μm]	2,2

Tabulka 6 Specifikace kontaktního systému Vast gold

<sup>8</sup> Platí pro teplotní rozmezí 20 °C - 22 °C

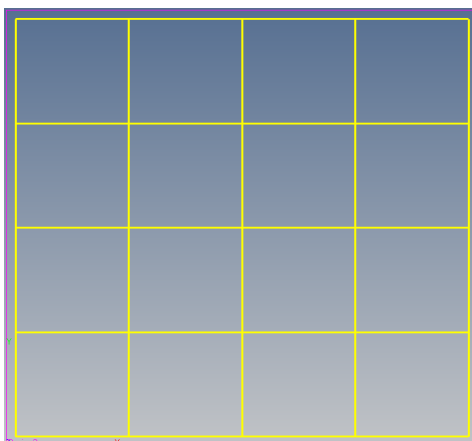
## 4.2. Vliv typu povrchu, jednotlivých parametrů nastavení CWS, rychlosti a naklopení na přesnost měření CWS

Pro tento experiment byla vybrána koncová měrka (viz obrázek 41), jejíž povrch je opracován dvěma způsoby. První způsob opracování je broušení, které vytvořilo matný povrch a druhý způsob je lapování, jehož výsledkem je lesklý povrch s vysokou reflektivitou. Kromě vlivu typu povrchu tento experiment navíc hodnotí vliv jednotlivých parametrů nastavení senzoru bílého světla, rychlost, při níž senzor extrahuje jednotlivé body z povrchu součásti a nakonec naklopení povrchu vůči optické ose senzoru. Jaký dopad na přesnost senzoru mají tyto jednotlivé vlivy bylo posuzováno na rovinnosti ploch na obou typech povrchu.



Obrázek 41: Koncová měrka

Plocha měla vždy stejné souřadnice pro daný typ povrchu i při jednotlivých měřeních. Na každém typu povrchu byla vždy vymezena stejná část povrchu o ploše  $25 \text{ mm}^2$  a tato plocha byla měřena pomocí rastrové strategie ve dvou na sebe kolmých směrech. Rastr byl nastaven tak, že povrch byl snímán pomocí pěti linií vzdálených od sebe 1 mm v každém směru (viz obrázek 42). Na celé ploše bylo nastaveno 3600 bodů k extrakci. Rovinnost byla vždy vyhodnocována z měřených bodů pomocí elementu minima, kdy rovina byla připasována vůči měřeným bodům tak, aby vznikla co nejmenší odchylka mezi vypočtenou a skutečnou konturou. Následně pro vypočtený element roviny byla aplikována nízkopásmová filtrace plus filtrace všech odlehlých hodnot, které se nenacházely v oblasti  $\pm 3$  směrodatných odchylek naměřených hodnot.



Obrázek 42: Strategie pro snímání měřené plochy

#### 4.2.1. Lapovaná plocha

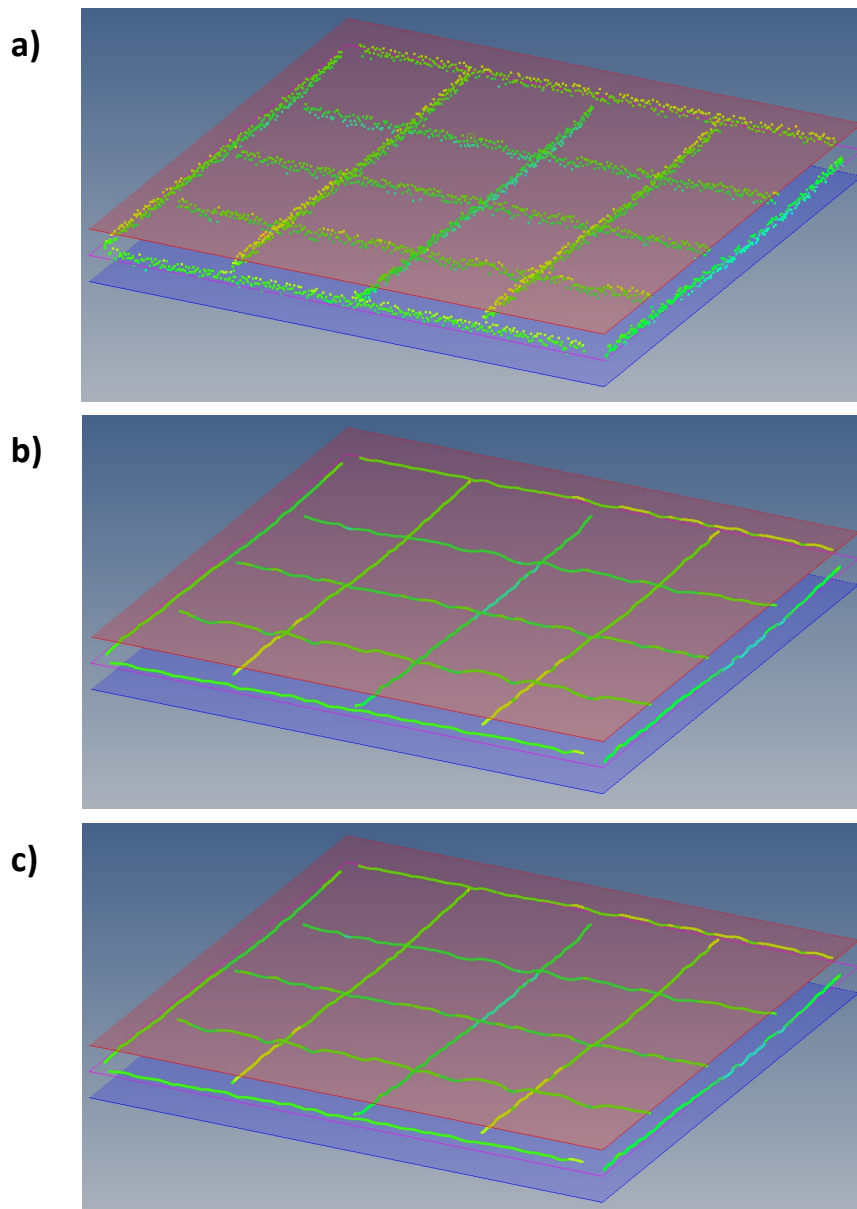
Pro lapovaný povrch byl zvolen nízkopásmový filtr typu Gauss o mezní vlnové délce 0,25 mm, který byl vhodným kompromisem mezi naměřenou hodnotou drsnosti povrchu Ra (viz tabulka 7) a počtem bodů na ploše 25 mm<sup>2</sup>. Protokol z měření drsnosti je součástí přílohy, viz příloha 1.

Drsnost lapované plochy		
Číslo měření	Hodnota Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Hodnota Rz [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,0088	0,0517
2	0,0083	0,0571
3	0,0091	0,0634
4	0,0079	0,0501
5	0,0090	0,0557
Průměrná hodnota	0,00862	0,0556

Tabulka 7: Drsnost lapované plochy

##### 4.2.1.1. Měření rovinnosti na CMM Zeiss Prismo

Pro získání referenční hodnoty rovinnosti, se kterou by bylo možno porovnat výsledky získané senzorem CWS, byl použit stroj Zeiss Prismo s kontaktním skenovacím snímacím systémem. Měření bylo prováděno se snímačem s kulovým snímacím elementem o průměru 1,35 mm a ve směru osy pinoly, to znamená ve směru osy Z. Ukázky naměřených bodů jsou znázorněny na obrázku 43. Obrázek 43a ukazuje naměřené hodnoty bez filtrace, na obrázku 43b jsou hodnoty zatíženy filtrací a na obrázku 43c jsou navíc eliminovány odlehlé hodnoty. Červená a modrá plocha vymezuje toleranční pole o velikosti 0,001 mm a jsou přítomny na všech obrázcích z měření lapované plochy.



Obrázek 43: Rovinnost lapované plochy měřené na CMM Zeiss Prismo a) naměřené body b) po aplikaci filtru c) po aplikaci filtru a eliminaci odlehlých hodnot

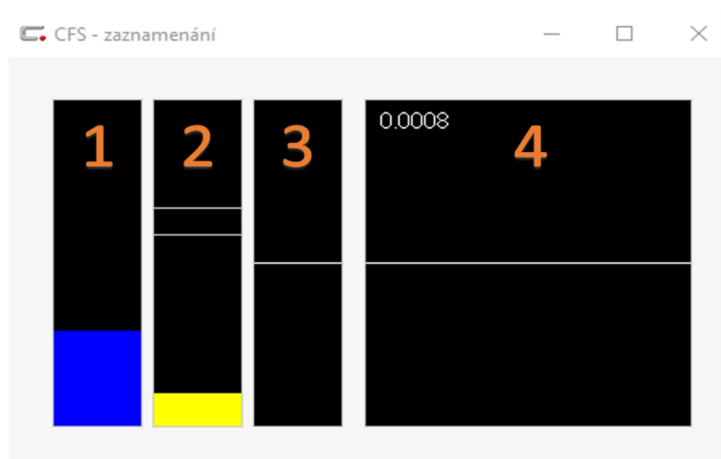
Celkově bylo uskutečněno 10 měření rovinnosti, výsledky včetně počtu bodů, z nichž byly rovinnosti vyhodnocovány, jsou uvedeny v tabulce 8. Tyto tři varianty vyhodnocení byly u referenčního měření jen pro demonstraci vlivu jednotlivých způsobů vyhodnocení. Výsledky ze všech následujících měření pro lapovaný povrch jsou uváděny pouze ve dvou variantách, a to bez filtrace a s filtrací plus s eliminací odlehlých hodnot.

Číslo měření	Měření rovinnosti na Zeiss Prismo [mm]					
	Bez filtrace		Filtrace		Filtrace + eliminace odlehých hodnot	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0006	3404	0,0004	3404	0,0004	3402
2	0,0006	3404	0,0004	3404	0,0004	3402
3	0,0005	3403	0,0003	3403	0,0003	3402
4	0,0005	3404	0,0003	3404	0,0003	3400
5	0,0005	3402	0,0003	3402	0,0003	3399
6	0,0006	3405	0,0004	3405	0,0004	3398
7	0,0005	3403	0,0003	3403	0,0003	3401
8	0,0005	3403	0,0003	3403	0,0003	3401
9	0,0006	3403	0,0004	3403	0,0004	3402
10	0,0006	3401	0,0003	3401	0,0003	3399
Průměrná hodnota	0,00055	3403	0,00034	3403	0,00034	3401
Směrodatná odchylka	0,000050	/	0,000049	/	0,000049	/

Tabulka 8: Hodnoty rovinností lapované plochy naměřené na Zeiss Prismo

#### 4.2.1.2. Vliv nastavení CWS na rovinnost lapované plochy

Velice podstatným procesem při měření pomocí CWS je proces nastavení jednotlivých parametrů (viz tabulka 5), při nichž senzor bílého světla extrahuje body. Jednotlivé parametry se nastavují pomocí softwarového okna (viz obrázek 44), které celý proces nastavení uživateli usnadňuje. Indikátor 1 (modrý sloupec) indikuje dobu expozice pro jedno měření, indikátor 2 (žlutý sloupec) indikuje množství světelné energie odražené zpět do objektivu pro jedno měření. Bílá linie uvnitř sloupce 3 znázorňuje aktuální hodnotu vzdálenosti od středu měřicího rozsahu, jejíž číselná hodnota je uvedena v levém rohu pole 4 a v poli 4 je zobrazen střed měřicího rozsahu (bílá linie).



Obrázek 44: Okno pro nastavení parametrů CWS

Dle manuálu výrobce by se měly parametry nastavovat tak, aby indikátor světelné energie se nacházel v optimálním pásmu, které je vymezeno dvojicí rovnoběžných přímk [74]. Toto pásmo je viditelné na obrázku 44 v poli 2. V případě, kdy se indikátor nachází nad tímto pásmem dochází k „přesvícení“, naopak v oblasti pod optimálním pásmem je světelné energie málo. V závislosti na této informaci bylo vytvořeno 5 nastavení.

Postup pro jejich tvorbu byl takový, že na začátku bylo vybráno jedno z přednastavených hodnot parametrů podle typu materiálu (viz tabulka 5), při kterém se množství odražené světelné energie, co nejvíce blížilo optimálnímu pásmu, v případě lapované plochy se jednalo o přednastavené hodnoty pro pochromovaný plast. Tyto přednastavené parametry se následně upravovaly tak, aby vzniklo 5 zmíněných nastavení, které jsou podrobněji popsány níže. Hodnoty parametrů při jednotlivých nastaveních, včetně přednastavených hodnot pro pochromovaný plast, ze kterých se vycházelo, jsou uvedeny v tabulce 9.

<b>Nastavení</b>	<b>Vzorkovací frekvence [Hz]</b>	<b>Automatická expozice [-]</b>	<b>Práh [-]</b>
Pochromovaný plast	1750	200	30
a)	2000	220	30
b)	2000	223	30
c)	2000	215	30
d)	2000	230	30
e)	100	5	30

*Tabulka 9: Hodnoty parametrů CWS pro jednotlivá nastavení u lapované plochy*

Z tabulky 9 je patrné, že prahová hodnota zůstala u všech nastaveních konstantní, neboť tento parametr neměl na hodnotu doby expozice nebo světelné energie žádný vliv, mimo jiné je tato prahová hodnota doporučena v manuálu. Pro tvorbu jednotlivých nastaveních byla upravena pouze vzorkovací frekvence a automatická expozice, u níž platilo, že čím vyšší její hodnota byla nastavena, tím vyšší byl indikátor pro množství světelné energie. Toto chování platilo přibližně do hodnoty okolo 227, nad tuto hodnotu doba expozice i množství světelné energie rostly na maximální hodnotu.

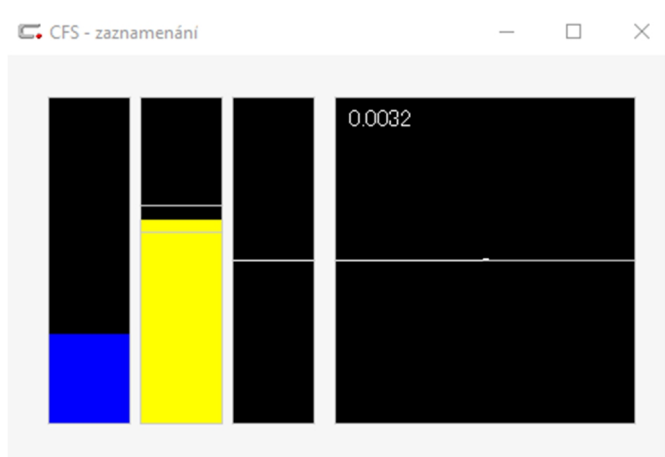
Veškerá tato nastavení byla vytvořena při nulovém naklopení plochy, to znamená, že plocha byla kolmá k optické ose senzoru a vždy ve výchozí poloze, tedy v místě, kde byl počátek měřené plochy. Zároveň body byly vždy u jednotlivých nastavení extrahovány při nízké rychlosti (0,5 mm/s), aby se do výběru vhodného nastavení nevnášel vliv rychlosti, při níž senzor snímal body z povrchu.

Jednotlivá nastavení jsou popisována pomocí indikátorů světelné energie (žlutý sloupec) a doby expozice (modrý sloupec). Poslední dvě nastavení (d a e) byla experimentální a záměrně byla vytvořena v rozporu s manuálem, aby bylo možno konstatovat jakých výsledků je možné se dobat při špatném nastavení.

Obrázky popisující extrahované body včetně následné filtrace při jednotlivých nastaveních jsou utříděny v tabulce 10.

#### a) nastavení s hodnotou světelné energie přibližně ve středu optimálního pásma

Parametry pro senzor byly ve výchozí poloze při tomto nastavení nastaveny tak, aby se indikátor světelné energie nacházel přibližně uprostřed optimálního pásma (viz obrázek 45). Toto nastavení se vyznačovalo tím, že při přejezdu senzoru nad lapovanou plochou docházelo na některých částech plochy k občasnému vychýlení hodnoty světelné energie (žlutého sloupce) nad horní hranici optimálního pásma. Když došlo k překročení této horní hranice, tak obecně indikátor pro světelnou energii měl tendenci být maximální. Velikost indikátoru pro dobu expozice (modrý sloupec) je patrna z obrázku 44 a při vychýlení hodnoty světelné energie nad horní hranici se nepatrně zvětšovala, tzn., že doba expozice pro jedno měření byla nepatrně větší.



Obrázek 45: Okno pro nastavení parametrů CWS při nastavení a)



**b) nastavení s hodnotou světelné energie přibližně na horní hranici optimálního pásma**

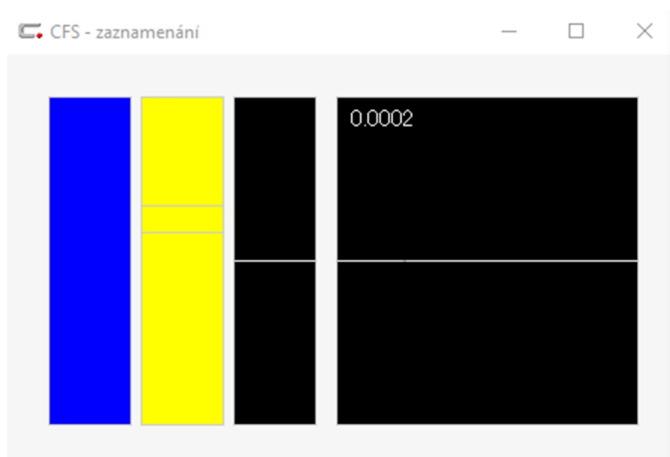
Parametry pro senzor byly při nastavení b) nastaveny tak, aby indikátor světelné energie se nacházel přibližně u horní hranice optimálního pásma. Při tomto nastavení se senzor choval tak, že při jeho pohybu nad lapovanou plochou docházelo k častému vychýlení hodnoty světelné energie nad horní hranici optimálního pásma. Indikátor doby expozice byl přibližně stejně vysoký jako při nastavení a), viz obrázek 45 a opět při vychýlení světelné energie nad hranici horního pásma docházelo k jeho nepatrnému vzrůstu. Z obrázku při tomto nastavení v tabulce 10 je patrné, že častější vychýlení světelné energie nad horní mez mělo za následek větší počet nekorektně extrahovaných bodů.

**c) nastavení s hodnotou světelné energie přibližně u dolní hranice optimálního pásma**

Při třetím nastavení byl senzor nastaven tak, aby se indikátor světelné energie nacházel přibližně u dolní hranice optimálního pásma, což sice mělo za následek, že při pohybu senzoru nad lapovanou plochou se občas hodnota světelné energie dostala v malé míře pod optimální pásma, avšak téměř vůbec nedocházelo ke vzrůstu její hodnoty přes horní hranici optimálního pásma. Hodnota doby expozice byla opět podobná jako při nastavení a). Z obrázku reprezentující toto nastavení v tabulce 10 je patrný vliv toho faktu, že světelná energie se nevychylovala nad horní mez optimálního pásma, následkem čehož nedocházelo k extrakci velkého množství nekorektních bodů.

**d) nastavení s maximální hodnotou světelné energie a s maximální dobou expozice**

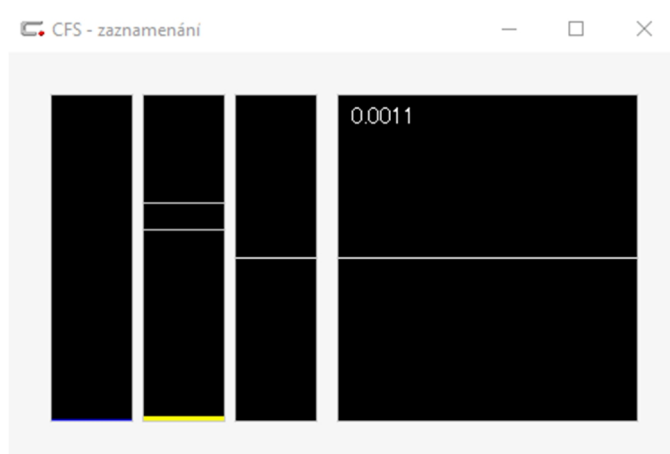
Toto nastavení bylo záměrně nastaveno tak, aby oba indikátory byly co nejvyšší (viz obrázek 46), což znamená, že světelná energie i doba expozice bude co největší. Body extrahované z lapované plochy při tomto nastavení jsou znázorněny na obrázku v tabulce 10. Z něho je patrné, že došlo k extrahování velkého počtu bodů v oblasti pod dolní mezní tolerancí.



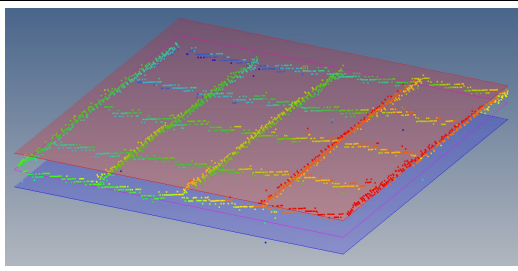
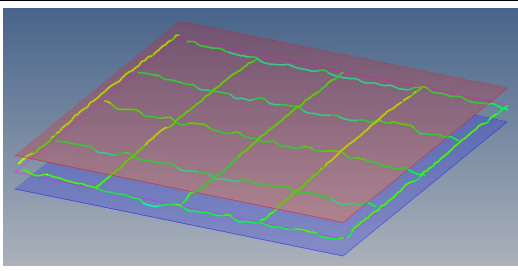
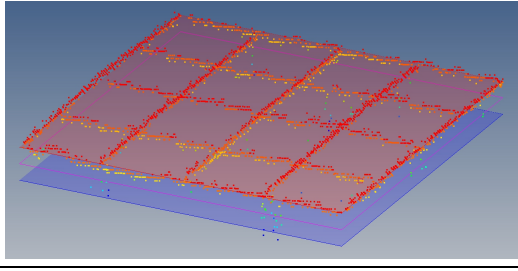
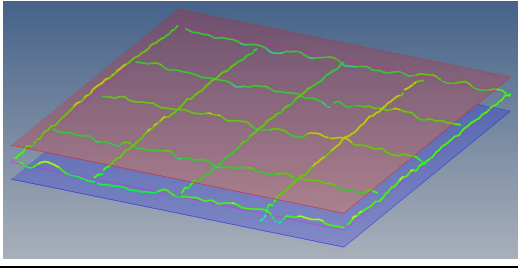
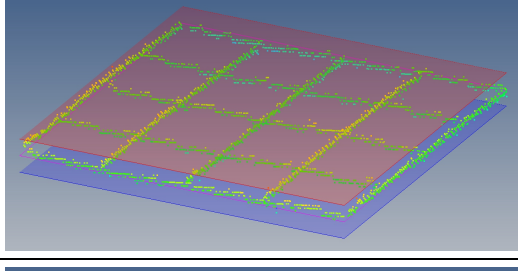
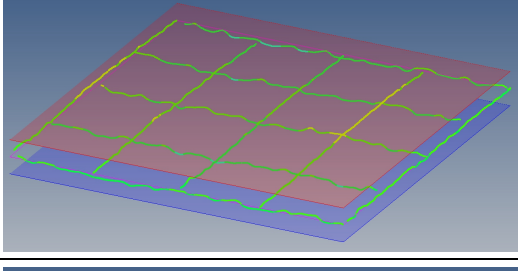
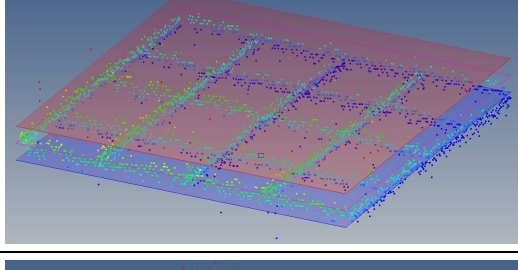
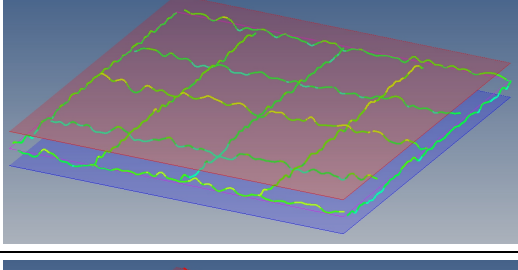
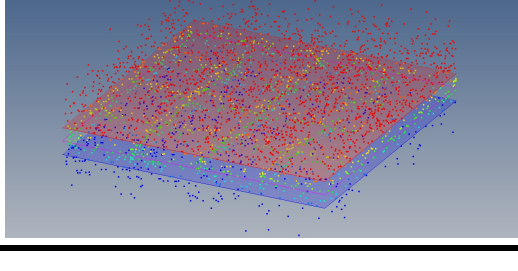
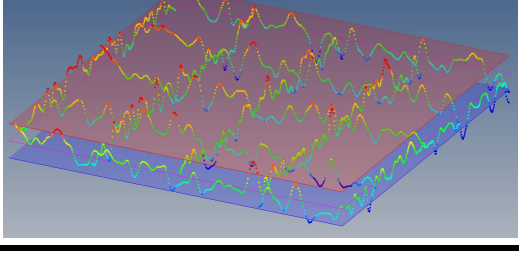
Obrázek 46: Okno pro nastavení parametrů CWS při nastavení d)

**e) nastavení s minimální hodnotou světelné energie a s minimální dobou expozice**

Toto nastavení bylo záměrně nastaveno tak, aby oba indikátory byly co nejnižší (viz obrázek 47), což znamená, že světelná energie i doba expozice bude co nejmenší. Je patrné, že při tomto nastavení došlo k extrakci velkého množství bodů jak pod dolní mezní tolerancí, tak i nad horní mezní tolerancí (viz tabulka 10).



Obrázek 47: Okno pro nastavení parametrů CWS při nastavení e)

Ukázky rovinností při jednotlivých nastaveních		
Nast.	Bez filtrace	Filtrace + eliminace odlehlých hodnot
a)		
b)		
c)		
d)		
e)		

Tabulka 10: Ukázky rovinností lapované plochy při jednotlivých nastaveních

Porovnání číselných hodnot rovinností při jednotlivých nastaveních, včetně počtu bodů, z nichž byly vyhodnoceny, je uvedeno v tabulce 11. Po aplikaci filtrace a eliminaci odlehlých hodnot byly hodnoty velice podobné, jedinou výjimkou byla hodnota rovinnosti získaná při nastavení e). Zároveň je z tabulky 10 vidět, že výsledky rovinností jsou víceméně srovnatelné s referenční hodnotou rovinnosti získané kontaktním snímacím systémem.

Z těchto pěti nastavení parametrů byly vybrána nastavení a) a c) pro další experimentální částí této práce, neboť při těchto nastaveních byly extrahované body nejméně neuspořádané.

Nastavení	Hodnoty rovinností při jednotlivých nastaveních [mm]			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
a)	0,0015	3480	0,0005	3461
b)	0,0016	3479	0,0005	3426
c)	0,0008	3480	0,0004	3466
d)	0,0025	3480	0,0005	3441
e)	0,0058	3480	0,0017	3465

Tabulka 11: Hodnoty rovinností lapované plochy při jednotlivých nastaveních

#### 4.2.1.3. Vliv rychlosti pohybu CWS na rovinnost lapované plochy

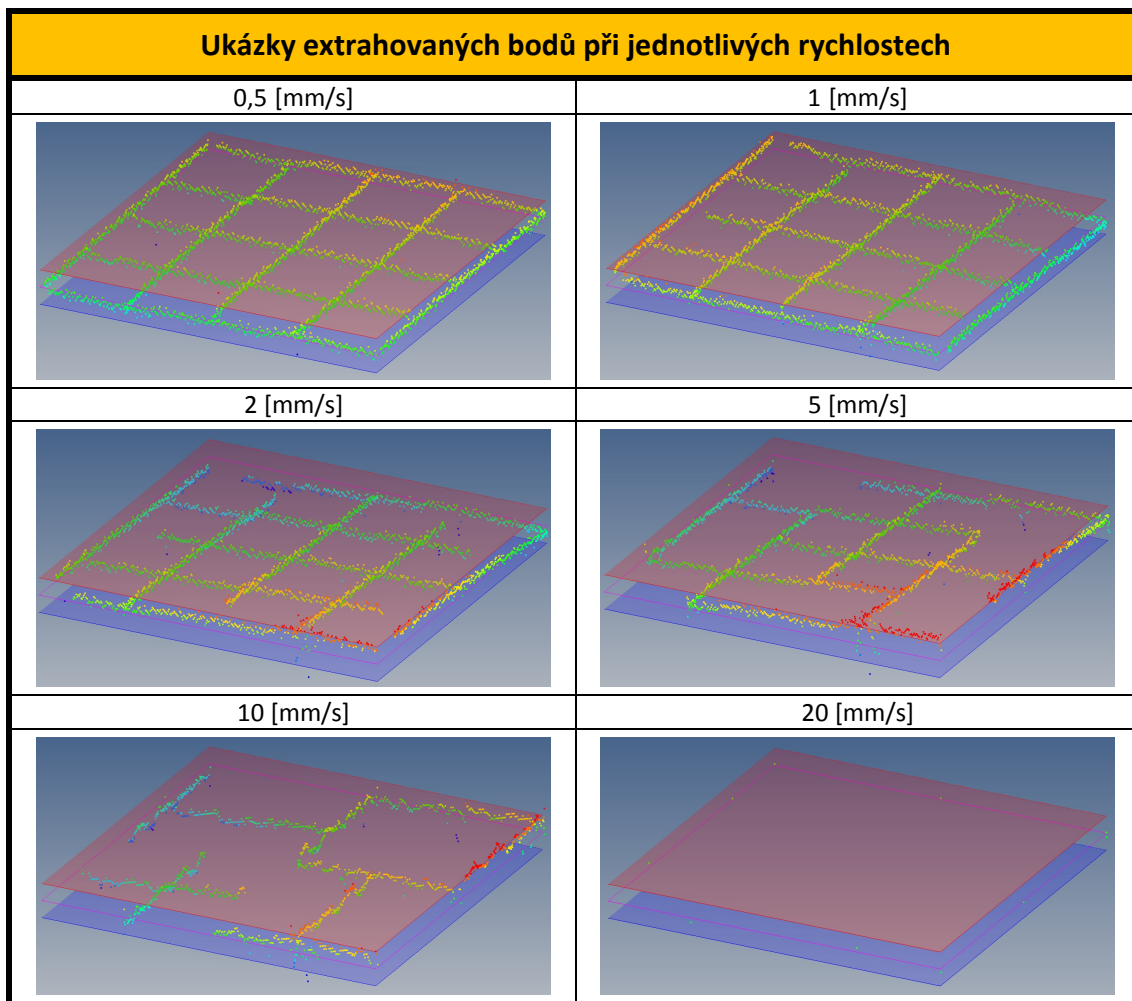
Dalším aspektem, u kterého byl zkoumán vliv na měření rovinnosti lapované plochy, byla rychlost. Pro dvě nastavení CWS, která byla vybrána v předchozí podkapitole, bylo určeno šest rychlostí (0,5; 1; 2; 5; 10; 20 mm/s). Pro každé nastavení a každou rychlost bylo provedeno 10 měření rovinnosti, z nichž byla následně vybrána rychlost a nastavení pro poslední část experimentu u lapované plochy, a to vliv naklopení plochy vůči optické ose CWS na rovinnost. Veškeré naměřené hodnoty, včetně počtu bodů, z nichž byly hodnoty vyhodnocovány jsou shrnuty v tabulkách 12 a 13. Grafické závislosti vyplývající z naměřených dat po provedené filtraci a eliminaci odlehlých hodnot jsou umístěny za tabulkami. Jako ukázka vlivu rychlosti na extrahované body slouží tabulka 14, ve které jsou umístěny obrázky extrahovaných nefiltrovaných bodů při jednotlivých rychlostech. Jelikož byl trend u obou nastavení velice podobný, je pro ukázku v tabulce 14 pouze jediné nastavení, a to nastavení c).

Hodnoty rovinností při jednotlivých rychlostech [mm]												
Nastavení a)												
Číslo měření	Rychlost 0,5 mm/s				Rychlost 1 mm/s				Rychlost 2 mm/s			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0015	3479	0,0003	3452	0,0015	3363	0,0002	3329	0,0017	3150	0,0004	3093
2	0,0014	3479	0,0002	3456	0,0012	3363	0,0003	3324	0,0017	3155	0,0004	3093
3	0,0014	3480	0,0002	3459	0,0014	3363	0,0003	3322	0,0016	3159	0,0003	3093
4	0,0013	3479	0,0003	3461	0,0016	3361	0,0003	3319	0,0016	3163	0,0003	3104
5	0,0013	3479	0,0002	3462	0,0014	3364	0,0003	3326	0,0017	3159	0,0004	3097
6	0,0015	3480	0,0003	3457	0,0014	3366	0,0002	3325	0,0018	3156	0,0003	3098
7	0,0014	3480	0,0003	3456	0,0015	3364	0,0002	3327	0,0016	3160	0,0003	3105
8	0,0017	3479	0,0002	3458	0,0015	3365	0,0002	3323	0,0017	3155	0,0004	3094
9	0,0014	3479	0,0003	3458	0,0013	3362	0,0003	3318	0,0018	3155	0,0004	3098
10	0,0014	3480	0,0003	3457	0,0014	3362	0,0003	3320	0,0017	3157	0,0004	3101
Prům. hodnota	<b>0,00143</b>	<b>3479</b>	<b>0,00026</b>	<b>3458</b>	<b>0,00142</b>	<b>3363</b>	<b>0,00026</b>	<b>3323</b>	<b>0,00169</b>	<b>3157</b>	<b>0,00036</b>	<b>3098</b>
Sm.odchylka	0,000110		0,000049		0,000108		0,000049		0,000070		0,000049	
Číslo měření	Rychlost 5 mm/s				Rychlost 10 mm/s				Rychlost 20 mm/s			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0015	2505	0,0006	2434	0,0018	1583	0,0006	1563	0,0003	10	0,0003	10
2	0,0015	2503	0,0005	2438	0,0017	1587	0,0005	1558	0,0002	10	0,0002	10
3	0,0016	2502	0,0006	2442	0,0017	1581	0,0006	1551	0,0003	10	0,0003	10
4	0,0016	2505	0,0005	2437	0,0016	1587	0,0006	1556	0,0002	10	0,0002	10
5	0,0015	2498	0,0006	2434	0,0016	1585	0,0005	1558	0,0002	10	0,0002	10
6	0,0016	2504	0,0006	2438	0,0017	1586	0,0005	1560	0,0002	10	0,0002	10
7	0,0017	2506	0,0006	2438	0,0017	1586	0,0006	1562	0,0003	10	0,0003	10
8	0,0014	2500	0,0005	2427	0,0018	1586	0,0006	1560	0,0003	10	0,0003	10
9	0,0016	2501	0,0005	2431	0,0016	1584	0,0006	1558	0,0002	10	0,0002	10
10	0,0015	2503	0,0005	2442	0,0015	1586	0,0007	1560	0,0003	10	0,0003	10
Prům. hodnota	<b>0,00155</b>	<b>2503</b>	<b>0,00055</b>	<b>2436</b>	<b>0,00167</b>	<b>1585</b>	<b>0,00058</b>	<b>1559</b>	<b>0,00025</b>	<b>10</b>	<b>0,00025</b>	<b>10</b>
Sm. odchylka	0,000081		0,000050		0,000090		0,000060		0,000050		0,000050	

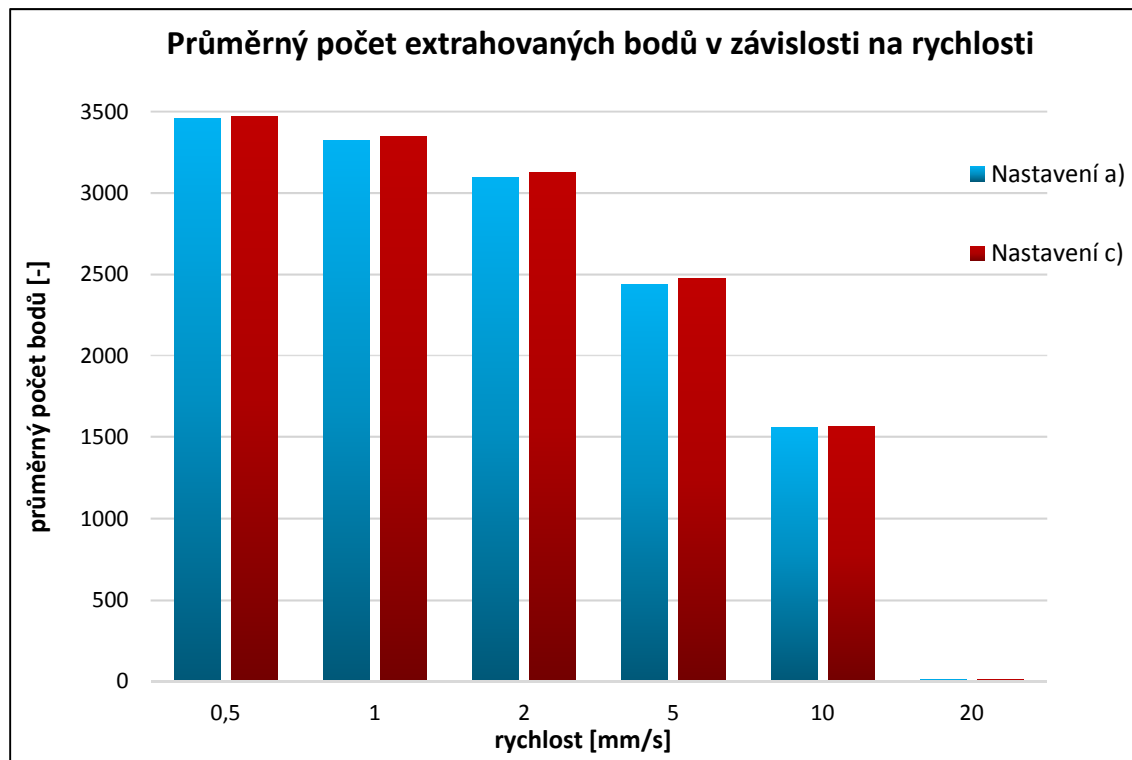
Tabulka 12: Hodnoty rovinností lapované plochy při jednotlivých rychlostech při nastavení a)

Hodnoty rovinností při jednotlivých rychlostech [mm]												
Nastavení c)												
Číslo měření	Rychlost 0,5 mm/s				Rychlost 1 mm/s				Rychlost 2 mm/s			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0012	3480	0,0003	3468	0,0012	3362	0,0003	3345	0,0014	3151	0,0003	3123
2	0,0014	3480	0,0003	3470	0,001	3364	0,0003	3346	0,0013	3152	0,0003	3126
3	0,0014	3480	0,0003	3465	0,001	3365	0,0002	3349	0,0013	3156	0,0003	3132
4	0,0009	3480	0,0002	3463	0,0009	3365	0,0003	3351	0,0013	3159	0,0003	3131
5	0,001	3480	0,0003	3467	0,001	3361	0,0003	3346	0,0014	3153	0,0003	3125
6	0,0014	3480	0,0003	3473	0,0013	3362	0,0003	3346	0,0015	3156	0,0003	3128
7	0,001	3480	0,0003	3471	0,003	3364	0,0003	3348	0,0016	3154	0,0003	3131
8	0,0011	3480	0,0002	3471	0,0043	3363	0,0003	3349	0,0013	3153	0,0003	3126
9	0,001	3480	0,0003	3471	0,0012	3364	0,0003	3349	0,0013	3158	0,0003	3130
10	0,0014	3480	0,0003	3473	0,0022	3364	0,0003	3345	0,0014	3157	0,0003	3128
Prům. hodnota	<b>0,00118</b>	<b>3480</b>	<b>0,00028</b>	<b>3469</b>	<b>0,00171</b>	<b>3363</b>	<b>0,00029</b>	<b>3347</b>	<b>0,00138</b>	<b>3155</b>	<b>0,0003</b>	<b>3128</b>
Sm.odchylka	0,000194		0,000040		0,001071		0,000030		0,000098		0	
Číslo měření	Rychlost 5 mm/s				Rychlost 10 mm/s				Rychlost 20 mm/s			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0016	2497	0,0004	2463	0,0015	1588	0,0006	1556	0,0003	10	0,0003	10
2	0,0016	2503	0,0004	2472	0,0016	1592	0,0006	1560	0,0004	10	0,0004	10
3	0,0015	2504	0,0004	2470	0,0018	1590	0,0005	1559	0,0002	10	0,0002	10
4	0,0017	2506	0,0004	2477	0,0016	1595	0,0007	1562	0,0003	10	0,0003	10
5	0,0017	2504	0,0004	2473	0,0016	1592	0,0007	1564	0,0002	10	0,0002	10
6	0,0018	2503	0,0004	2473	0,0018	1591	0,0007	1567	0,0002	10	0,0002	10
7	0,0016	2506	0,0004	2477	0,0017	1592	0,0007	1567	0,0004	10	0,0004	10
8	0,0016	2505	0,0004	2473	0,0015	1593	0,0006	1567	0,0003	10	0,0003	10
9	0,0015	2503	0,0003	2475	0,0016	1595	0,0007	1570	0,0003	10	0,0003	10
10	0,0017	2505	0,0003	2473	0,0018	1596	0,0007	1571	0,0003	10	0,0003	10
Prům. hodnota	<b>0,00163</b>	<b>2504</b>	<b>0,00038</b>	<b>2473</b>	<b>0,00165</b>	<b>1592</b>	<b>0,00065</b>	<b>1564</b>	<b>0,00029</b>	<b>10</b>	<b>0,00029</b>	<b>10</b>
Sm. odchylka	0,000090		0,000040		0,000112		6,71x10 <sup>-5</sup>		0,000070		0,000070	

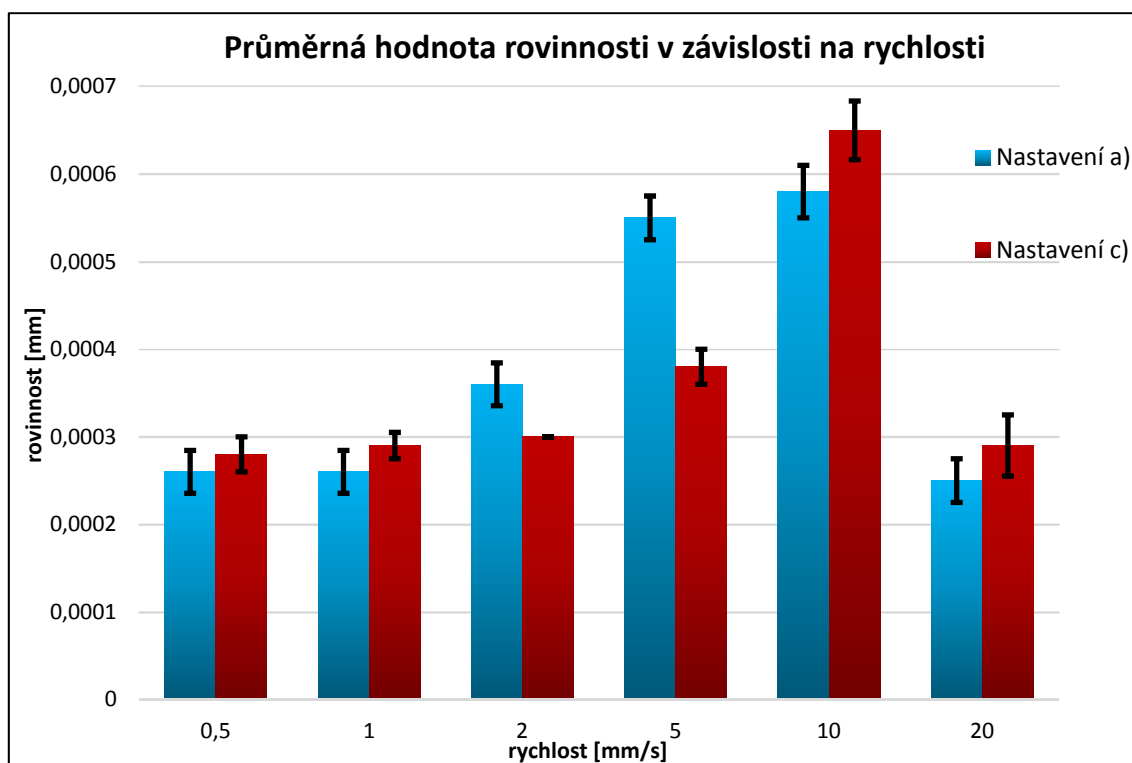
Tabulka 13: Hodnoty rovinností lapované plochy při jednotlivých rychlostech při nastavení c)



Tabulka 14: Ukázky extrahovaných bodů z lapované plochy při jednotlivých rychlostech



Graf 1: Průměrný počet extrahovaných bodů z lapované plochy v závislosti na rychlosti



Graf 2: Průměrná hodnota rovinnosti lapované plochy v závislosti na rychlosti včetně směrodatných odchylek

Z grafu číslo jedna a z tabulky 14 je patrné, že CWS není schopný zaznamenávat velké množství bodů při vysokých rychlostech. Při nejvyšší rychlosti zaznamenal při obou nastaveních pouze 10 bodů ze zadaných 3600, tento počet nemá dostatečnou vypovídající hodnotu pro další vyhodnocení rovinnosti. Při rychlosti 10 mm/s zaznamenal senzor ani ne polovinu z požadovaného množství. A teprve od rychlosti 2 mm/s bylo extrahováno více než 3000 bodů. Tento fakt lze odůvodnit tím, že při vysokých rychlostech je doba expozice velice krátká, což má vliv i na potřebnou světelnou energii pro extrakci bodů, a tak senzor není schopen vyhodnocovat velké množství bodů, popřípadě to může být příčinou nekorektně extrahovaných bodů.

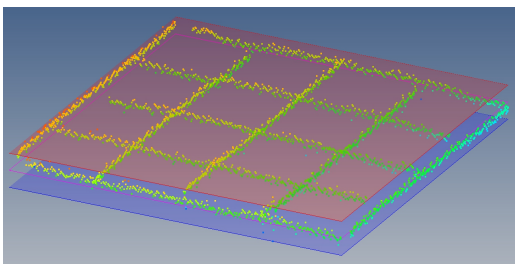
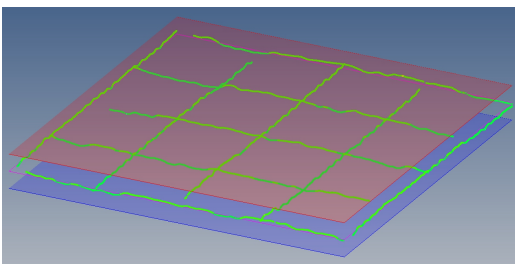
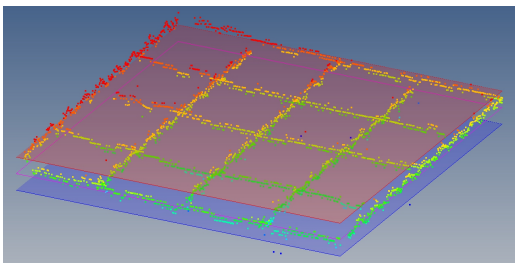
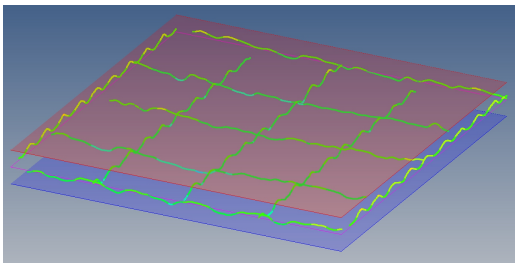
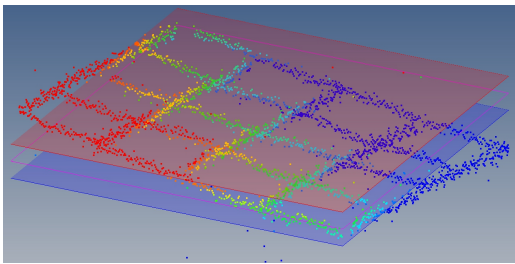
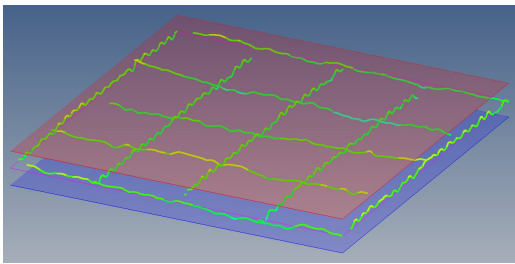
Jaký vliv má rychlost na zkoumanou hodnotu rovinnosti lapované plochy je zobrazeno na grafické závislosti číslo 2. Tato závislost ukazuje, že při nízkých rychlostech pohybu senzoru nad povrchem je hodnota rovinnosti přibližně konzistentní a po aplikaci filtrace s eliminací odlehlých hodnot poskytuje CWS srovnatelné výsledky s referenčními výsledky, které byly získány pomocí kontaktní sensoriky. Zatímco při vysokých rychlostech jsou body, z nichž je rovinnost vyhodnocována, extrahovány vlivem rychlosti nekorektně, neboť například u rychlosti 10 mm/s je její hodnota přibližně dvojnásobná oproti hodnotám rovinnosti při nízkých rychlostech.

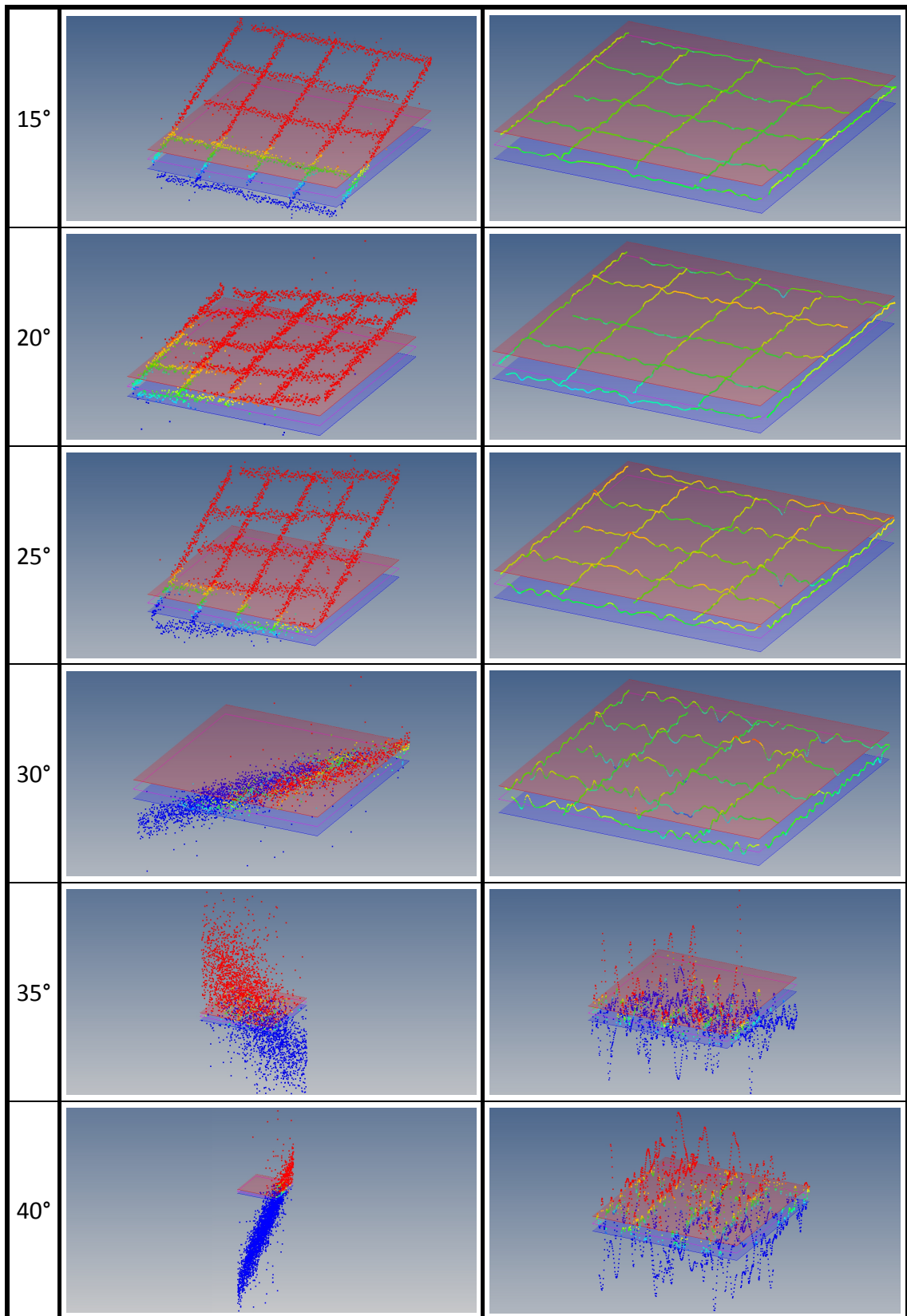


Vzhledem k získaným grafickým závislostem bylo zvoleno pro další část experimentu nastavení c), neboť při tomto nastavení CWS byl schopný snímat větší počet bodů, výsledky rovinnosti jsou více konzistentní a směrodatné odchylky menší (viz chybové úsečky v grafu 2) než v případě nastavení a). Zároveň byla zvolena rychlost 1 mm/s, což je rozumný kompromis mezi získanými výsledky a produktivitou měřicího procesu.

#### 4.2.1.4. Vliv naklonění lapované plochy vůči optické ose CWS na její rovinnost

V poslední části experimentu s lapovanou plochou byl zkoumán vliv naklonění plochy vůči optické ose CWS. Pro zvolené nastavení c) a rychlost 1 mm/s bylo určeno celkově 9 poloh koncové měrky, kdy lapovaná plocha byla vůči optické ose nakloněna od 0° do 40° s krokem 5°. Ukázky naměřených bodů včetně jejich následných filtrací s eliminací odlehlých hodnot při jednotlivých polohách je v tabulce 15. Veškeré naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 16 a grafické závislosti vyplývající z těchto dat jsou umístěny za ní.

Ukázky rovinností při jednotlivých úhlových polohách		
Úhel	Bez filtrace	Filtrace + eliminace odlehlých hodnot
0°		
5°		
10°		



Tabulka 15: Ukázky rovinností při jednotlivých úhlových polohách lapované plochy

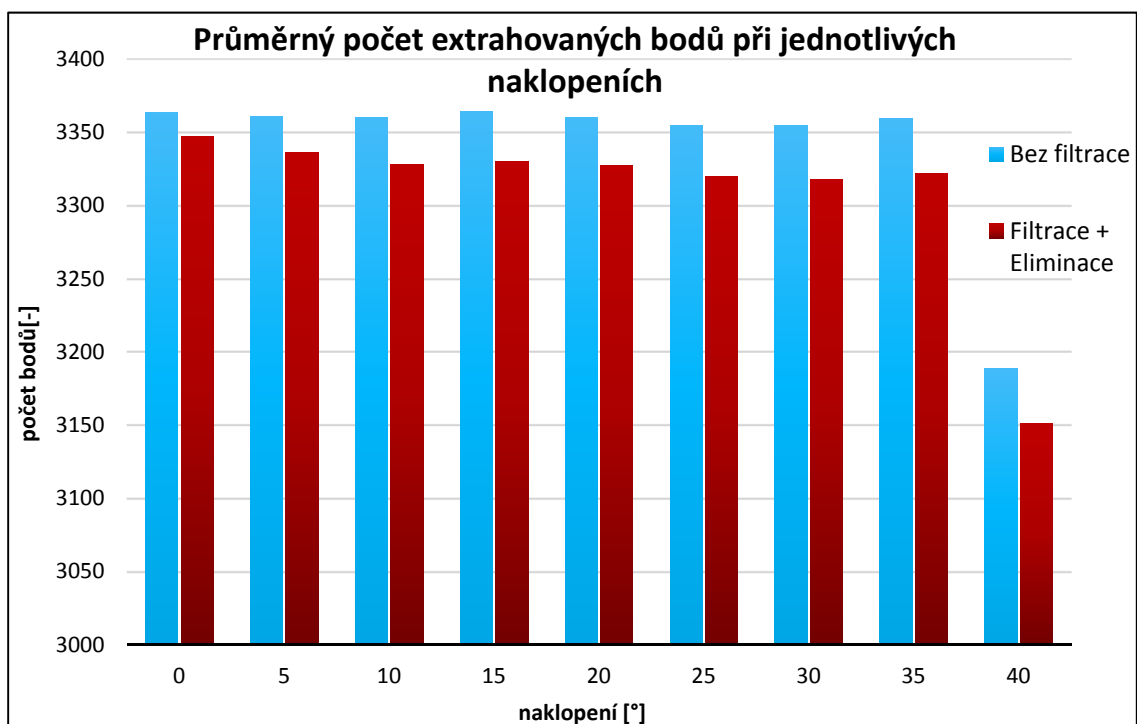
Různý směr naklonění extrahovaných bodů na obrázcích v tabulce 15 je dán vlivem vyhodnocení, což byl element minima, který připasuje rovinu k měřeným bodům tak, aby vznikla co nejmenší odchylka mezi vypočtenou a skutečnou konturou. To znamená, že na orientaci a tvar plochy mají velkou mírou vliv odlehle hodnoty. U jednotlivých úhlových poloh neměly plochy reprezentující rovinnost při všech 10 náměrech jednotnou orientaci, ale lišily se v závislosti na poloze odlehlých hodnot.

Tento efekt lze na rovině potlačit použitím právě filtrace a eliminace odlehlých hodnot, neboť nefiltrovaná data jsou vysoce nestabilní. Z tohoto důvodu je filtrace a eliminace velice podstatným procesem ve vyhodnocování výsledků.

<b>Hodnoty rovinností při jednotlivých úhlových nakloněních [mm]</b>								
Číslo měření	0°				5°			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0012	3362	0,0003	3345	0,0015	3360	0,0006	3337
2	0,001	3364	0,0003	3346	0,0014	3362	0,0006	3337
3	0,001	3365	0,0002	3349	0,0015	3363	0,0005	3342
4	0,0009	3365	0,0003	3351	0,0015	3361	0,0005	3338
5	0,001	3361	0,0003	3346	0,0015	3361	0,0005	3336
6	0,0013	3362	0,0003	3346	0,0018	3359	0,0005	3336
7	0,003	3364	0,0003	3348	0,0013	3360	0,0005	3332
8	0,0043	3363	0,0003	3349	0,0016	3359	0,0006	3331
9	0,0012	3364	0,0003	3349	0,0018	3362	0,0005	3339
10	0,0022	3364	0,0003	3345	0,0014	3363	0,0006	3332
<b>Prům. hodnota</b>	<b>0,00171</b>	<b>3363</b>	<b>0,00029</b>	<b>3347</b>	<b>0,00153</b>	<b>3361</b>	<b>0,00054</b>	<b>3336</b>
Číslo měření	10°				15°			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0035	3360	0,0005	3328	0,0067	3366	0,0005	3334
2	0,0036	3359	0,0005	3325	0,0066	3364	0,0005	3325
3	0,0044	3359	0,0005	3324	0,0078	3365	0,0004	3333
4	0,0043	3360	0,0004	3329	0,0061	3365	0,0004	3332
5	0,0027	3359	0,0005	3324	0,0062	3364	0,0004	3328
6	0,0043	3361	0,0005	3328	0,0075	3364	0,0005	3328
7	0,0042	3360	0,0005	3331	0,0058	3363	0,0005	3329
8	0,0035	3360	0,0005	3330	0,0058	3363	0,0004	3334
9	0,0037	3361	0,0005	3326	0,0077	3365	0,0004	3334
10	0,0037	3361	0,0005	3328	0,0062	3364	0,0005	3328
<b>Prům. hodnota</b>	<b>0,00379</b>	<b>3360</b>	<b>0,00049</b>	<b>3328</b>	<b>0,00664</b>	<b>3364</b>	<b>0,00045</b>	<b>3331</b>
Číslo měření	20°				25°			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0103	3360	0,0006	3333	0,0092	3355	0,001	3319
2	0,0076	3360	0,0007	3324	0,0091	3358	0,0007	3317
3	0,011	3361	0,0007	3332	0,0139	3358	0,0008	3324
4	0,0097	3358	0,0007	3324	0,0104	3359	0,0009	3321
5	0,0078	3360	0,0008	3323	0,0086	3360	0,0007	3317
6	0,0099	3361	0,0007	3331	0,0123	3359	0,0009	3326
7	0,0076	3360	0,0007	3325	0,0126	3353	0,0009	3316
8	0,0079	3362	0,0007	3328	0,0121	3356	0,0008	3317

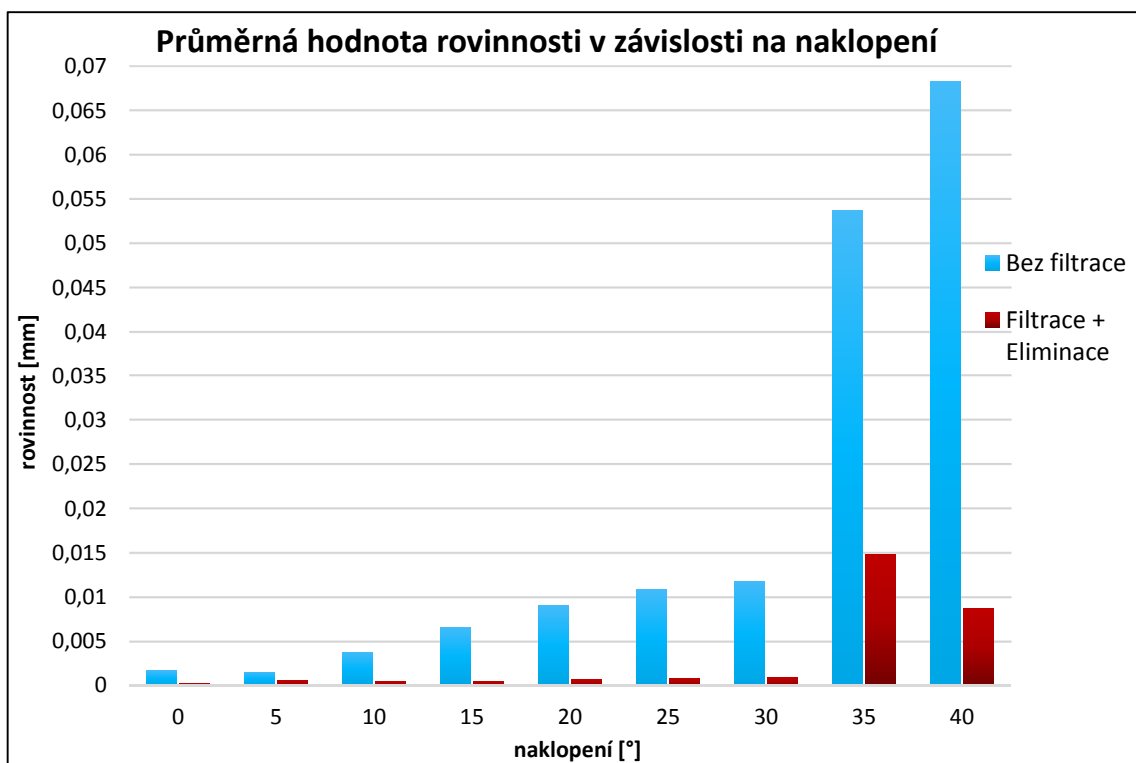
9	0,0097	3361	0,0007	3329	0,0088	3357	0,0009	3320
10	0,0092	3357	0,0007	3326	0,0121	3358	0,0009	3324
Prům. hodnota	<b>0,00907</b>	<b>3360</b>	<b>0,0007</b>	<b>3328</b>	<b>0,01091</b>	<b>3355</b>	<b>0,00085</b>	<b>3320</b>
Číslo měření	30°				35°			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0118	3354	0,0011	3318	0,0512	3360	0,0106	3327
2	0,0122	3357	0,001	3323	0,0526	3358	0,0118	3325
3	0,0118	3355	0,001	3323	0,06	3360	0,0104	3327
4	0,0119	3355	0,0009	3317	0,0508	3358	0,0106	3318
5	0,012	3354	0,0009	3315	0,0572	3359	0,0106	3324
6	0,0119	3354	0,0009	3320	0,0507	3358	0,0507	3319
7	0,0112	3356	0,0009	3318	0,0568	3360	0,0106	3322
8	0,0116	3355	0,0008	3316	0,0524	3362	0,0105	3325
9	0,0125	3353	0,001	3315	0,0529	3360	0,0107	3322
10	0,0112	3356	0,0009	3318	0,0524	3360	0,0119	3311
Prům. hodnota	<b>0,01181</b>	<b>3355</b>	<b>0,00094</b>	<b>3318</b>	<b>0,0537</b>	<b>3360</b>	<b>0,01484</b>	<b>3322</b>
Číslo měření	40°							
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace					
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body				
1	0,0731	3180	0,0092	3141				
2	0,0737	3189	0,009	3151				
3	0,0699	3187	0,0087	3149				
4	0,065	3191	0,008	3155				
5	0,0637	3185	0,0093	3144				
6	0,0625	3192	0,0083	3157				
7	0,0702	3191	0,0087	3155				
8	0,0684	3186	0,0082	3148				
9	0,062	3193	0,0087	3154				
10	0,0752	3196	0,0088	3156				
Prům. hodnota	<b>0,06837</b>	<b>3189</b>	<b>0,00869</b>	<b>3151</b>				

Tabulka 16: Hodnoty rovinností při jednotlivých úhlových naklpeních lapované plochy



Graf 3: Průměrný počet extrahovaných bodů při jednotlivých naklpeních lapované plochy

Z grafu 3 je patrné, že naklonění plochy nemá větší vliv na počet extrahovaných bodů, neboť tento počet se nakloněním měnil minimálně a po aplikaci filtrace a eliminace odlehlých hodnot měl mírně klesající tendenci. Pouze až u největšího úhlu naklonění počet extrahovaných bodů klesl výraznějším počtem, a to jak u nefiltrovaných i filtrovaných bodů. Ačkoliv naklonění nemělo větší vliv na počet extrahovaných bodů, tak měl poměrně značný vliv na korektnost snímaných bodů, což je viditelné z grafu 4, kde jsou uvedené průměrné hodnoty rovinnosti při jednotlivých nakloněních.



Graf 4: Průměrná hodnota rovinnosti v závislosti na naklonění lapované plochy

Hodnota rovinnosti má tendenci poměrně výrazně růst s rostoucím úhlem naklonění, například hodnota rovinnosti bez filtrace při 30° je téměř sedmkrát vyšší než v nulové poloze. Avšak po provedené filtraci a eliminaci odlehlých hodnot byly vždy hodnoty rovinnosti pod hodnotou 0,001 mm. Zhruba do naklonění 20° se hodnota rovinnosti vešla do dvojnásobku hodnoty při nulovém naklonění. Od 20° do 30° se hodnota rovinnosti zhruba pohybovala mezi dvojnásobkem až trojnásobkem hodnoty při nulovém naklonění. A od úhlu 30° byla hodnota rovinnosti mnohonásobně vyšší než, když měrka byla kolmo k optické ose CWS, tedy při 0°.

Avšak je nutno podotknout, že veškeré tyto hodnoty byly naměřené při stejném nastavení všech parametrů CWS (viz tabulka 9 nastavení c). Bohužel zhruba od úhlu 20° se CWS při tomto nastavení parametrů nechoval stejně jako v předchozích úhlových polohách, protože indikátor světelné energie se nenacházel v rozsahu optimálního pásma. Při vyšších úhlech docházelo k častému vychýlení hodnoty světelné energie nad optimální pásmo, popřípadě pod něj. To znamená, že neexistuje jedno optimální nastavení pro všechny úhlové polohy.

Úhel	Vzorkovací frekvence [Hz]	Automatická expozice [-]	Práh [-]
20°	750	205	30
25°	300	195	30
30°	100	200	30

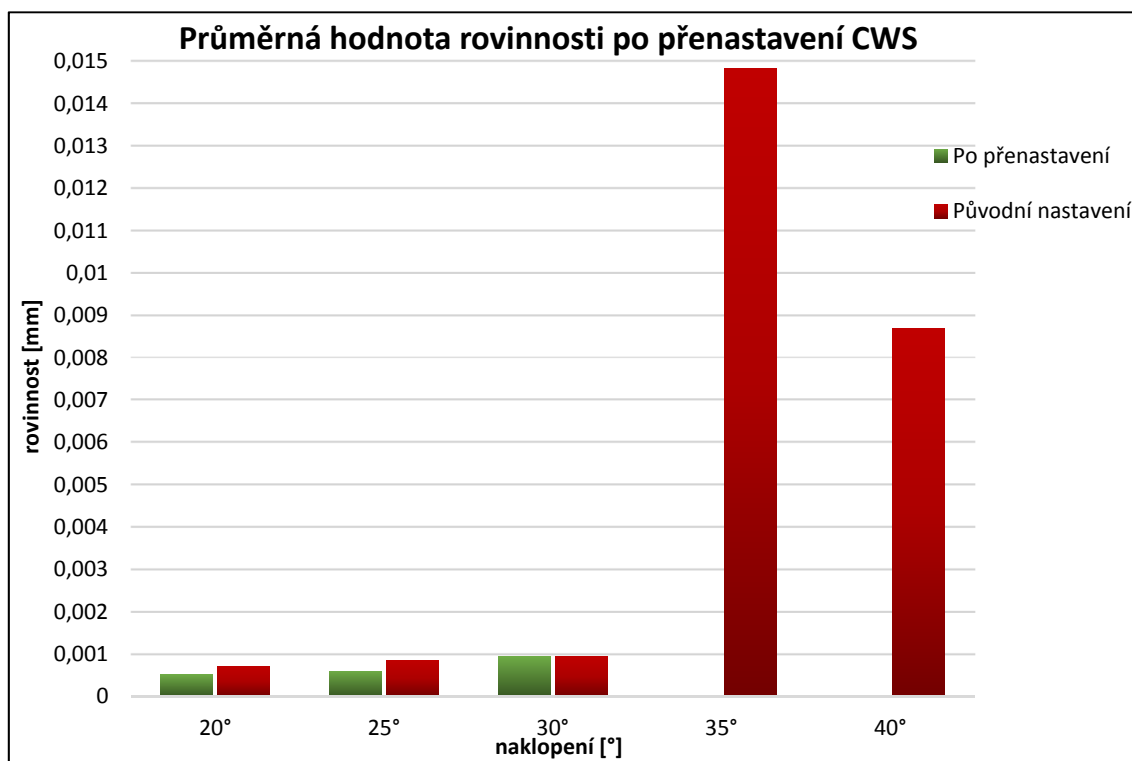
Tabulka 17: Přenastavené parametry CWS při vyšších úhlových naklonech lapované plochy

Proto následně pro úhel 20° a vyšší byla provedena dodatečná nastavení tak, aby se CWS choval podobně jako při nižších úhlových naklonech koncové měřky. Nicméně při úhlech vyšších než 30° už nebylo možné CWS nastavit tak, aby hodnoty dob expozice a světelné energie byly alespoň přibližně stejné jako při nižších úhlových polohách. Proto byl CWS přenastaven pouze při úhlech 20°, 25° a 30°. Hodnoty přenastavených parametrů jsou uvedeny v tabulce 17. Z této tabulky je patrné, že došlo ke změně vzorkovací frekvence a automatické expozice, prahová hodnota zůstala stejná. Trendem pro nastavení při vyšších úhlech bylo výrazně snižovat vzorkovací frekvenci a mírně snižovat automatickou expozici. Pro jednotlivá nová nastavení bylo následovně provedeno 5 měření. Jakých hodnot rovinností je možno dosáhnout po přenastavení CWS při vyšších úhlech, je uvedeno v tabulce 18 a v grafu 5.

Hodnoty rovinností při jednotlivých úhlových naklonech [mm]								
Číslo měření	20°				25°			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0076	3295	0,0006	3263	0,0098	3058	0,0006	3019
2	0,0082	3295	0,0005	3263	0,009	3056	0,0006	3021
3	0,0107	3294	0,0005	3261	0,0124	3057	0,0006	3024
4	0,0103	3295	0,0005	3263	0,0118	3059	0,0006	3023
5	0,0102	3295	0,0005	3264	0,0115	3061	0,0006	3028
Prům. hodnota	<b>0,0094</b>	<b>3295</b>	<b>0,00052</b>	<b>3263</b>	<b>0,0109</b>	<b>3058</b>	<b>0,0006</b>	<b>3023</b>

Číslo měření	30°			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,012	2950	0,001	2915
2	0,0126	2936	0,0009	2913
3	0,0137	2942	0,001	2916
4	0,0137	2938	0,0009	2915
5	0,0128	2934	0,001	2912
<b>Prům. hodnota</b>	<b>0,01296</b>	<b>2940</b>	<b>0,00096</b>	<b>2914</b>

Tabulka 18: Hodnoty rovinností po přenastavení CWS při vyšších úhlových naklonech lapované plochy



Graf 5: Průměrná hodnota rovinnosti v závislosti na naklonění lapované plochy po přenastavení parametrů CWS

Z naměřených hodnot vyplývá, že je možné dosáhnout lepších výsledků úpravou parametrů CWS při větším úhlu naklonění. Tím lze konstatovat, že nelze používat jedno nastavení pro všechny aplikace. Hodnoty vkládaných parametrů CWS by se vždy měly určovat nejen v závislosti na typu materiálu, ale i na poloze měřeného dílu, respektive jaký úhel svírá měřená plocha a optická osa.

## 4.2.2. Broušená plocha

Pro broušený povrch byl zvolen nízkopásmový filtr typu Gauss o mezní vlnové délce 0,8 mm v závislosti na naměřené hodnotě drsnosti povrchu Ra (viz tabulka 19) a počtem bodů na ploše 25 mm<sup>2</sup>. Protokol z měření drsnosti je opět součástí přílohy, viz příloha 2.

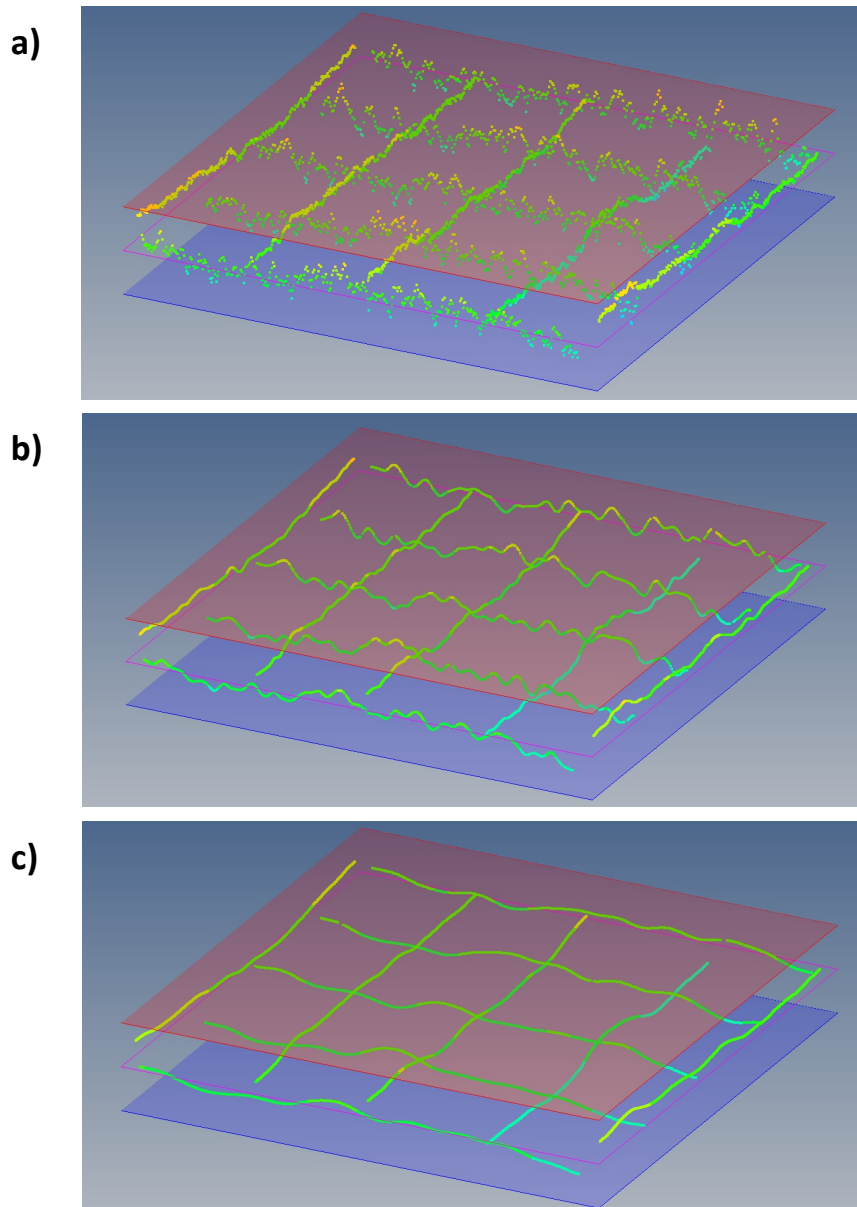
Drsnost broušené plochy		
Číslo měření	Hodnota Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Hodnota Rz [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,3705	2,684
2	0,3771	2,8822
3	0,3729	2,8873
4	0,3159	2,4476
5	0,3737	2,7932
Průměrná hodnota	0,3620	2,7389

Tabulka 19: Drsnost broušené plochy

### 4.2.2.1. Měření rovinnosti na CMM Zeiss Prismo

Opět pro získání referenční hodnoty rovinnosti ke komparaci s výsledky získaných pomocí CWS bylo využito kontaktní sensoriky stroje Zeiss Prismo. K získání referenční hodnoty rovinnosti byl použit stejný snímač jako v případě lapované plochy, a to snímač s kulovým elementem o průměru 1,35 mm. Extrakce bodů rovněž probíhala ve směru osy pinoly. Kontaktním snímačem bylo celkově provedeno 10 měření, naměřené hodnoty včetně počtů bodů, z nichž byly jednotlivé rovinnosti vyhodnocovány jsou uvedeny v tabulce 20. Pro ukázkou, jakým způsobem filtrace ovlivňuje výslednou rovinnost, bylo u kontaktní sensoriky použito dvou filtrů, a to nízkopásmového typu Gauss o mezní vlnové délce 0,25 a 0,8 mm. U dat ze CWS bylo už použito pouze filtru s mezní vlnovou délkou 0,8 mm, jak bylo uvedeno na počátku podkapitoly. Ukázky naměřených bodů kontaktní sensorikou jsou na obrázku 48. Na obrázku 48a jsou body bez jakékoliv filtrace, obrázek 48b znázorňuje rovinnost po aplikaci filtru s mezní vlnovou délkou 0,25 a eliminací odlehlých hodnot. Poslední obrázek (48c) ukazuje data zatížená filtrem s mezní vlnovou délkou 0,8 mm a eliminací odlehlých hodnot. Červená a modrá plocha v případě broušené plochy vymezuje toleranční pole o velikosti 0,003 mm.





Obrázek 48: Rovinnost broušené plochy měřené na CMM Zeiss Prismo a) naměřené body b) po aplikaci filtru 0,25 a eliminaci odlehlých hodnot c) po aplikaci filtru 0,8 a eliminaci odlehlých hodnot

Číslo měření	Měření rovinnosti na Zeiss Prismo [mm]					
	Bez filtrace		Filtrace Gauss 0,25 + eliminace odlehlých hodnot		Filtrace Gauss 0,8 + eliminace odlehlých hodnot	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,002	3391	0,0015	3349	0,0013	3385
2	0,0021	3391	0,0015	3347	0,0013	3387
3	0,0022	3392	0,0015	3348	0,0014	3386
4	0,0022	3390	0,0015	3347	0,0014	3385
5	0,0021	3392	0,0015	3354	0,0014	3386
6	0,0021	3391	0,0015	3351	0,0014	3385

7	0,0021	3389	0,0016	3351	0,0014	3383
8	0,0021	3391	0,0015	3352	0,0014	3385
9	0,0022	3390	0,0016	3350	0,0014	3381
10	0,0021	3392	0,0015	3352	0,0014	3387
Průměrná hodnota	0,00212	3391	0,00152	3350	0,00138	3385
Směrodatná odchylka	0,000060		0,000040		0,000040	

Tabulka 20: Hodnoty rovinností broušené plochy naměřené na Zeiss Prismo

#### 4.2.2.2. Vliv nastavení CWS na rovinnost broušené plochy

Stejně jako v případě lapované plochy je velice důležité co nejlépe nastavit jednotlivé parametry, při nichž bude CWS extrahovat body z broušeného povrchu. Jakým způsobem se nastavuje CWS bylo již popsáno u lapované plochy (viz kap. 4.2.1.2.). Pro broušenou plochu bylo využito doporučených hodnot parametrů od výrobce pro broušenou ocel (viz tabulka 5 – broušená ocel). Nicméně pro broušenou plochu koncové měrky byl indikátor pro množství světelné energie nejbližší optimálnímu pásmu opět při použití přednastavených parametrů pro pochromovaný plast.

Proto z tohoto přednastavení bylo následně úpravou parametrů vytvořeno 6 nastavení. Opět se pouze měnila vzorkovací frekvence a automatická expozice, neboť prahová hodnota neměla na indikátory u broušeného povrchu vliv. Konkrétní hodnoty parametrů pro všech 6 nastavení, včetně přednastavených parametrů pro broušenou ocel a pochromovaný plast jsou uvedeny v tabulce 21.

Nastavení	Vzorkovací frekvence [Hz]	Automatická expozice [-]	Práh [-]
Broušená ocel	1000	180	30
Pochromovaný plast	1750	200	30
a)	2000	219	30
b)	2000	224	30
c)	2000	215	30
d)	2000	230	30
e)	100	5	30
f)	2000	210	30

Tabulka 21: Hodnoty parametrů CWS pro jednotlivá nastavení u broušené plochy

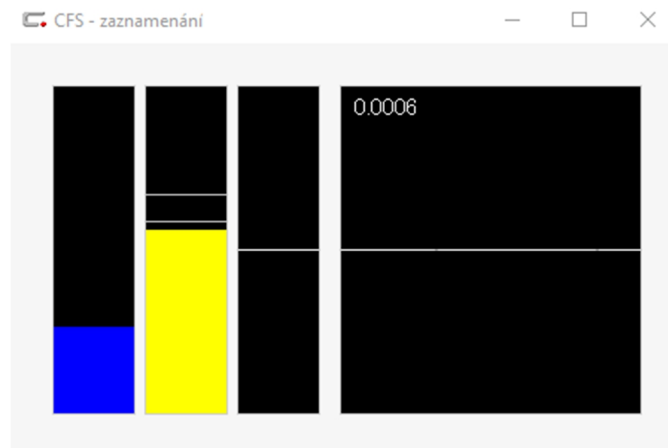
Princip, kterým byla vytvářena jednotlivá nastavení je stejný jako v případě lapované plochy. Stejně tak velikosti indikátorů indikující dobu expozice pro jedno měření a množství světelné energie odražené zpět do objektivu byly při jednotlivých nastaveních obdobné jako pro lapovanou plochu (viz kapitola 4.2.1.2.). Proto na následujících řádcích není potřeba podrobně tato nastavení rozepisovat jako tomu bylo u lapované plochy. Jedinými výjimkami jsou nastavení pro broušenou ocel a nastavení f), které jsou popsány podrobněji na dalších řádcích této podkapitoly, neboť nebyly použity u lapované plochy. Body při jednotlivých nastaveních byly snímány při stejných podmínkách jako u lapované plochy, to znamená při rychlosti 0,5 mm/s a v poloze, v níž byla broušená plocha kolmá k optické ose CWS. Obrázky popisující extrahované body včetně následné filtrace při jednotlivých nastaveních jsou utříděny v tabulce 22.

V průběhu měření CWS docházelo při nastavení a) a b) mnohem častěji k vychylování hodnoty světelné energie nad optimální pásmo než tomu bylo u lapované plochy, což lze pozorovat i z uspořádanosti bodů na obrázcích v tabulce 22. U nastavení c) se očekávalo, že při pohybu CWS nad měřenou plochu se indikátor světelné energie nebude téměř vůbec vychylovat nad hranici optimálního pásma, stejně jako tomu bylo u lapované plochy při tomto nastavení. Nicméně i při tomto nastavení se hodnota světelné energie poměrně často dostávala mimo optimální pásmo. Nastavení d) a e) opět byla nastavena záměrně v rozporu s manuálem, aby bylo patrné, jakých výsledků lze dosáhnout při nesprávném nastavení na broušené ploše. U nastavení d), kde bylo cílem nastavit parametry tak, aby indikátory doby expozice a světelné energie byly co nejvyšší, je z tabulky 22 viditelná vysoká neuspořádanost bodů. Zatímco u nastavení e), i když byly nastaveny parametry záměrně, tak aby byly oba indikátory co nejnižší, se uspořádanost naměřených bodů nějak výrazně nelišila od uspořádanosti bodů při nastavení a) b) nebo c). A zároveň se body jeví mnohem uspořádaněji než v případě stejného nastavení u lapované plochy (viz kapitola 4.2.1.2. nastavení e)).

#### **f) nastavení s hodnotou světelné energie pod dolní hranicí optimálního pásma**

Toto nastavení reaguje na chování CWS při jeho pohybu nad broušenou plochou, kdy dochází k mnohem častějšímu vychylování hodnoty světelné energie nad horní hranici optimálního pásma než u plochy lapované. Záměrem tohoto nastavení bylo, aby sice hodnota světelné energie byla mírně pod hranicí optimálního pásma, ale zato aby

nedocházelo k tak častému vychylování nad horní hranici optimálního pásma při pohybu CWS. Okno pro toto nastavení je vyobrazeno na obrázku 49. Extrahované body při tomto nastavení jsou nepatrně více uspořádané, to je zejména vidět z hodnoty rovinnosti bez filtrace, viz tabulka 23.



Obrázek 49: Okno pro nastavení parametrů CWS při nastavení f)

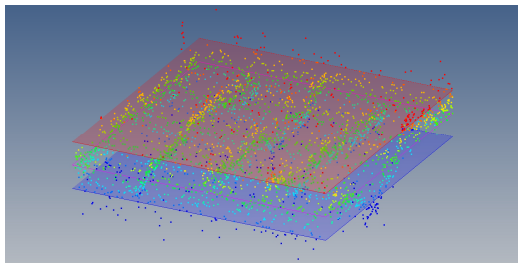
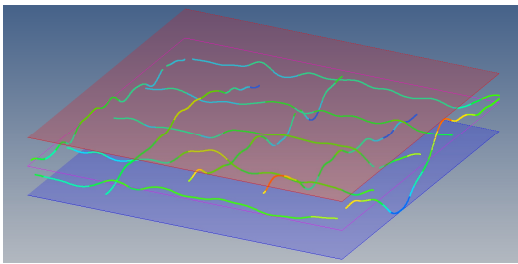
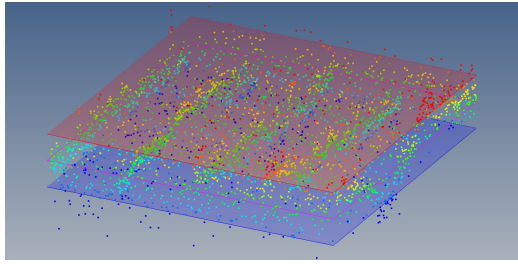
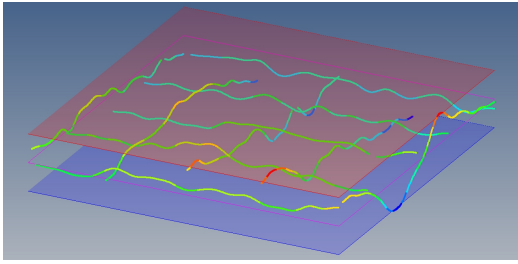
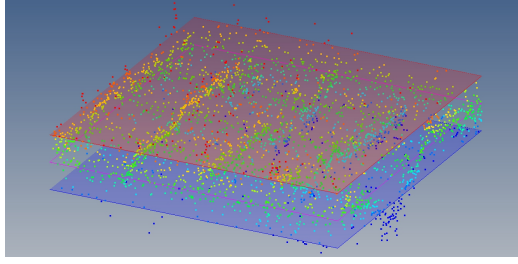
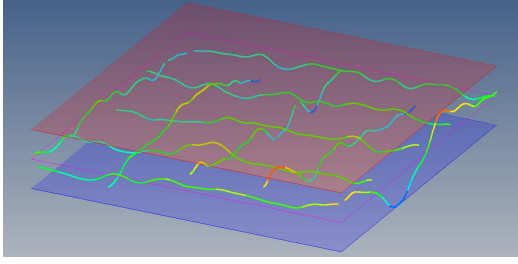
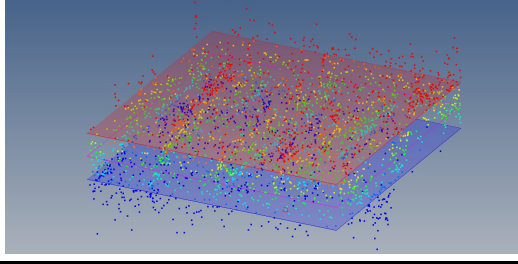
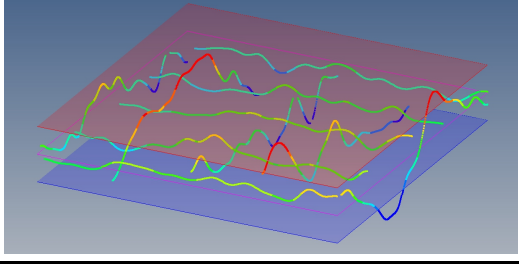
### **Přednastavení – Broušená ocel**

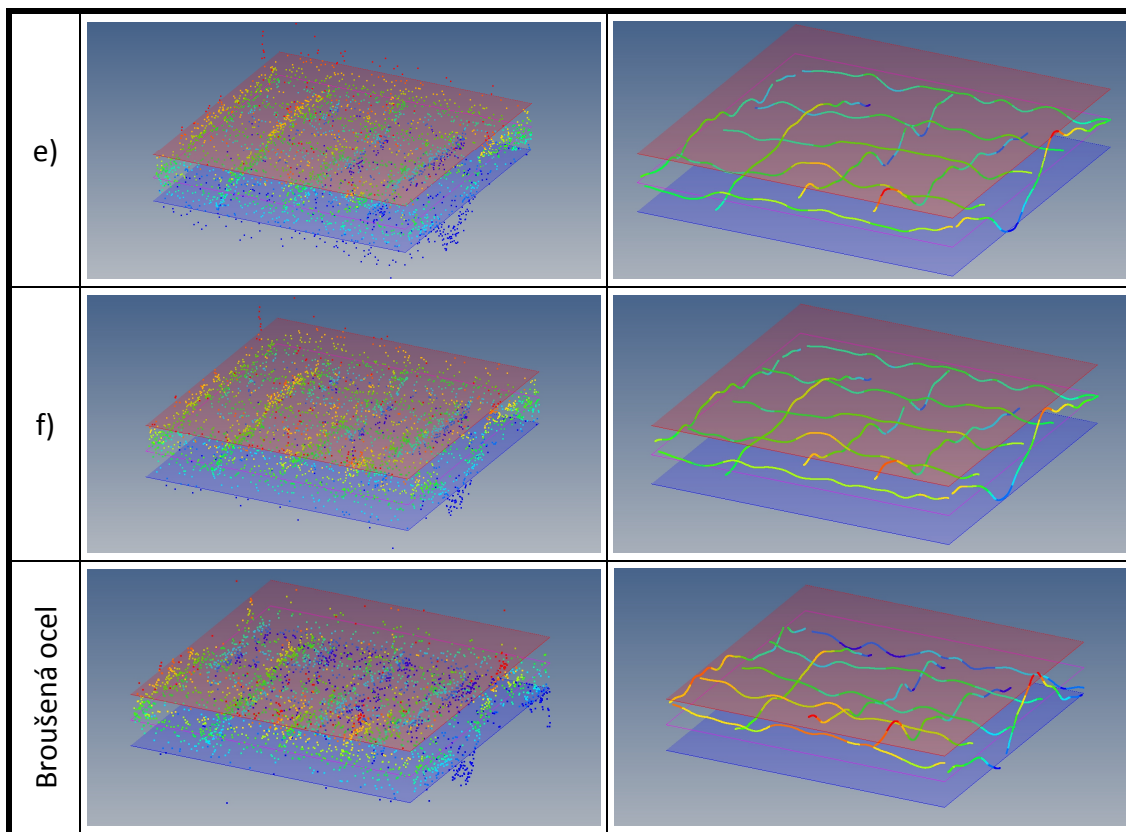
Toto nastavení bylo aplikováno na koncovou měrku, neboť jej výrobce udává jako výchozí pro měření broušené ocele. Okno nastavení při aplikaci tohoto nastavení na broušenou plochu koncové měrky je na obrázku 50. Ačkoliv bylo toto nastavení určeno pro broušený povrch ocele, tak výsledky nejsou lepší oproti předchozím nastavení, viz tabulky 22 a 23.



Obrázek 50: Okno pro nastavení parametrů CWS při přednastavení Broušená ocel

Obecně lze konstatovat, že při extrakci bodů CWS z broušené plochy byl indikátor světelné energie mnohem méně stabilní než v případě lapované plochy a měl tendenci se vychylovat nad optimální pásmo. Toto chování lze vysvětlit tím, že světelný paprsek se neodrážel od téměř dokonalé plochy jako u lapovaného povrchu, ale od textury povrchu vytvořené technologií broušení, která byla mnohem výraznější než u lapovaného povrchu. Pokud došlo k vychýlení nad horní hranici, tak se doba expozice i světelná energie chovala stejně jako v případě lapované plochy, tzn. světelná energie měla tendenci být maximální a doba expozice se nepatrně zvětšila.

Ukázky rovinností při jednotlivých nastaveních		
Nast.	Bez filtrace	Filtrace + eliminace odlehlých hodnot
a)		
b)		
c)		
d)		



Tabulka 22: Ukázky rovinností broušené plochy při jednotlivých nastaveních

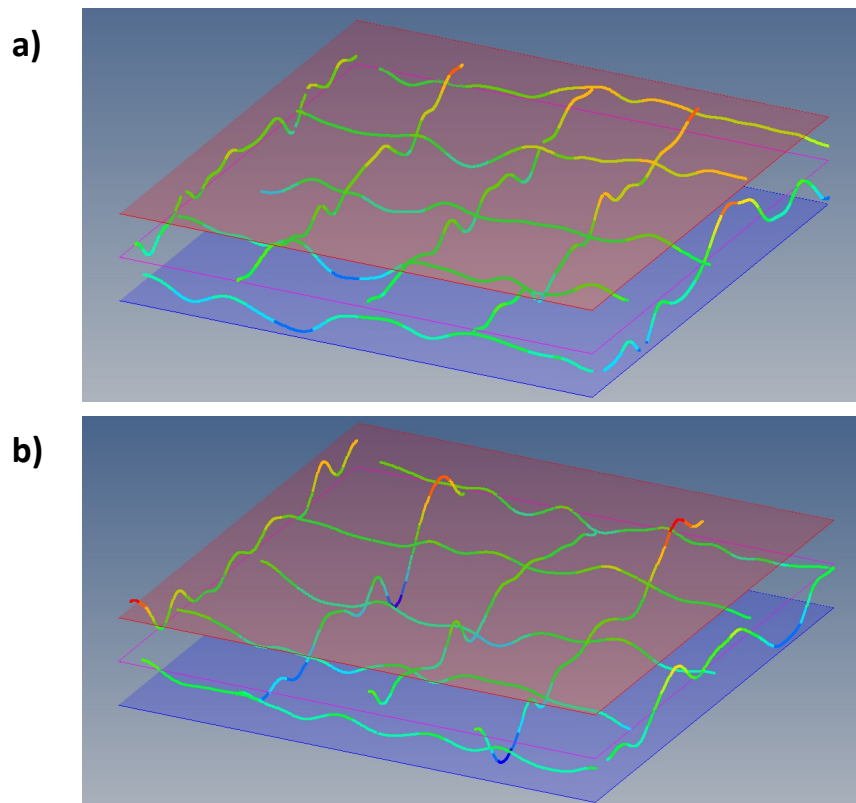
Číselné hodnoty rovinností a počty bodů extrahovaných při jednotlivých nastaveních jsou uvedeny v tabulce 23. Body extrahované při jednotlivých nastaveních byly kromě nastavení d) velice podobně uspořádané. Číselné hodnoty rovinností byly velice podobné a lišily se mimo nastavení d) v řádech desetin mikrometrů. Zároveň je z tabulky 23 patrné, že nastavení nemělo větší vliv na počet extrahovaných bodů.

Nastavení	Hodnoty rovinností při jednotlivých nastaveních [mm]			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
a)	0,0072	3478	0,0029	3437
b)	0,0075	3479	0,0032	3440
c)	0,0071	3478	0,0029	3447
d)	0,0098	3478	0,0049	3443
e)	0,0073	3480	0,0033	3451
f)	0,0063	3478	0,0028	3455
Brouš. ocel	0,0075	3453	0,0037	3401

Tabulka 23: Hodnoty rovinností broušené plochy při jednotlivých nastaveních

Avšak velice zajímavým zjištěním byla hodnota rovinnosti, která i po aplikaci filtrace a eliminace odlehlých hodnot byla přibližně dvojnásobná vůči referenční hodnotě rovinnosti získané kontaktním snímacím systémem. Proto vznikla domněnka, že v daných souřadnicích, kde byla plocha na broušeném povrchu lokalizována, by mohl být broušený povrch nějakým způsobem atypický. Zároveň dalším vysvětlením v daný okamžik mohlo být to, že nějakou nepřesnost v daném místě pracovního prostoru stroje mohl vnášet sám stroj.

Proto pro ověření těchto domněnek byla měřka přepnuta do jiného místa v pracovním prostoru stroje a zároveň byly vybrány dvě jiné části povrchu na měřce, kde měla být ploška o obsahu 25 mm<sup>2</sup> změřena. Toto měření probíhalo při jednom nastavení CWS, a to konkrétně nastavení c). Extrahovaná data po aplikaci filtrace a eliminace odlehlých hodnot z obou nově zvolených ploch jsou na obrázku 49. Rovinnost plochy na obrázku 49a je 0,0026 mm a rovinnost plochy na obrázku 49b je 0,0034 mm. Z toho vyplývá, že původní místo, kde byla plocha lokalizována, není nějakým způsobem atypické. A rovněž tento rozdíl oproti referenční hodnotě není dán nepřesností stroje v tomto místě pracovního prostoru.



Obrázek 51: Rovinnost ploch vybraných na různých místech broušeného povrchu

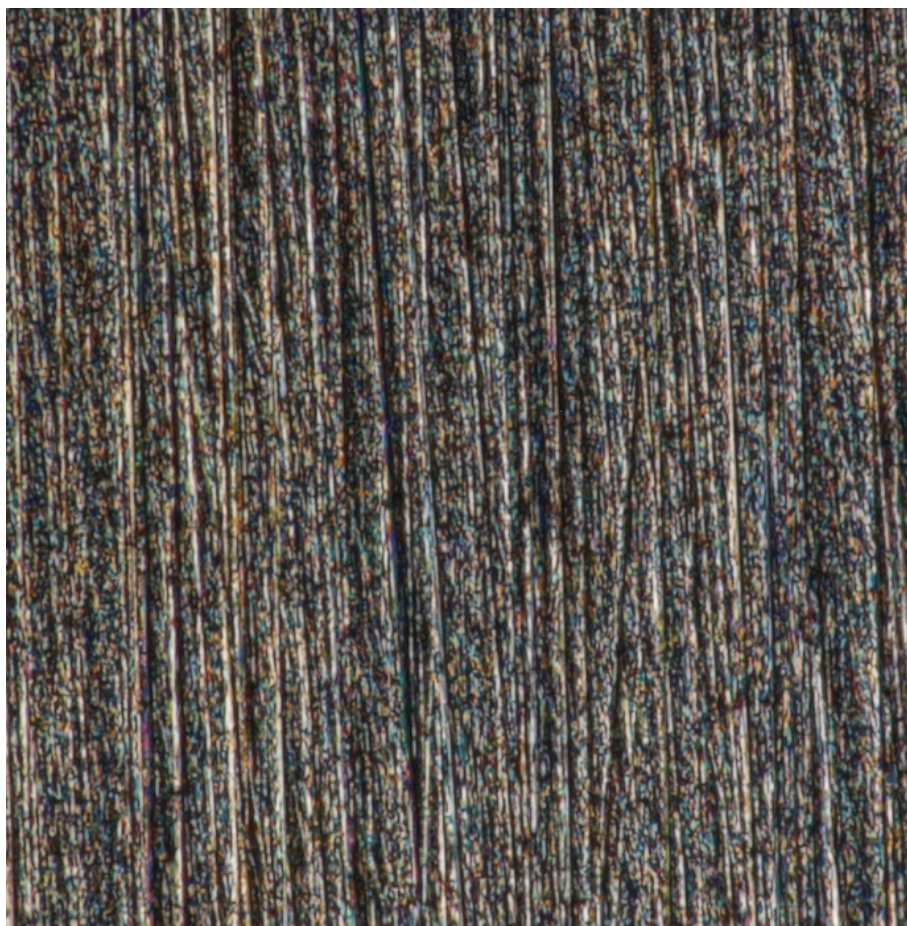
Nicméně zajímavým poznatkem je ten fakt, že na všech doposud změřených broušených plochách se rovinnosti vychylovaly především v jednom směru, a to ve směru broušení. To by mohlo zároveň souviset s poznatkem již jednou uvedeném v této podkapitole, a to že hodnota světelné energie nebyla při pohybu CWS nad broušenou plochou příliš stabilní a měla tendenci se vychylovat nad optimální pásmo.

Tímto důvodem je opět výrazná textura povrchu, která je vytvořena po broušení. To je patrné i z drsnosti uvedené v tabulce 19, kde průměrná hodnota  $R_z$  je  $2,7 \mu\text{m}$ . Neboť světelný paprsek detekuje i drsnost povrchu a zahrne ji do extrahovaných bodů. Drsnost je výrazná právě v dráze vzniklé po brusném zrně, a tak ovlivňuje výsledek rovinnosti. Proto se tak výrazně liší rovinnost oproti referenční hodnotě z dotykového snímače. Ten je schopný vliv drsnosti povrchu velkou měrou vyfiltrovat mechanicky velikostí snímacího elementu, zatímco bezkontaktní metoda není schopna jakékoli mechanické filtrace. A je problém tuto drsnost vyfiltrovat, neboť ačkoliv byla použita softwarová filtrace s eliminací odlehlých hodnot, která sice výrazně snížila hodnotu rovinnosti oproti rovinnosti vypočítané z nefiltrovaných bodů, tak i po její aplikaci není možno se přiblížit k výsledkům podobným referenční hodnotě.

Ukázka výrazné textury povrchu broušené plochy včetně zmiňovaných drah po brusném zrně je na obrázku 52, který byl pořízen na testované koncové měrce pomocí mikroskopu při  $200\times$  zvětšení.

Pro další částí experimentu bylo zachováno původní místo, kde byla plocha měřena a byla vybrána nastavení c) a f) k testování vlivu rychlosti pohybu CWS na rovinnost, vzhledem k nepatrně vyšší uspořádanosti bodů po extrakci a dat uvedených v tabulce 23.





Obrázek 52: Mikroskopický snímek broušeného povrchu

#### 4.2.2.3. Vliv rychlosti pohybu CWS na rovinnost broušené plochy

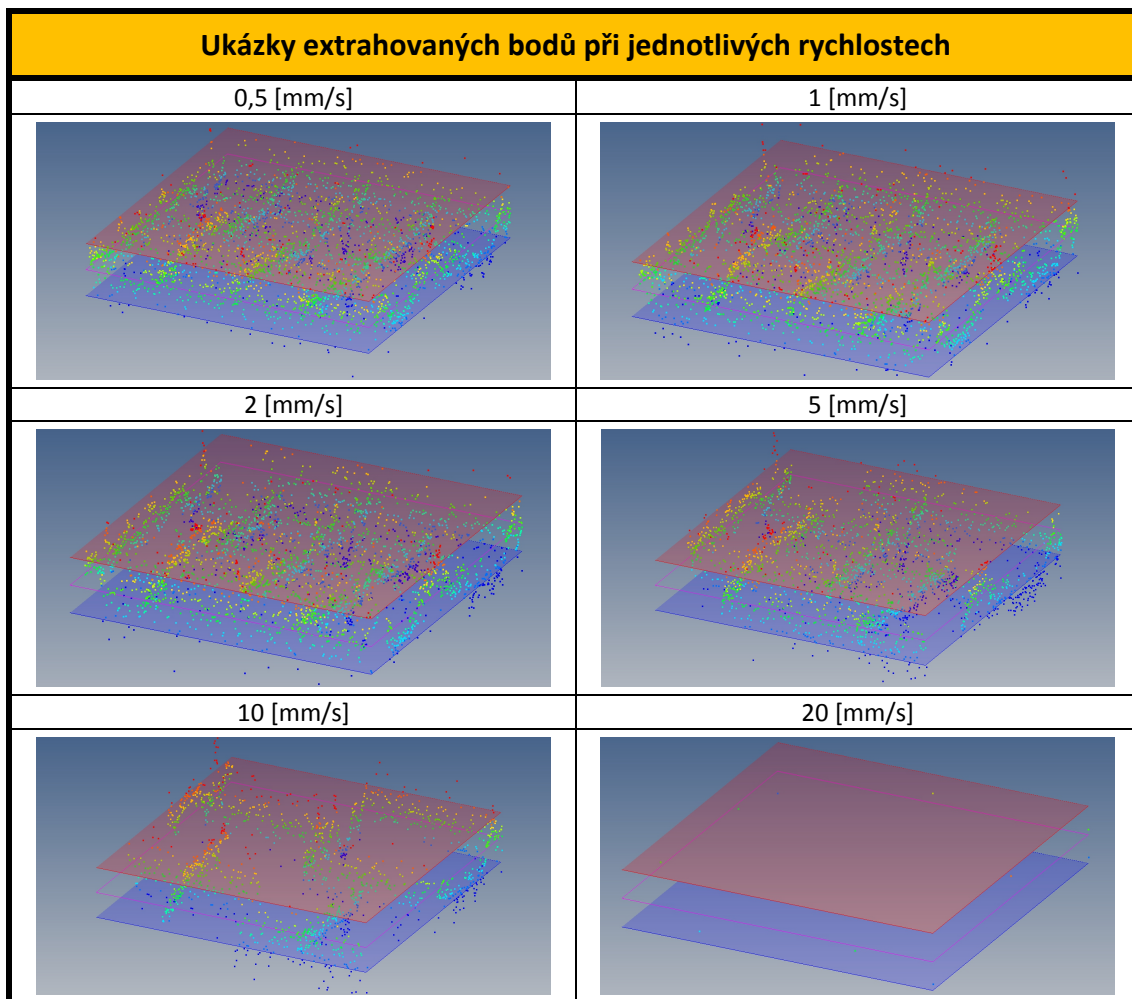
Tato část experimentu zkoumající vliv rychlosti na měření rovinnosti broušené plochy probíhala identicky jako v případě lapované plochy. Dvě nastavení vybrané v předchozí podkapitole byla testována při šesti rozdílných rychlostech (0,5; 1; 2; 5; 10; 20 mm/s). Pro každé nastavení a rychlost bylo provedeno 10 měření a na základě hodnot získaných z těchto měření bylo určeno nastavení a rychlost, které byly použity pro poslední část experimentu, a to vliv naklopení plochy vůči optické ose CWS na rovinnost broušené plochy. Zaznamenaná data z testování 2 nastavení při 6 různých rychlostech jsou uvedeny v tabulkách 24 a 25. Grafické závislosti vyplývající z dat po filtraci a eliminaci odlehlých hodnot se nacházejí za těmito tabulkami. Jaký vliv má rychlost na extrahované body z broušeného povrchu je uvedeno v tabulce 26, ve které jsou umístěny obrázky extrahovaných nefiltrovaných bodů při jednotlivých rychlostech. Jelikož byl trend u obou nastavení velice podobný, je pro ukázkou v tabulce 26 pouze jediné nastavení, a to nastavení c).

Hodnoty rovinností při jednotlivých rychlostech [mm]												
Nastavení c)												
Číslo měření	Rychlost 0,5 mm/s				Rychlost 1 mm/s				Rychlost 2 mm/s			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0073	3480	0,0028	3447	0,0064	3366	0,0026	3337	0,0074	3153	0,0027	3113
2	0,0068	3480	0,0027	3449	0,0068	3362	0,0027	3328	0,0074	3153	0,0027	3117
3	0,0066	3480	0,0026	3442	0,0065	3366	0,0026	3334	0,0068	3160	0,0028	3134
4	0,0065	3480	0,0027	3447	0,0065	3361	0,0026	3330	0,007	3159	0,0027	3127
5	0,0065	3479	0,0027	3447	0,0069	3361	0,0027	3331	0,0073	3159	0,0028	3130
6	0,0065	3480	0,0028	3452	0,0066	3363	0,0028	3331	0,0072	3155	0,0027	3128
7	0,0064	3479	0,0027	3449	0,0067	3364	0,0026	3334	0,0077	3162	0,0028	3123
8	0,0064	3480	0,0028	3447	0,0068	3364	0,0027	3330	0,0072	3155	0,0026	3117
9	0,0066	3480	0,0027	3451	0,0065	3362	0,0028	3333	0,0079	3156	0,0029	3121
10	0,0065	3480	0,0026	3453	0,0071	3359	0,0026	3325	0,007	3156	0,0026	3120
Prům. hodnota	<b>0,00661</b>	<b>3480</b>	<b>0,00271</b>	<b>3448</b>	<b>0,00668</b>	<b>3363</b>	<b>0,00267</b>	<b>3331</b>	<b>0,00729</b>	<b>3157</b>	<b>0,00273</b>	<b>3123</b>
Sm.odchylka	0,000255		0,000070		0,000209		0,000078		0,000314		0,000090	
Číslo měření	Rychlost 5 mm/s				Rychlost 10 mm/s				Rychlost 20 mm/s			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0063	2500	0,0027	2470	0,0068	1584	0,0021	1576	0,0018	10	0,0018	10
2	0,0065	2503	0,0029	2480	0,0065	1585	0,0018	1569	0,0015	10	0,0015	10
3	0,0064	2502	0,0026	2483	0,006	1589	0,002	1576	0,0017	10	0,0017	10
4	0,0068	2499	0,0028	2476	0,0066	1587	0,0022	1573	0,0017	10	0,0017	10
5	0,0066	2506	0,0028	2485	0,0063	1589	0,002	1581	0,0025	10	0,0025	10
6	0,0067	2502	0,0028	2482	0,0064	1587	0,0021	1569	0,0021	10	0,0021	10
7	0,0069	2506	0,0027	2478	0,0063	1590	0,002	1580	0,0023	10	0,0023	10
8	0,0067	2502	0,0027	2471	0,007	1590	0,0021	1576	0,0033	10	0,0033	10
9	0,0068	2503	0,0027	2478	0,0063	1588	0,0021	1576	0,0021	10	0,0021	10
10	0,0069	2504	0,0029	2476	0,0065	1590	0,0022	1576	0,0024	10	0,0024	10
Prům. hodnota	<b>0,00666</b>	<b>2503</b>	<b>0,00276</b>	<b>2478</b>	<b>0,00647</b>	<b>1588</b>	<b>0,00206</b>	<b>1575</b>	<b>0,00214</b>	<b>10</b>	<b>0,00214</b>	<b>10</b>
Sm. odchylka	0,000196		0,000092		0,000269		0,000111		0,000498		0,000498	

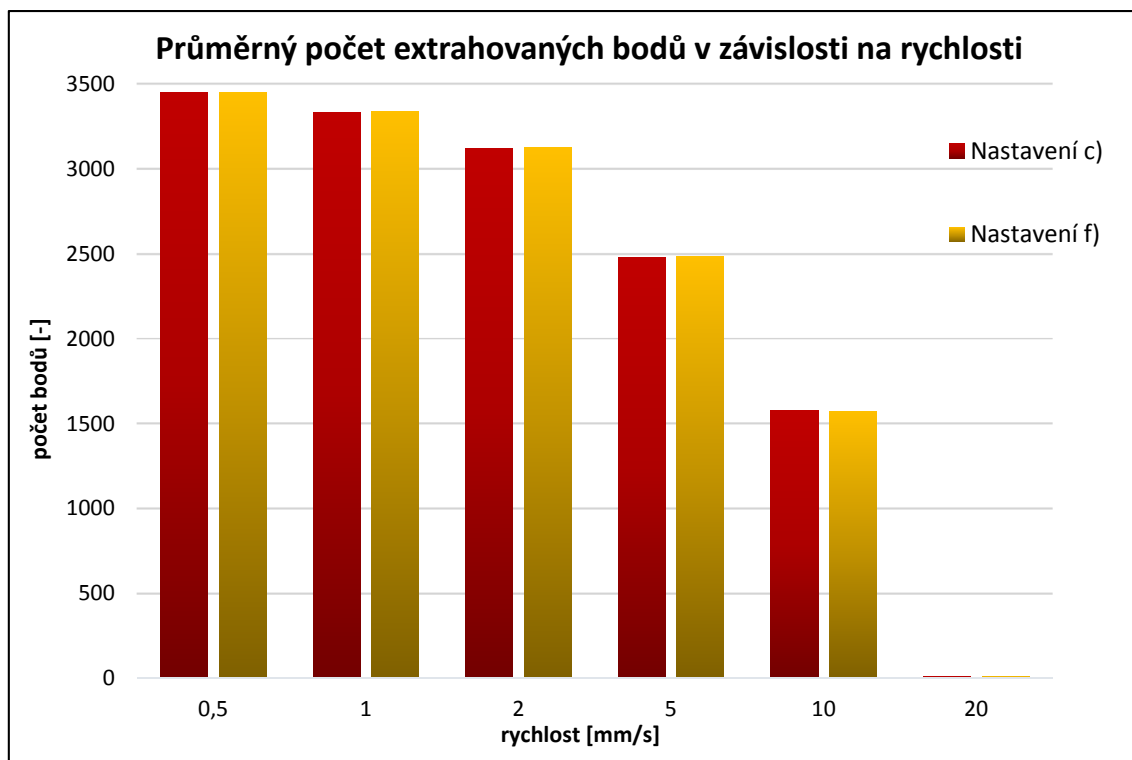
Tabulka 24: Hodnoty rovinností broušené plochy při jednotlivých rychlostech při nastavení c)

Hodnoty rovinností při jednotlivých rychlostech [mm]												
Nastavení f)												
Číslo měření	Rychlost 0,5 mm/s				Rychlost 1 mm/s				Rychlost 2 mm/s			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0073	3479	0,0028	3444	0,0078	3364	0,0028	3337	0,0075	3152	0,0029	3124
2	0,0073	3479	0,0027	3447	0,0075	3359	0,0028	3331	0,0076	3158	0,0029	3129
3	0,0072	3480	0,0028	3450	0,0082	3365	0,0028	3333	0,0084	3161	0,0026	3139
4	0,0074	3480	0,0028	3447	0,0083	3365	0,0029	3338	0,0079	3160	0,0025	3129
5	0,0075	3479	0,0028	3453	0,0081	3364	0,0027	3334	0,0072	3157	0,0027	3125
6	0,0068	3480	0,0027	3444	0,007	3357	0,0029	3335	0,0081	3152	0,0027	3124
7	0,0069	3478	0,0029	3448	0,0071	3363	0,0028	3340	0,0076	3159	0,0027	3132
8	0,0068	3480	0,0029	3449	0,0067	3363	0,0028	3340	0,0072	3155	0,0028	3130
9	0,007	3479	0,0029	3451	0,0066	3366	0,0027	3336	0,0074	3154	0,0029	3129
10	0,0071	3479	0,0028	3451	0,0073	3364	0,0026	3338	0,0069	3158	0,0026	3124
Prům. hodnota	<b>0,00713</b>	<b>3479</b>	<b>0,00281</b>	<b>3448</b>	<b>0,00746</b>	<b>3363</b>	<b>0,00278</b>	<b>3336</b>	<b>0,00758</b>	<b>3157</b>	<b>0,00273</b>	<b>3129</b>
Sm.odchylka	0,000237		0,000070		0,000589		0,000087		0,000428		0,000135	
Číslo měření	Rychlost 5 mm/s				Rychlost 10 mm/s				Rychlost 20 mm/s			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0081	2505	0,0028	2482	0,0069	1588	0,0026	1577	0,002	10	0,002	10
2	0,0072	2504	0,0028	2482	0,0071	1582	0,0025	1564	0,0018	10	0,0018	10
3	0,0076	2501	0,0028	2478	0,0069	1589	0,0022	1574	0,0024	10	0,0024	10
4	0,0076	2504	0,0026	2481	0,0072	1588	0,0025	1571	0,0022	10	0,0022	10
5	0,0067	2506	0,0027	2484	0,0063	1582	0,0025	1568	0,0022	10	0,0022	10
6	0,0074	2506	0,0028	2487	0,0063	1591	0,0022	1576	0,0025	10	0,0025	10
7	0,0076	2504	0,0026	2477	0,0076	1589	0,0025	1576	0,0015	10	0,0015	10
8	0,0074	2503	0,0028	2484	0,0076	1589	0,0024	1570	0,0014	10	0,0014	10
9	0,0067	2506	0,0026	2484	0,0066	1591	0,0024	1575	0,0025	10	0,0025	10
10	0,0069	2505	0,0027	2480	0,0069	1593	0,0025	1575	0,0016	10	0,0016	10
Prům. hodnota	<b>0,00732</b>	<b>2504</b>	<b>0,00272</b>	<b>2482</b>	<b>0,00694</b>	<b>1588</b>	<b>0,00243</b>	<b>1573</b>	<b>0,00201</b>	<b>10</b>	<b>0,00201</b>	<b>10</b>
Sm. odchylka	0,000426		0,000087		0,000436		0,000127		0,000394		0,000394	

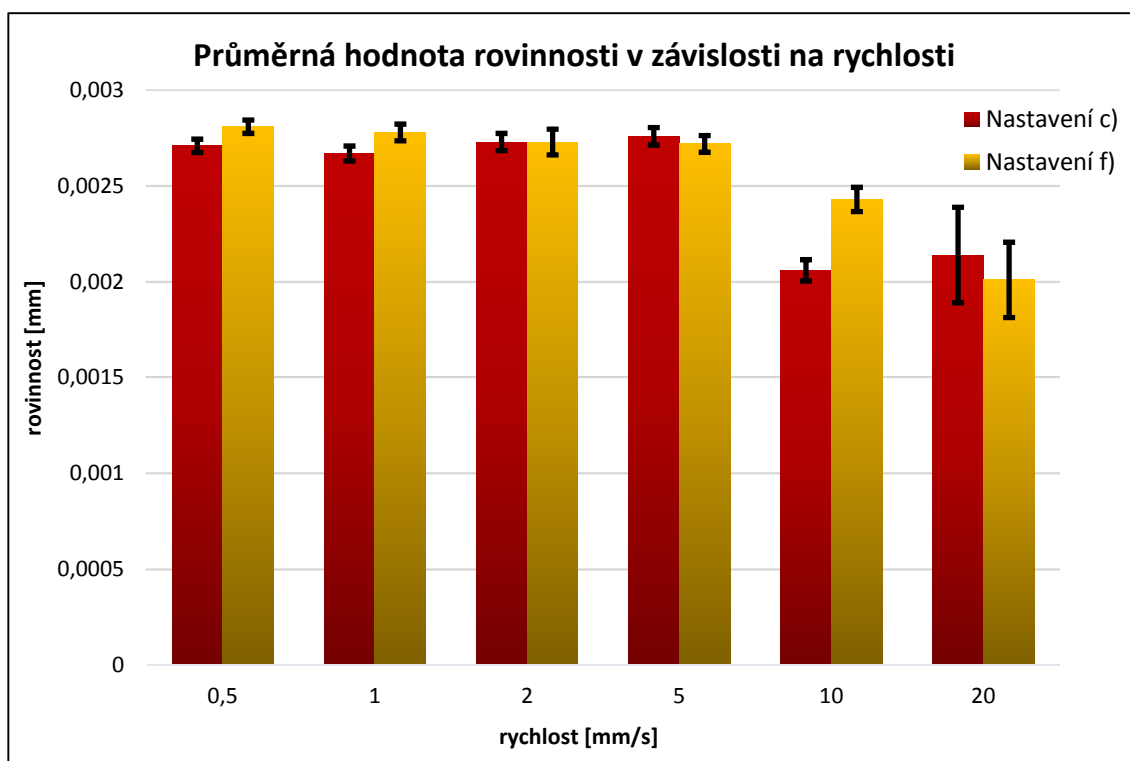
Tabulka 25: Hodnoty rovinností broušené plochy při jednotlivých rychlostech při nastavení f)



Tabulka 26: Ukázky extrahovaných bodů z broušené plochy při jednotlivých rychlostech



Graf 6: Průměrný počet extrahovaných bodů z broušené plochy v závislosti na rychlosti



Graf 7: Průměrná hodnota rovinnosti broušené plochy v závislosti na rychlosti včetně směrodatných odchylek

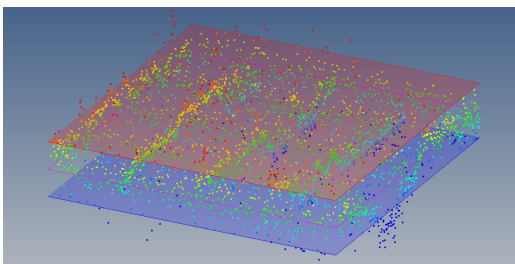
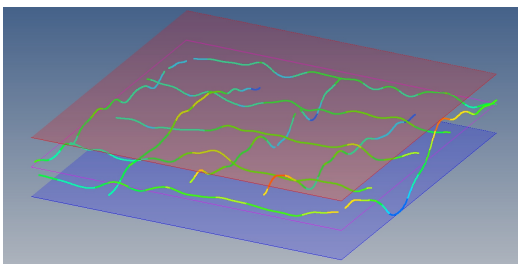
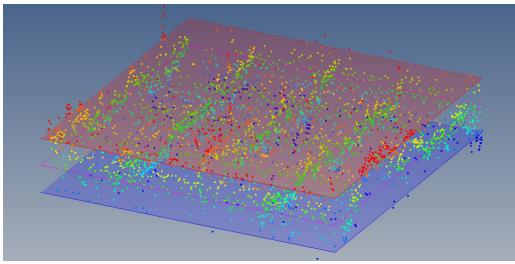
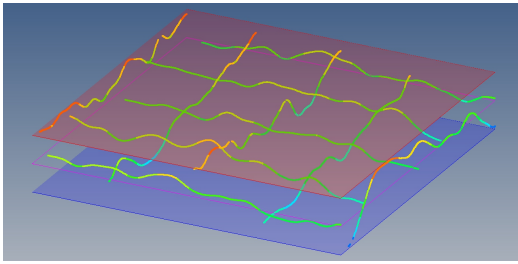
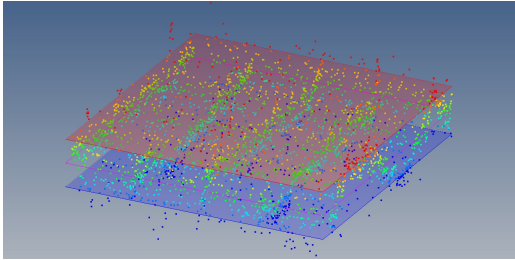
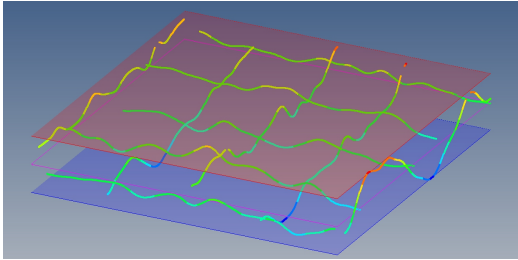
U broušené plochy platí stejný trend jako u plochy lapované, a to, že CWS nezvládá při vysokých rychlostech extrahovat velké počty bodů, což je patrné z grafu 6. Při rychlosti 20 mm/s senzor opět zaznamenal pouze 10 bodů a více než 3000 bodů extrahoval při rychlostech 2 mm/s a nižších u obou nastavení. Zároveň se shodují přibližně i počty extrahovaných bodů u obou typů povrchů při jednotlivých rychlostech, z čehož vyplývá že vysoká odrazivost lapované plochy nemá větší vliv na počet extrahovaných bodů (graf 1 a 6). Z hlediska nastavení byly počty bodů velmi podobné u jednotlivých rychlostí. Z grafické závislosti 7 je patrné, že i při více opakování a aplikaci filtru s eliminací odlehlých hodnot je hodnota rovinnosti přibližně dvojnásobná vůči referenční hodnotě, avšak výsledky jsou velice dobře porovnatelné mezi sebou při jednotlivých rychlostech. U broušené plochy platí stejně jako u lapované plochy, že více konzistentní výsledky dosahuje CWS při nižších rychlostech. Nicméně při porovnání grafů 2 a 7 je patrné, že lépe lze extrahovat body při vyšší rychlosti u broušené plochy, neboť výsledky jsou velice konzistentní do rychlosti 5 mm/s, zatímco u lapované plochy přibližně jen do rychlosti 2 mm/s. Jinak nižší hodnoty rovinnosti broušené plochy byly zaznamenány při rychlosti 10 mm/s vůči ostatním rychlostem a hodnota průměrné rovinnosti při 20 mm/s nemá větší vypovídací hodnotu, neboť s touto nastavenou rychlostí CWS zaznamenal při každém

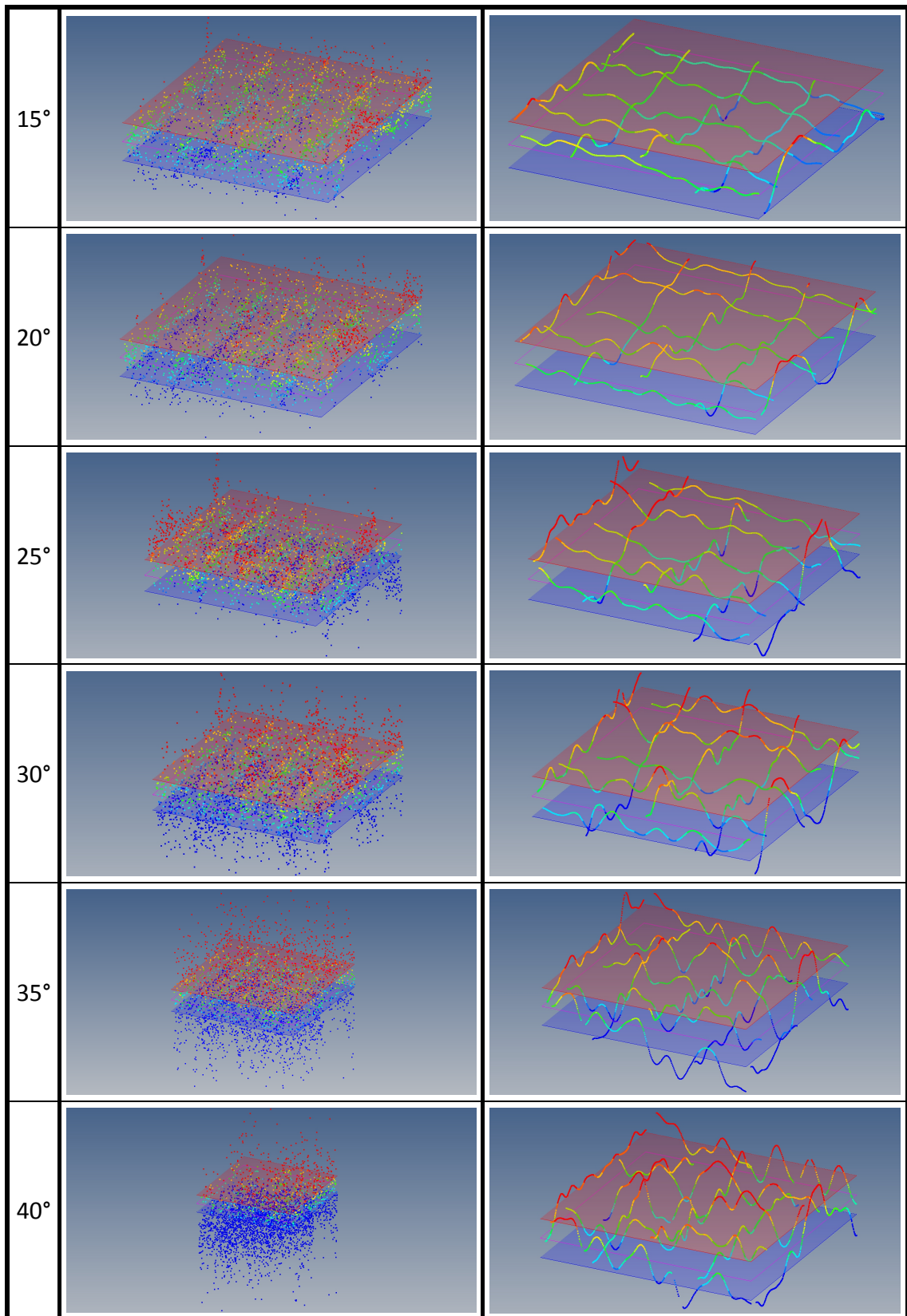


měření pouze 10 bodů. Hodnoty rovinností při obou nastavení v závislosti na rychlosti byly velice podobné, ale pro poslední část experimentu bylo vybráno nastavení c) vzhledem k nepatrně nižším směrodatným odchylkám při nižších rychlostech (viz chybové úsečky v grafu 7). Zároveň byla zvolena rychlost 1 mm/s pro testování CWS při naklonění, a to ze stejného důvodu jako u lapované plochy.

#### 4.2.2.4. Vliv naklonění broušené plochy vůči optické ose CWS na její rovinnost

Poslední část experimentu s broušenou plochou se nijak výrazně neliší od experimentu s lapovanou plochou. Opět se zvoleným nastavením c) a rychlostí 1 mm/s bylo určeno 9 úhlových poloh koncové měřky, tak aby broušená plocha měla sklon od 0° do 40° vůči optické ose CWS. Úhlový krok byl stejný, a to 5°. Pod tímto textem je umístěna tabulka, jež zobrazuje ukázky rovinností broušené plochy při jednotlivých úhlových polohách (viz tabulka 27). V této tabulce jsou ukázky rovinností bez filtrace i s filtrací a eliminací odlehlých hodnot. Zaznamenané hodnoty z této části experimentu včetně grafických závislostí z nich vyplývajících jsou umístěny za tabulkou 27.

Ukázky rovinností při jednotlivých úhlových polohách		
Úhel	Bez filtrace	Filtrace + eliminace odlehlých hodnot
0°		
5°		
10°		



Tabulka 27: Ukázky rovinností při jednotlivých úhlových polohách broušené plochy

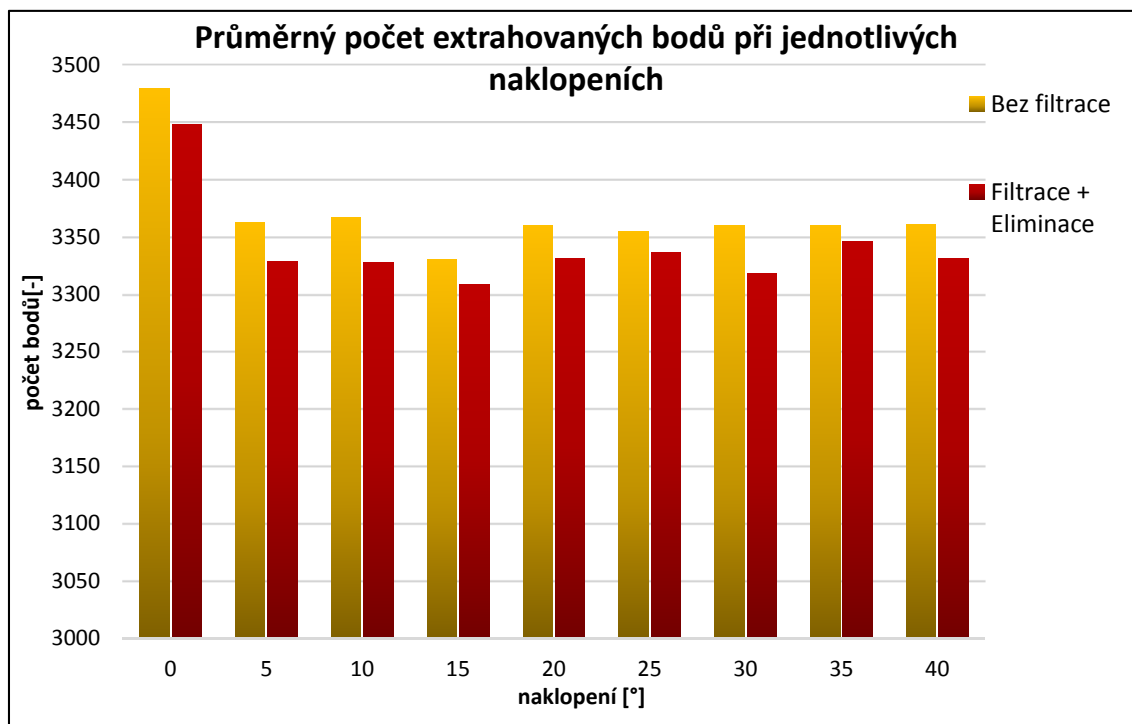
Z obrázků v tabulce 27 je patrné, že extrahované body nejsou výrazněji naklopeny jako v případě lapované plochy, z čehož lze usuzovat, že u broušené plochy nevznikaly tak výrazné odlehle hodnoty vůči měřeným. Avšak velice zajímavým poznatkem je, že v místech, kde je výrazná textura povrchu (například dráha po brusném zrně) nejsou křivky vzniklé po filtraci a eliminaci odlehlejších hodnot v každé úhlové poloze broušené plochy stejné, ale v jedné úhlové poloze se dané místo jeví jako prohlubeň a v jiné úhlové poloze zase jako vrcholek v závislosti na tom, jak se odrazí paprsek zpět do objektivu od tohoto místa. To je například patrné z první linie rastru vpravo, kde v poloze 0° je na této linii výrazná prohlubeň a v poloze 5° je toto místo vyhodnoceno jako vrcholek.

Hodnoty rovinností při jednotlivých úhlových naklopeních [mm]								
Číslo měření	0°				5°			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0073	3480	0,0028	3447	0,0066	3361	0,0027	3328
2	0,0068	3480	0,0027	3449	0,0066	3362	0,0028	3333
3	0,0066	3480	0,0026	3442	0,0064	3365	0,0028	3339
4	0,0065	3480	0,0027	3447	0,0068	3365	0,0028	3334
5	0,0065	3479	0,0027	3447	0,0065	3363	0,0028	3326
6	0,0065	3480	0,0028	3452	0,007	3364	0,0027	3326
7	0,0064	3479	0,0027	3449	0,0067	3365	0,0028	3328
8	0,0064	3480	0,0028	3447	0,0063	3361	0,0027	3320
9	0,0066	3480	0,0027	3451	0,0068	3362	0,0027	3325
10	0,0065	3480	0,0026	3453	0,0067	3363	0,0026	3324
Prům. hodnota	<b>0,00661</b>	<b>3480</b>	<b>0,00271</b>	<b>3448</b>	<b>0,00664</b>	<b>3363</b>	<b>0,00274</b>	<b>3328</b>
Číslo měření	10°				15°			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0074	3365	0,003	3330	0,0082	3365	0,0035	3347
2	0,0076	3366	0,0031	3332	0,009	3366	0,0035	3345
3	0,0077	3367	0,003	3336	0,0096	3365	0,0034	3340
4	0,0065	3368	0,003	3335	0,0084	3367	0,0034	3344
5	0,0076	3367	0,0031	3335	0,008	3028	0,0033	3007
6	0,0074	3364	0,0031	3331	0,0083	3363	0,0034	3342
7	0,007	3367	0,003	3332	0,0097	3364	0,0033	3338
8	0,0079	3369	0,0029	3337	0,0085	3362	0,0035	3340
9	0,0068	3370	0,003	3336	0,0084	3366	0,0034	3343
10	0,0073	3368	0,003	3332	0,0084	3360	0,0035	3335
Prům. hodnota	<b>0,00732</b>	<b>3367</b>	<b>0,00302</b>	<b>3328</b>	<b>0,00865</b>	<b>3331</b>	<b>0,00342</b>	<b>3308</b>
Číslo měření	20°				25°			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0104	3364	0,004	3330	0,0132	3360	0,0069	3336
2	0,0092	3361	0,004	3329	0,0138	3363	0,0065	3340
3	0,0089	3366	0,0039	3332	0,0131	3364	0,0065	3340
4	0,0093	3367	0,0039	3332	0,0134	3360	0,0064	3333
5	0,0095	3362	0,0039	3327	0,0137	3362	0,0067	3335
6	0,0093	3369	0,004	3337	0,0134	3361	0,0067	3334
7	0,009	3367	0,004	3333	0,0131	3364	0,007	3340
8	0,0101	3363	0,004	3332	0,0136	3364	0,0067	3338



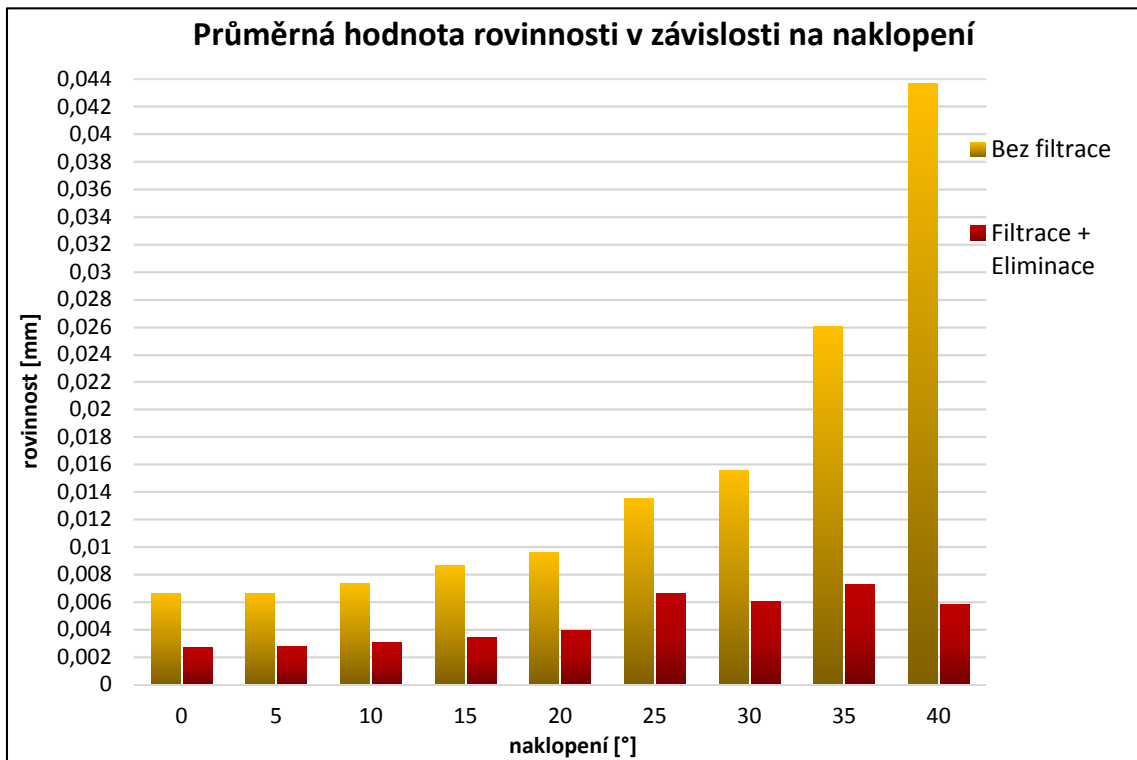
9	0,0093	3366	0,004	3334	0,0141	3363	0,0066	3336
10	0,0111	3364	0,0039	3329	0,0138	3363	0,0065	3337
Prům. hodnota	<b>0,00961</b>	<b>3360</b>	<b>0,00396</b>	<b>3332</b>	<b>0,01352</b>	<b>3355</b>	<b>0,00665</b>	<b>3337</b>
Číslo měření	30°				35°			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0156	3360	0,006	3329	0,0268	3357	0,0074	3344
2	0,0155	3359	0,0059	3332	0,0251	3360	0,0075	3348
3	0,0153	3362	0,006	3333	0,0266	3360	0,007	3342
4	0,014	3363	0,0061	3341	0,0252	3360	0,0072	3347
5	0,0159	3360	0,006	3334	0,0251	3357	0,0074	3342
6	0,0169	3359	0,006	3336	0,0278	3363	0,0071	3348
7	0,0151	3356	0,006	3333	0,0258	3360	0,0072	3346
8	0,0149	3360	0,006	3334	0,0263	3363	0,0072	3357
9	0,0157	3360	0,0061	3335	0,025	3356	0,0072	3340
10	0,0166	3361	0,0059	3337	0,0268	3361	0,0074	3344
Prům. hodnota	<b>0,01555</b>	<b>3360</b>	<b>0,00600</b>	<b>3318</b>	<b>0,02605</b>	<b>3360</b>	<b>0,00726</b>	<b>3346</b>
Číslo měření	40°							
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace					
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body				
1	0,0405	3361	0,0061	3331				
2	0,0499	3361	0,0056	3336				
3	0,0419	3359	0,0058	3330				
4	0,0376	3362	0,0063	3329				
5	0,0478	3361	0,0059	3338				
6	0,0423	3363	0,0053	3329				
7	0,0407	3364	0,0053	3331				
8	0,0449	3359	0,006	3325				
9	0,0464	3364	0,0061	3331				
10	0,0446	3358	0,0058	3330				
Prům. hodnota	<b>0,04366</b>	<b>3361</b>	<b>0,00582</b>	<b>3331</b>				

Tabulka 28: Hodnoty rovinností při jednotlivých úhlových naklonech broušené plochy



Graf 8: Průměrný počet extrahovaných bodů při jednotlivých naklonech broušené plochy

Z grafické závislosti 8 je patrné, že výraznější pokles počtu měřených bodů nastal pouze mezi výchozí polohou, tedy 0° a polohou při naklonění 5°, kdy počet extrahovaných bodů poklesl přibližně o 100 bodů, v případě filtrovaných bodů byl rozdíl ještě o něco málo výraznější. Při všech ostatních úhlových polohách byl počet extrahovaných bodů přibližně konstantní, totéž přibližně platilo i pro body zatížené filtrací a eliminací odlehlých hodnot.



Graf 9: Průměrná hodnota rovinnosti v závislosti na naklonění broušené plochy

Poměrně značný vliv mělo naklonění na hodnotu rovinnosti (viz graf 9). Zároveň je z něho patrné, že podstatnou částí při vyhodnocování výsledků je proces filtrace a eliminace odlehlých hodnot, neboť hodnoty rovinností bez filtrace byly několikanásobně vyšší při vyšších úhlových polohách vůči výchozí poloze než v případě dat, které byly zatíženy filtrací a eliminací odlehlých hodnot.

U filtrovaných dat měla hodnota rovinnosti zhruba do 20° mírnou rostoucí tendenci, avšak její hodnota nepřesáhla hodnotu 4  $\mu\text{m}$ . Hodnota rovinnosti se výrazněji změnila až při nakloněních větších než 20°. Tuto změnu lze částečně vysvětlit tím, že při vyšších úhlech se senzor CWS při nastavení c) opět nechoval stejně jako při nižších úhlových nakloněních. Z tohoto důvodu byly stejně jako v případě lapované plochy nastaveny pro každé uhlové naklonění větší než 15° nové parametry tak aby se CWS choval podobně jako při nižších úhlových nakloněních koncové měřky. Zajímavým zjištěním bylo, že pro

broušený povrch bylo možné vytvořit dodatečné nastavení i pro úhly 35° a 40°, což nebylo u lapované plochy možné. Hodnoty parametrů nastavených při jednotlivých úhlových polohách jsou uvedeny v tabulce 29. Z těchto parametrů je patrné, že s rostoucím úhlem pro nastavení klesala vzorkovací frekvence, do úhlu 30° se mírně snižovala automatická expozice a nad tento úhel zase mírně zvyšovala. Prahová hodnota byla konstantní.

Úhel	Vzorkovací frekvence [Hz]	Automatická expozice [-]	Práh [-]
20°	2000	200	30
25°	1000	197	30
30°	200	195	30
35°	150	201	30
40°	80	210	30

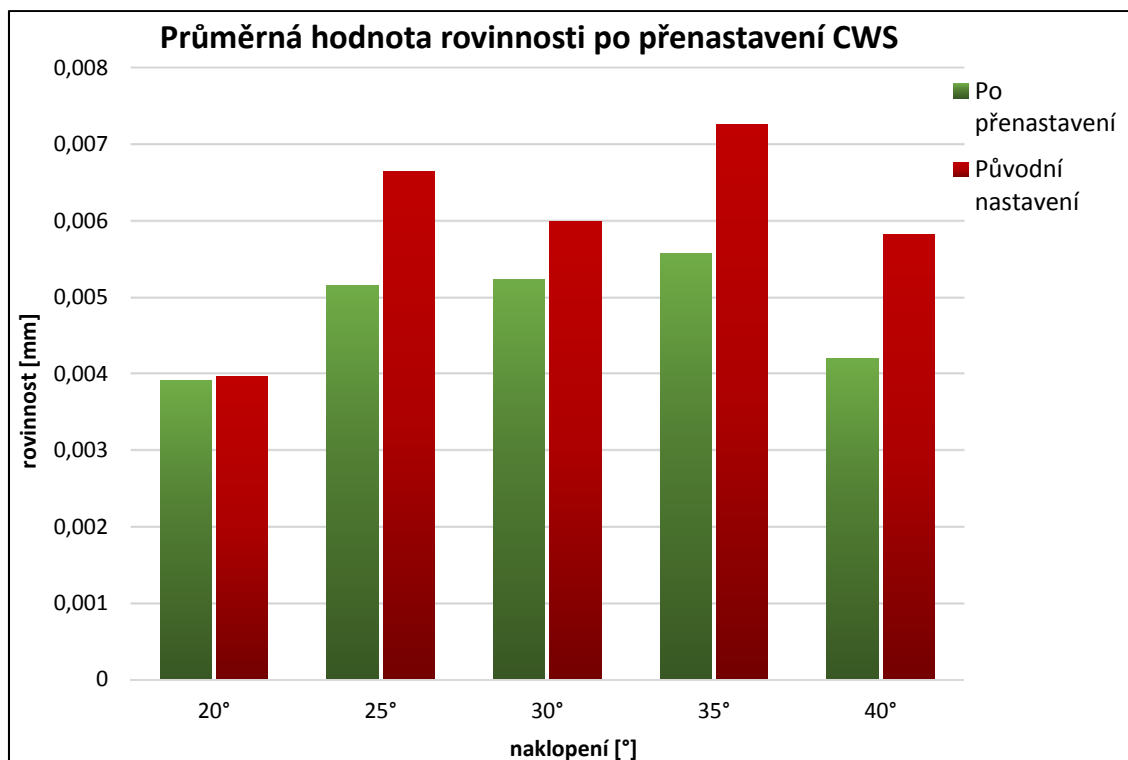
Tabulka 29: Přenastavené parametry CWS při vyšších úhlových naklonech broušené plochy

S přenastavenými hodnotami parametrů z tabulky 29 bylo nově provedeno 5 náměrů rovinnosti pro každou úhlovou polohu měřky. Jakých výsledků se lze dobat s přenastavenými parametry je uvedeno v tabulce 30 a v grafu 10.

Hodnoty rovinností při jednotlivých úhlových naklonech [mm]								
Číslo měření	20°				25°			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0093	3368	0,0038	3263	0,0128	3328	0,0054	3320
2	0,0091	3368	0,0039	3263	0,0136	3327	0,005	3320
3	0,0101	3370	0,0039	3261	0,0123	3329	0,0051	3323
4	0,0088	3369	0,0039	3263	0,0126	3329	0,005	3324
5	0,0105	3369	0,0041	3264	0,0133	3328	0,0053	3322
Prům. hodnota	<b>0,00956</b>	<b>3369</b>	<b>0,00392</b>	<b>3263</b>	<b>0,01292</b>	<b>3328</b>	<b>0,00516</b>	<b>3322</b>
Číslo měření	30°				35°			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace		Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0146	3012	0,0051	3000	0,0321	2745	0,0047	2703
2	0,0165	3011	0,0052	2998	0,0348	2737	0,0058	2704
3	0,0137	3013	0,0051	3002	0,0247	2745	0,0058	2716
4	0,0164	3010	0,0053	2996	0,0335	2738	0,0056	2701
5	0,016	3012	0,0055	2998	0,0343	2733	0,006	2694
Prům. hodnota	<b>0,01544</b>	<b>3012</b>	<b>0,00524</b>	<b>2999</b>	<b>0,03188</b>	<b>2740</b>	<b>0,00558</b>	<b>2703</b>

Číslo měření	40°			
	Bez filtrace		Filtrace + eliminace	
	Rovinnost	Body	Rovinnost	Body
1	0,0212	2496	0,0038	2483
2	0,026	2499	0,0042	2475
3	0,0231	2496	0,0043	2470
4	0,0217	2499	0,0043	2481
5	0,0295	2496	0,0044	2476
<b>Prům. hodnota</b>	<b>0,02430</b>	<b>2497</b>	<b>0,00420</b>	<b>2477</b>

Tabulka 30: Hodnoty rovinností po přenastavení CWS při vyšších úhlových naklonech broušené plochy



Graf 10: Průměrná hodnota rovinnosti v závislosti na naklonění broušené plochy po přenastavení parametrů CWS

Stejně jako u lapované plochy i pro broušenou plochu lze dosáhnout nepatrně lepších výsledků úpravou parametrů CWS pro každou větší úhlovou polohu. Z toho vyplývá, že na nastavení parametrů CWS, a tak i finální výsledek, má vliv nejen typ materiálu, ale i úhlová poloha dílu vůči optické ose.

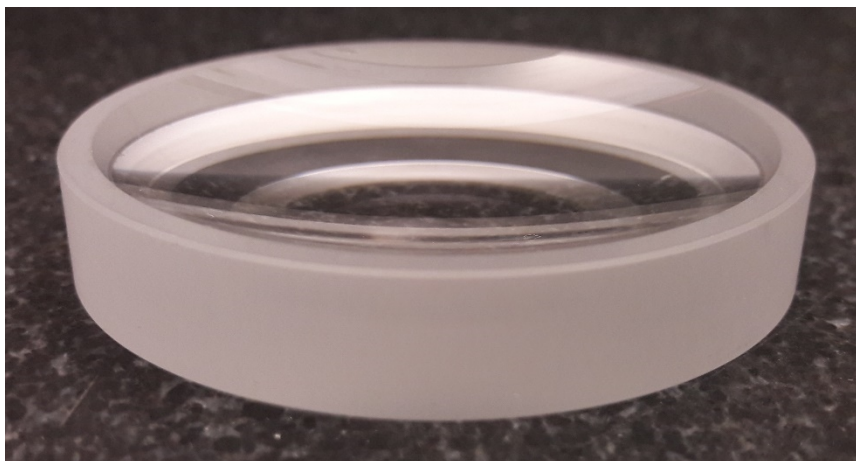
### 4.3. Měření tloušťky chromatickým senzorem bílého světla

Velkou výhodou tohoto typu sensoriky je, že dokáže měřit tloušťku dílů z transparentních materiálů v jednom směru snímání a při konstantní poloze měřeného dílu. Tento způsob měření je vhodný zejména pro díly, jež nelze změřit dotykovým snímačem, například z důvodu křehkosti nebo jejich deformace během měření. Zároveň umožňuje měřit tloušťku materiálu zakomponovaného do sestavy ve smontovaném stavu, k jehož potřebnému povrchu se není možné dostat bez demontáže.

Celý princip funguje na průchodu paprsku skrz materiál. CWS extrahuje bod na rozhraní vzduchu a materiálu, následně projde skrz materiál a dojde k extrakci bodu na rozhraní materiálu měřeného dílu a dalšího optického prostředí. Nicméně, aby bylo možné docílit správného výsledku, je nutné změřenou vzdálenost zkorigovat vynásobením indexem lomu daného materiálu, neboť paprsek prochází prostředím optickým hustším, než je vzduch, přesněji vakuum, u kterého je index lomu roven jedné. Avšak z tohoto logicky vyplývá, že pro vysokou přesnost výsledku je nutné znát velice přesně index lomu daného materiálu z něhož se finální výsledek vypočítává.

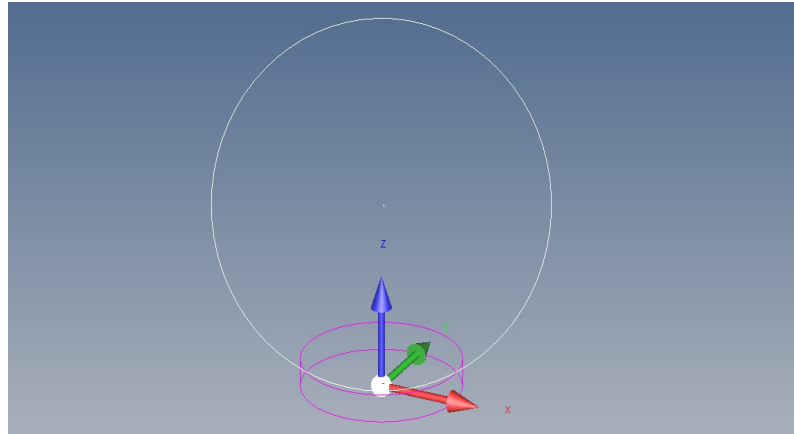
#### 4.3.1. Měření tloušťky čočky v její optické ose

K tomuto experimentu byla vybrána optická čočka (viz obrázek 53), jejíž tloušťka je ohraničená rovinnou plochou a kulovou plochou, tedy tento rozměr je vymezen bodem na rovinné ploše a bodem na kulové ploše. Tloušťka ke změření byla zvolena v optické ose čočky.



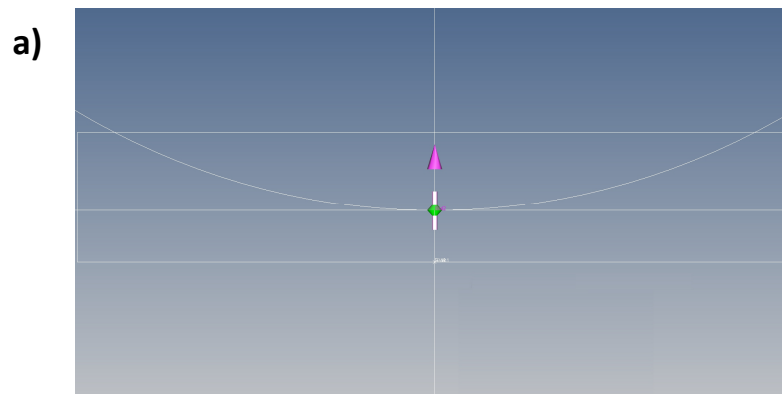
Obrázek 53: Optická čočka

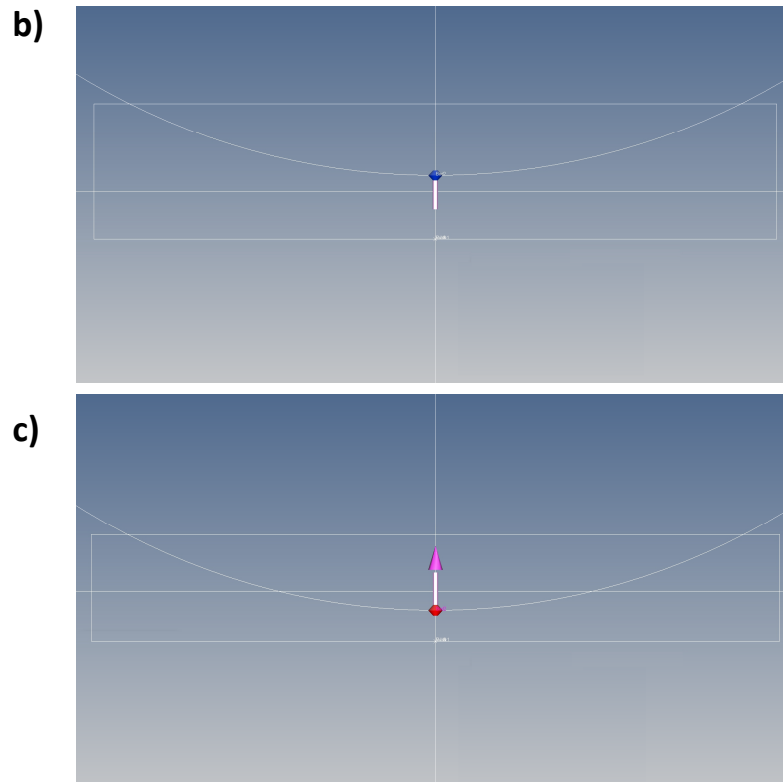
Měření čočky je znázorněno na obrázku 54. Čočka je v měřicím softwaru vytvořena průnikem válcové a kulové plochy. U této aplikace bylo využito možnosti multisenzorového stroje kombinovat více druhů sensoriky. Kontaktní sondou byl nasnímán válcový element a bezkontaktním senzorem CWS byla extrahována kulová plocha.



Obrázek 54: Měření čočky v měřicím softwaru

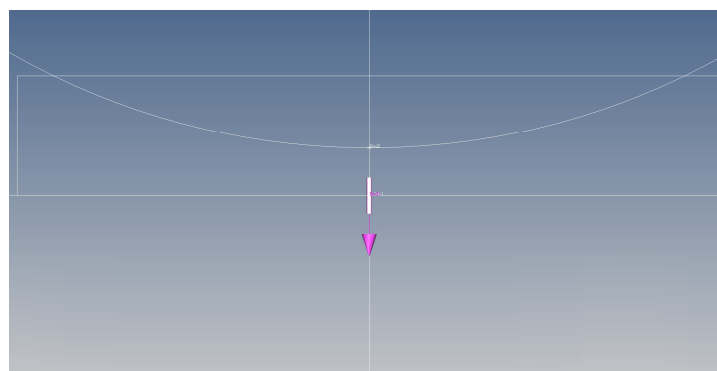
Na obrázcích 55 je 2D pohled na čočku a zároveň je na nich demonstrováno měření bodu ležícím na optické ose a na horní ploše čočky, tedy na povrchu kulové plochy. Šedý válec znázorňuje měřicí rozsah CWS, tedy rozsah, ve kterém je CWS schopný extrahovat body. Indikátor na obrázku symbolizuje, přibližnou polohu senzoru v měřicím rozsahu. Na obrázku 55a je indikátor přibližně uprostřed měřicího pole, což značí zelená barva. Pokud se senzor dostane na horní hranici měřicího rozsahu, indikátor se objeví na horní části válce a bude mít modrou barvu (viz obrázek 55 b), naopak pokud se senzor dostane na dolní hranici měřicího rozsahu, bude červený a umístěn ve spodní části válce (viz obrázek 55c). Z obrázku 55 je tedy patrné, že bod z horní plochy je měřitelný v celém měřicím rozsahu.





Obrázek 55: Měření bodu na horní ploše a) ve středu měřicího rozsahu b) na horní hranici měřicího rozsahu c) na dolní hranici měřicího rozsahu

Avšak při měření bodu na spodní rovinné ploše bylo zjištěno, že paprsek vysílaný chromatickým senzorem bílého světla není schopen v žádném místě měřicího rozsahu prostoupit tento materiál až na spodní plochu. To je názorně viditelné na obrázku 56, kde již není přítomen žádný indikátor. Tímto lze demonstrovat limity tohoto senzoru, neboť světlo v závislosti na typu materiálu a jeho tloušťce je pohlcováno nebo rozptýleno tak, že se už není schopné navrátit zpět do objektivu, aby došlo k jeho vyhodnocení.

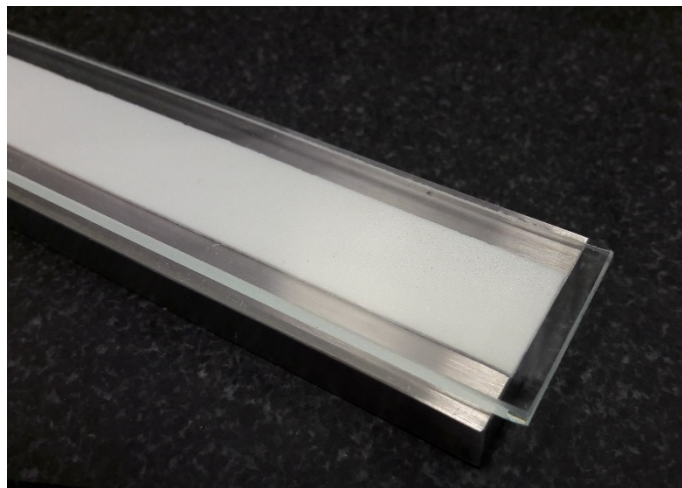


Obrázek 56: Měření bodu na spodní rovině

Nicméně rozměr byl změřen kombinací dotykového snímače, který nasnímal válec se spodní rovinou a CWS, jenž extrahoval data o kulové ploše. Rozměr byl vyhodnocen jako vzdálenost mezi bodem vytvořeným na kulové ploše, který byl spočítán jako rozdíl polohy středu koule a jejího poloměru ve směru kolmém na rovinu určené dotykovým snímačem a bodem na rovině, jehož poloha byla určena kolmicí ze středu kulové plochy k této rovině. Hodnota tohoto rozměru je 3,9745 mm.

### 4.3.2. Měření tloušťky

Jelikož v předchozí podkapitole nebylo možné změřit tloušťku materiálu pomocí chromatického senzoru bílého světla z důvodu dosažení limitů této technologie, byl vytvořen nový experiment se skleněným materiálem o menší tloušťce, kterou již je CWS schopný změřit. Měřený skleněný materiál je vyobrazen na obrázku 57.



Obrázek 57: Měřený skleněný materiál

Při tomto experimentu byla tloušťka skla pro porovnání výsledků získaných pomocí CWS změřena ještě dotykovým snímacím systémem VAST XXT TL3 na stroji Zeiss O-Inspect a běžným komunálním měřidlem, a to digitálním mikrometrem. Na testovaném skle byla vymezena oblast, ve které bylo provedeno celkově 5 náměrů oběma typy senzoriky souřadnicového měřicího stroje a rovněž tak i mikrometrem. Veškeré naměřené výsledky shrnuje tabulka 31. Sloupeček CWS vyjadřuje hodnoty tloušťek materiálu, které byly získány CWS, v prostředním sloupečku jsou hodnoty tloušťek po zkorigování indexem lomu. Jelikož bylo k experimentu použito obyčejné sklo, o kterém nebyly známy bližší optické informace, byl použit index lomu pro běžné sklo, jehož hodnota je přibližně 1,52 [73].



Hodnoty tloušťky skla měřené více způsoby [mm]				
Číslo měření	CWS	CWS po korekci	Dotykový senzor	Mikrometr
1	2,0243	3,0769	3,1317	3,1310
2	2,0248	3,0777	3,1320	3,1320
3	2,0237	3,0760	3,1317	3,1310
4	2,0239	3,0763	3,1316	3,1330
5	2,0238	3,0762	3,1322	3,1310
Průměrná hodnota	2,02410	3,07663	3,13184	3,13160
Směrodatná odchylka	0,000405	0,000616	0,000251	0,000894

Tabulka 31: Hodnoty tloušťky skla měřené více způsoby

Z tabulky 31 je patrné, že náměry tlouštěk skla pomocí CWS jsou poměrně konzistentní, jakožto i u náměrů dotykovým senzorem a mikrometrem. Průměrné hodnoty tlouštěk změřené dotykovou snímací sondou a ty změřené mikrometrem se velice dobře shodují. A i průměrná hodnota tloušťky změřené CWS se po použité korekci indexem lomu poměrně dobře shoduje, rozdíl této průměrné hodnoty je sice vůči průměrné hodnotě získané dotykovým měřením přibližně 0,055 mm, ale to není tak markantní rozdíl vzhledem k tomu, že nebyl znám přesný index lomu a byl použit pro obecné sklo.

Z toho lze usuzovat, že měřené sklo mělo pravděpodobně vyšší index lomu, než má obecné sklo. Aby byly výsledky průměrných hodnot přibližně stejné, musely by se hodnoty změřené CWS korigovat indexem lomu přibližně o velikosti 1,547. Tímto lze konstatovat, že pro dosažení přesných výsledků při použití CWS pro měření tlouštěk transparentních materiálů je nezbytně nutné mít velice přesnou hodnotu indexu lomu.

#### 4.3.3. Měření tloušťky CWS na montážní sestavě

Poslední předmět, na který byl CWS aplikován pro měření tloušťky byly náramkové hodinky, jejichž horní sklo reprezentuje aplikaci, u které není možné změřit její tloušťku, aniž by nedošlo k její demontáži nebo destrukci. Obrázek hodinek, jejichž tloušťka byla měřena pomocí CWS je na obrázku 58.

Celkově bylo provedeno 5 náměrů tloušťky. Místa, kde byly provedeny jednotlivé náměry, byla rovnoměrně rozložena po celé ploše skla hodinek. Hodnoty těchto náměrů jsou uvedeny v tabulce 32.



Obrázek 58: Hodinky

Hodnoty tloušťky hodinkového skla [mm]		
Číslo měření	CWS	CWS po korekci
1	1,6221	2,4656
2	1,6223	2,4659
3	1,6221	2,4656
4	1,6225	2,4662
5	1,6223	2,4659
Průměrná hodnota	1,62226	2,46583
Směrodatná odchylka	0,000150	0,000227

Tabulka 32: Hodnoty tloušťky hodinkového skla

Při měření tloušťky skla hodinek dosahoval CWS velice konzistentních výsledků a tyto výsledky byly opět korigovány indexem lomu pro sklo, tedy hodnotou 1,52. Výsledky po korekci indexem lomu jsou uvedeny v pravém sloupečku. Z náměrů vyplývá, že hodinové sklíčko má s největší pravděpodobností tloušťku přibližně 2,47 mm.

## 5. Závěr

Diplomová práce se tematicky zabývala problematikou spjatou s chromatickým senzorem bílého světla, což je bezkontaktní snímací systém. Pro lepší orientaci čtenáře v dnešní rozsáhlé nabídce souřadnicové měřicí techniky byl ve druhé kapitole této práce zpracován krátký přehled dnes nejčastěji používaných souřadnicových strojů rozdělených podle typu souřadného systému těchto strojů. A v navazující třetí kapitole byl vytvořen souhrn o snímacích systémech používaných v oblasti souřadnicové měřicí techniky, včetně blíže zkoumaného chromatického senzoru bílého světla. Zároveň byl ve stručnosti ve třetí kapitole popsán princip fungování jednotlivých snímacích systémů a současně byly uvedeny jejich základní výhody a nevýhody.

Praktická část této práce zkoumala jednotlivé vlivy na přesnost měření, konkrétně rovinnosti, pomocí chromatického senzoru bílého světla, jenž byl zakomponován na multisenzorovém souřadnicovém stroji Zeiss O-Inspect. Mezi tyto vlivy patřil typ povrchu, pro tento účel byl zvolen lapovaný povrch a broušený povrch, nastavení chromatického senzoru bílého světla, rychlost snímání bodů a naklopení zkoumaného dílu vůči optické ose senzoru.

Základním poznatkem z praktické části je, že tento typ senzoru je velice citlivý na výraznou texturu povrchu, to znamená, že u zkoumaného broušeného povrchu, jehož textura povrchu je výraznější než u lapované plochy, byl do měřených hodnot vnesen i vliv drsnosti, který nebylo možné odfiltrovat ani softwarovou filtrací do takové míry, aby měřené hodnoty byly porovnatelné s referenční hodnotou, která byla získána pomocí kontaktního snímacího systému. Z čehož lze zároveň konstatovat, že při použití kontaktního snímacího systému dochází automaticky k mechanické filtraci drsnosti u povrchu s nízkou drsností vlivem velikosti snímacího elementu. Tento fakt obecně zhoršuje reprodukovatelnost mezi kontaktními a bezkontaktními snímacími systémy.

Nastavení parametrů na CWS má velký vliv na konečné výsledky. Při špatném nastavení těchto parametrů může dojít k markantně rozdílným výsledkům, z toho vyplývá, že proces nastavení je velice podstatným procesem při používání chromatického senzoru bílého světla. Ze získaných výsledků lze obecně konstatovat, že čím více se hodnota světelné energie vychýlí nad optimální pásmo, tím více je pravděpodobné, že výsledky budou nekorektní (viz kapitola 4.2.1.2. a kapitola 4.2.2.2.).

Dalším zkoumaným vlivem byla rychlost snímání. S její zvyšující se hodnotou docházelo obecně k extrakci menšího počtu bodů a zároveň i k ovlivnění snímaných bodů na obou typech zkoumaných povrchů, ze kterých byla následně vypočítávána zkoumaná charakteristika, což byla rovinnost. Ze získaných výsledků v kapitole 4.2. je zároveň možné konstatovat, že vyšších rychlostí lze použít u broušeného povrchu.

Poslední zkoumaný vliv bylo naklopení zkoumaného povrchu vůči optické ose CWS. Z naměřených dat je možno konstatovat, že úhel naklopení nemá velký vliv na počet extrahovaných bodů, za to ale má výrazný vliv na finální výsledky měřené charakteristiky, obecně čím vyšší úhel je, tím horší jsou výsledky. Tuto vlastnost lze částečně eliminovat vytvořením dodatečného nastavení pro vyšší úhlové polohy. Z toho zároveň vyplývá, že neexistuje jedno univerzální nastavení CWS, ale je potřeba parametry CWS upravovat v závislosti nejen na typu materiálu, ale i v závislosti na poloze dílu vůči optické ose senzoru. Proto pro tvarové díly není příliš vhodné použití pevně zakomponovaného CWS na multisenzorovém stroji, ale existuje řešení ve formě indexovatelné hlavy snímacího systému, která je schopná vhodně polohovat CWS vůči měřenému povrchu, tento typ hlavy lze například nainstalovat na kartézsky uspořádané souřadnicové stroje.

Nakonec v praktické části byla zkoumána možnost měření tloušťky materiálu bezdotykově chromatickým senzorem bílého světla. Možnosti měření tímto typem senzoru se značně odvíjí od typu měřeného materiálu (jeho optických vlastnostech) a jeho tloušťce. V experimentu bylo prokázáno, že měření tloušťky materiálu proniknutím světelného paprsku je možné, avšak pro přesné výsledky a možnou reprodukovatelnost výsledků je potřeba velice podrobně znát optické vlastnosti materiálu, konkrétně jeho index lomu. Zároveň bylo v praktické části poukázáno na možnost měření tloušťky dílu ve smontovaném stavu, což je velkou výhodou tohoto typu sensoriky.

## Použité informační zdroje:

- [1] HOCKEN, Robert J. a Paulo H. PEREIRA. Coordinate measuring machines and systems. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2012. ISBN 978-1-57444-652-4.
- [2] Globalspec: Coordinate Measuring Machines (CMM) Information [online]. New York: IEEE GlobalSpec [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: [http://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing\\_process\\_equipment/inspection\\_tools\\_instruments/coordinate\\_measuring\\_machines\\_cmm](http://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/inspection_tools_instruments/coordinate_measuring_machines_cmm)
- [3] Gymrumburk: souřadné systémy [online]. Rumburk [cit. 2018-02-04]. Dostupné z: [http://www.gymrumburk.cz/personal/lib/exe/fetch.php?media=seifert:ujep:fpi:p02-souradnice\\_atp.pdf](http://www.gymrumburk.cz/personal/lib/exe/fetch.php?media=seifert:ujep:fpi:p02-souradnice_atp.pdf)
- [4] BERÁNEK, Libor. Průmyslová metrologie. Praha. Studijní podklad. ČVUT, FAKULTA STROJNÍ, ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE.
- [5] TICHÁ, Šárka. STROJÍRENSKÁ METROLOGIE: část 1 [online]. Ostrava, 2004 [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: <books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>. Vysoká škola báňská.
- [6] MACHÁČEK, Pavel. Souřadnicové měřicí stroje [online]. Praha [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: [http://u12134.fsid.cvut.cz/podklady/PMTR/01\\_prednaska\\_PMTR\\_Souradnicove\\_merici\\_stroje.pps](http://u12134.fsid.cvut.cz/podklady/PMTR/01_prednaska_PMTR_Souradnicove_merici_stroje.pps). Prezentace. ČVUT.
- [7] MSI-Vikings Gage: ZEISS DuraMax Production CMM Machine [online]. USA, 2018 [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: <https://www.msi-viking.com/ZEISS-DuraMax-Production-CMM-Machine>
- [8] BOSCH, John A. Coordinate measuring machines and systems. New York: M. Dekker, 1995. ISBN 08-247-9581-4.
- [9] MSI-Vikings Gage: ZEISS ACCURA Bridge-Type CMM Machine [online]. USA, 2018 [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: <https://www.msi-viking.com/ZEISS-ACCURA-Bridge-Type-CMM-Machine>
- [10] V-Proud: LEITZ INFINITY- HEXAGON [online]. Vietnam, 2018 [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: <http://v-proud.vn/leitz-infinity-hexagon-1-1-633032.html>
- [11] Zeiss: ZEISS Large CMMs [online]. © Carl Zeiss [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/large-cmms.html>
- [12] ČSN EN ISO 10360-1 (252011): Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 1: Slovník. Praha: © Český normalizační institut, 2001.

- [13] BERÁNEK, Libor. Průmyslová metrologie: Využití počítačové tomografie pro přesné měření [online]. In: [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: [http://u12134.fsid.cvut.cz/podklady/PMTR/Vyuziti\\_pocitacove\\_tomografie\\_pro\\_presne\\_mereni.pdf](http://u12134.fsid.cvut.cz/podklady/PMTR/Vyuziti_pocitacove_tomografie_pro_presne_mereni.pdf)
- [14] CHRISTOPH, Ralf a Hans Joachim NEUMANN. Multisenzorová souřadnicová měřicí technika: měření rozměrů, tvarů, polohy a drsnosti - opticky, dotykově a rentgenovou tomografií. 4. přeprac. a rozš. vyd. Uherské Hradiště: PRIMA Bilavčák, 2008.
- [15] PROKOP, Martin. Co je laser tracker a jak se s ním měří?. TOPMES S.R.O. [online]. [cit.2018-02-3].Dostupné z: [http://www.topmes.cz/download/?filename=l7w9j1g4\\_files%2F09\\_co\\_je\\_laser\\_tracker.pdf&downloadName=Co+je+laser+tracker](http://www.topmes.cz/download/?filename=l7w9j1g4_files%2F09_co_je_laser_tracker.pdf&downloadName=Co+je+laser+tracker)
- [16] Topmes: Trackery [online]. Praha: Pro-idea.cz, 2016 [cit. 2018-02-03]. Dostupné z: <http://www.topmes.cz/technologie/trackery/prislusenstvi/105-smr-odrazec>
- [17] Faro: FARO LASER TRACKER [online]. [cit. 2018-02-03]. Dostupné z: <https://www.faro.com/products/factory-metrology/faro-laser-tracker/>
- [18] Nikonmetrology: Laser Radar [online]. Nikon Metrology NV, 2017 [cit. 2018-02-08]. Dostupné z: <https://www.nikonmetrology.com/en-gb/product/laser-radar-mv331-351>
- [19] KOHANBASH, David. LIDAR vs RADAR: A Detailed Comparison. [Http://robotsforroboticists.com](http://robotsforroboticists.com) [online]. ©robotsforroboticists.com, 2017, May 4, 2017 [cit. 2018-02-08]. Dostupné z: <http://robotsforroboticists.com/lidar-vs-radar/>
- [20] Carrlane: Construction Balls – Shoulder Type [online]. ST. LOUIS, 2018 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <https://www.carrlane.com/en-us/product/locators/construction-balls/construction-balls-shoulder-type>
- [21] Lightpointdata: Our Tools [online]. Lightpoint Scientific, 2015 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <http://lightpointdata.com/photogrammetry-tools/>
- [22] Rozendalassociates: Radar Reflectors [online]. USA: Rozendal Associates, 2015 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <http://www.rozendalassociates.com/radar-reflectors/>
- [23] Tech Corner: Nikon MV331 Laser Radar, live from IMTS 2016. In: [Www.qualitydigest.com](http://www.qualitydigest.com) [online]. Quality Digest, 20. 9. 2016 [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=fTVf3aTS8Zw&t=96s>
- [24] Nikonmetrology: Laser Radar MV331/351: Automated large volume inspection [online]. Japonsko: NIKON CORPORATION [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <https://www.nikonmetrology.com//images/brochures/laser-radar-general-en.pdf>

- [25] Nikonmetrology: Laser Radar for Inline inspection. In: [www.nikonmetrology.com](http://www.nikonmetrology.com) [online]. Nikon Metrology, 22. 3. 2017 [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=odIYMRyCFDo>
- [26] LASER RADAR NEXT: GENERATION SHOPFLOOR CMM [online]. Japonsko: NIKON CORPORATION [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <https://www.nikonmetrology.com//images/brochures/laser-radar-inline-inspection-en.pdf>
- [27] KIRACI, Ercihan, Pasquale FRANCIOSA, Glen A. TURLEY, Alan OLIFENT, Alex ATTRIDGE a Mark A. WILLIAMS. Moving towards in-line metrology: evaluation of a Laser Radar system for in-line dimensional inspection for automotive assembly systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2017, 91(1-4), 69-78 [cit. 2018-02-09]. DOI: 10.1007/s00170-016-9696-8. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-016-9696-8>
- [28] Nikonmetrology: Articulated arms [online]. ©Nikon Metrology NV, 2017 [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: <https://www.nikonmetrology.com/en-gb/product/mcax>
- [29] CRISOSTOMO, Chad. What Is a 3D Measurement Arm?: Flexibility and economy characterize these portable CMMs. In: *Quality Digest* [online]. Quality Circle Institute, 2013, 2.7.2013 [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: <https://www.qualitydigest.com/inside/metrology-article/what-3d-measurement-arm.html>
- [30] 3dcontrol: Leica Absolute Tracker AT 901-MR T-Probe T-Scan [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.3dcontrol.pl/cs/sprzet/>
- [31] Optotechnik.zeiss: 3D Skenování - COMET a T-SCAN [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://optotechnik.zeiss.com/cz/produkty/3d-skenovani>
- [32] NAVRÁTIL, Robert. Technologie skenování ve 3D [online]. Hořice [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://www.spsks.cz/wp-content/uploads/2016/03/Technologie-skenov%C3%A1n%C3%AD-ve-3D-0.pdf>. Střední průmyslová škola kamenická a sochařská.
- [33] Gom: ATOS - Industrial 3D Scanning Technology. [online]. Germany: Gom [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/atos.html>
- [34] GEORGE Q. HUANG .. (ED.). *Proceedings of the 6th CIRP sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology: new insights*. Berlin: Springer, 2010. ISBN 978-364-2104-299.
- [35] FIORENZO FRANCESCHINI .. *Distributed large-scale dimensional metrology: new insights*. Berlin: Springer, 2011. ISBN 978-085-7295-422.

- [36] Nikonmetrology: iGPS - Factory-wide measuring, positioning and tracking system [online]. ©Nikon Metrology NV, 2017 [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <https://www.nikonmetrology.com/en-gb/product/igps>
- [37] Bayerl Messtechnik: ScanMax. [online]. BMT Bayerl Messtechnik [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <https://www.bayerl-messtechnik.de/scanmax/>
- [38] Zcat: The world's first truly portable DCC Coordinate Measuring Machine [online]. USA: Fowler, 2015 [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <http://www.zcat.com/tech-specs.html>
- [39] ZEISS, Carl. ScanMax: The Intelligent Gage for the Workshop and Pre-production. In: [www.maschinen-kistner.de](http://www.maschinen-kistner.de) [online]. Německo: © Carl Zeiss [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: [http://www.maschinen-kistner.de/files/Produkte/Diverse%20Maschinen/Zeiss-ScanMax/PDF\\_englisch/ZEISS\\_ScanMax\\_.pdf](http://www.maschinen-kistner.de/files/Produkte/Diverse%20Maschinen/Zeiss-ScanMax/PDF_englisch/ZEISS_ScanMax_.pdf)
- [40] MSI-Vikings Gage: ZEISS METROTOM Industrial CT 3D X-Ray Measuring System [online]. USA: MSI-Vikings Gage, 2018 [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <https://www.msi-viking.com/ZEISS-METROTOM-Industrial-CT-3D-X-Ray-Measuring-System>
- [41] PARK, Jae-jun, Kihwan KWON a Nahmgyoo CHO. Development of a coordinate measuring machine (CMM) touch probe using a multi-axis force sensor. *Measurement Science and Technology*. 2006, 17(9), 2380-2386. DOI: 10.1088/0957-0233/17/9/002. ISSN 0957-0233. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/0957-0233/17/i=9/a=002?key=crossref.938c22bd4ca69481a95eeb73a44d6370>
- [42] FLACK, David. Good Practice Guide No. 43: CMM Probing [online]. 2. Hampton Road, Teddington, Middlesex, TW11 0LW: © Crown Copyright, 2014 [cit. 2018-02-25]. ISSN 1368-6550. Dostupné z: [publications.npl.co.uk/npl\\_web/pdf/mgpg43.pdf](http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/mgpg43.pdf)
- [43] TIŠNOVSKÝ, Pavel. Bezkontaktní digitalizace předmětů pomocí 3D scanneru Minolta Vivid VI-700: 2. Metody bezkontaktní digitalizace povrchů reálných předmětů. In: *Elektrorevue* [online]. 2003 [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: [http://www.elektrorevue.cz/clanky/03013/kap\\_2.htm](http://www.elektrorevue.cz/clanky/03013/kap_2.htm)
- [44] KALOVÁ, Ilona a Karel HORÁK. Optické metody měření 3D objektů. In: *Elektrorevue* [online]. 2005, 12.4.2005 [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html#kap4>
- [45] ŠIŇOR, Milan. Interference světla. In: <http://vega.fjfi.cvut.cz> [online]. 1998 [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: <http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/optika/node7.html>
- [46] Renishaw: Interferometry explained. [online]. © Renishaw [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/vysvetleni-interferometrie--7854>
- [47] PAVLÍČEK, Pavel. Vybrané optické problémy týkající se 3D senzorů [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012 [cit. 2018-03-14]. ISBN 978-80-244-3108-6.



- Dostupné z: [https://fyzika.upol.cz/system/files/slo/rcptm/texty/Pavlicek-Vybrane\\_opticke\\_problemy\\_3D\\_senzoru.pdf](https://fyzika.upol.cz/system/files/slo/rcptm/texty/Pavlicek-Vybrane_opticke_problemy_3D_senzoru.pdf)
- [48] O-INSPECT: The best of optical and contact measuring technology for true 3D measurements. [online]. Německo: Carl Zeiss Industrielle Messtechnik [cit. 2018-04-15]. EN\_60\_020\_153I. Dostupné z: <http://www.cortec.it/upload/content/12013788472304.pdf>
- [49] Průmyslové objektivy: Telecentrický objektiv - přednosti a charakteristiky. [online]. © Kinalisoft, 2017 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <http://www.prumysloveobjektivy.cz/pages/view/telecentricky-objektiv-prednosti-a-charakteristiky>
- [50] BIBEE, Jeff. Understanding Optical Measurement: All systems are not created equal. In: Quality digest [online]. Kalifornie, USA: Quality Circle Institute, 03/31/2009 [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <https://www.qualitydigest.com/magazine/2009/apr/article/understanding-optical-measurement.html#>
- [51] Spectral Instruments inc.: What Is A CCD? [online]. Tucson: Spectral Instruments [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: [http://www.specinst.com/What\\_Is\\_A\\_CCD.html](http://www.specinst.com/What_Is_A_CCD.html)
- [52] Yi-Chang James Tsai a Feng Li. Critical Assessment of Detecting Asphalt Pavement Cracks under Different Lighting and Low Intensity Contrast Conditions Using Emerging 3D Laser Technology. In: Ascelibrary [online]. American Society of Civil Engineers [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29TE.1943-5436.0000353>
- [53] Nikonmetrology: L100: The ultimate CMM scanner combining productivity and accuracy [online]. © Nikon Metrology NV, 2017 [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <https://www.nikonmetrology.com/en-gb/product/l100>
- [54] Nikonmetrology: XC65Dx-LS: The ultimate scanner for feature inspection and more... [online]. © Nikon Metrology NV, 2017 [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <https://www.nikonmetrology.com/en-gb/product/xc65dx-ls>
- [55] MACHÁČEK, Pavel Macháček. Problems of 3D Scanning and Scanned Data Processing [online]. [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf/MachacekPavel-307440.pdf>. ČVUT. Vedoucí práce Doc. Ing. Rudolf Dvořák, CSc.
- [56] Absolutegeometries: Laser Line Scanning Process [online]. AbsoluteGeometries.com, 2009 [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: [http://www.absolutegeometries.com/laser\\_line\\_scanning\\_process.html](http://www.absolutegeometries.com/laser_line_scanning_process.html)

- [57] SAMADI, Ali. Structured-light 3D scanner [online]. In: . [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: [https://www.academia.edu/1107159/Structured-light\\_3D\\_scanner\\_-\\_Samadi](https://www.academia.edu/1107159/Structured-light_3D_scanner_-_Samadi)
- [58] ZHANG, Song. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques [online]. In: . Elsevier, 2009, 16.4.2009 [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816609000529>
- [59] Redlux: Advanced Technology: Chromatic White Light [online]. RedLux [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: [https://www.redlux.net/advanced\\_metrology\\_technology](https://www.redlux.net/advanced_metrology_technology)
- [60] VAN DE VOORDE, Marcel Van de Voorde, Matthias WERNER a Hans JÖRG FECHT, ed. The Nano-Micro Interface: Bridging the Micro and Nano Worlds. 2. Německo: John Wiley, 2015. ISBN 978-3-527-33633-3.
- [61] INIEWSKI., Krzysztof, ed. Optical, acoustic, magnetic, and mechanical sensor technologies [online]. Hoboken: CRC Press, 2012 [cit. 2018-03-10]. ISBN 978-143-9869-789.
- [62] CARLOS JULIO CORTÉS RODRÍGUEZ. Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing [online]. Kassel: Kassel Univ. Press, 2009 [cit. 2018-03-10]. ISBN 978-389-9587-128.
- [63] VOJÁČEK, Antonín. Konfokální princip optického měření vzdáleností. In: Automatizace.hw.cz [online]. 29. Duben 2016 [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/konfokalni-princip-optickeho-mereni.html>
- [64] Micro-epsilon: Confocal sensor systems for displacement, distance, position and thickness [online]. Micro-Epsilon [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.com/displacement-position-sensors/confocal-sensor/>
- [65] Hexagonmi: Čidlo chromatického bílého světla (CWS) [online]. Hexagon AB [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <http://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/multisensor-and-optical-systems/sensors-for-optiv/chromatic-white-light-sensor-cws>
- [66] Renishaw: PH10 PLUS motoricky indexovatelné hlavice [online]. © Renishaw [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/ph10-plus-motoricky-indexovatelné-hlavice--6684>
- [67] Zeiss: LineScan [online]. Zeiss [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/senzory/linescan.html>
- [68] HFH Präzisionsmechanik GmbH: Qualitätssicherung [online]. Wurmansquick [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <https://www.hfh-gmbh.de/qs>
- [69] Multisensor Coordinate Measuring Machines: ZEISS O-INSPECT. MAC-CZ-X/2016 Uoo. Německo: © Carl Zeiss Industrielle Messtechnik, 2016. EN\_60\_020\_0002II.

- [70] ZEISS O-INSPECT: Specifications. CZ-XI/2017. Německo: © Carl Zeiss Industrielle Messtechnik, 2017. EN\_60\_022\_0343IX.
- [71] O-INSPECT 543: Operating Instructions. 2016-11-04. Německo: © Carl Zeiss Industrielle Messtechnik, 2016. ISBN 61211-1280402.
- [72] Directindustry: BRIDGE COORDINATE MEASURING MACHINE / MULTI-SENSOR / HIGH-PRECISION [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/carl-zeiss-industrielle-messtechnik-gmbh/product-5693-52338.html>
- [73] RefractiveIndex.INFO: Refractive index database [online]. [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: <https://refractiveindex.info/?shelf=3d&book=glass&page=soda-lime-clear>

## Seznam obrázků:

Obrázek 1: Souřadný systém stroje a lokální souřadný systém objektu [1] .....	10
Obrázek 2: Souřadné systémy používané CMM: a) kartézský, b) sférický, c) cylindrický [3].....	11
Obrázek 3: Ilustrační obrázek kartézsky uspořádaného CMM [4] .....	12
Obrázek 4: Aplikace stojanového CMM pro měření karoserie automobilu [1]. .....	13
Obrázek 5: Výložníkový typ CMM - Carl Zeiss Duramax [7] .....	14
Obrázek 6: Mostový typ CMM - vlevo s pohyblivým mostem (Carl Zeiss Acura), vpravo s pevným mostem (Hexagon Leitz Infinity) [9] [10] .....	15
Obrázek 7: Portálový typ CMM - Carl Zeiss MMZ E [11] .....	16
Obrázek 8: Schéma tomografu [4] .....	17
Obrázek 9: Zvětšení dílu dle polohy a) nízké zvětšení b) vysoké zvětšení [13] .....	18
Obrázek 10: Schéma Laser Trackeru (vlevo) a ukázka SMR sond (vpravo) [1] [16] .....	19
Obrázek 11: Ukázka laser radaru - Nikon MV351 [18].....	21
Obrázek 12: Referenční objekty: a) záměrná koule [20] b) záměrný terč [21] c) trojboký odražeč [22] .....	22
Obrázek 13: InLine inspekce karoserie automobilu [25] .....	23
Obrázek 14: Měřicí rameno Nikon MCAx [28] .....	24
Obrázek 15: Trackované scannery: a) trackovaný scanner od společnosti Hexagon [30] b) trackovaný scanner od společnosti Zeiss [31].....	26
Obrázek 16: a) optický scanner Gom Atos Core b) scannovací box Gom Atos ATOS ScanBox Series 6 [33].....	27
Obrázek 17: Laserový vysílač iGPS systému [34].....	28
Obrázek 18: Měřené úhly mezi vysílačem a senzorem [35] .....	28
Obrázek 19: CMM s cylindrickým souřadným systémem: a) Zeiss ScanMax [37] b) zCat [38] ...	29
Obrázek 20: Možnosti automatizace souřadnicových měřicích strojů [9] [17] [18] [28] [31] [33] [36] [38] [37] [60].....	31
Obrázek 21: Schématické rozdělení snímacích systémů.....	32
Obrázek 22: Snímání bodu kontaktním snímacím systémem.....	33
Obrázek 23: Spínací kontaktní senzory: a) spínání mechanicky (kinematická sonda) b) spínání pomocí převodníků [14] .....	34

Obrázek 24: Skenovací snímání systém Zeiss [42] .....	35
Obrázek 25: Aktivní triangulace [44].....	37
Obrázek 26: Schéma interferometru [46].....	39
Obrázek 27: Obrazy z objektivů a) netelecentrického b) telecentrického [48] .....	40
Obrázek 28: Obrazy demonstrující objektiv a) netelecentrický b) telecentrický.....	41
Obrázek 29: Schéma nasvícení: a) nasvícení procházejícím světlem b) koaxiální nasvícení c) nasvícení kruhovým světlem [14] .....	41
Obrázek 30: Zpracování obrysového obrazu [14] .....	43
Obrázek 31: Schéma laser scanneru [52].....	44
Obrázek 32: Laser scanner Nikon L100 [53].....	44
Obrázek 33: Cross scanner Nikon XC65Dx-LS [54] .....	45
Obrázek 34: Skenování otvoru laser scannerem a cross scannerem [54] .....	45
Obrázek 35: Schéma pruhové projekce [58].....	47
Obrázek 36: Schéma chromatického senzoru bílého světla [59] .....	48
Obrázek 37: Rozklad bílého světla na jednotlivé vlnové délky [64] .....	48
Obrázek 38: Ukázka indexovatelných hlav: a) s kontaktním snímačem [66] b) s bezkontaktním snímačem (laser scannerem) [67].....	50
Obrázek 39: Zeiss O-Inspect 543 [68].....	51
Obrázek 40: Zeiss Prismo [72] .....	56
Obrázek 41: Koncová měřka .....	57
Obrázek 42: Strategie pro snímání měřené plochy.....	58
Obrázek 43: Rovinnost lapované plochy měřené na CMM Zeiss Prismo a) naměřené body b) po aplikaci filtru c) po aplikaci filtru a eliminaci odlehlých hodnot .....	59
Obrázek 44: Okno pro nastavení parametrů CWS .....	60
Obrázek 45: Okno pro nastavení parametrů CWS při nastavení a) .....	62
Obrázek 46: Okno pro nastavení parametrů CWS při nastavení d) .....	64
Obrázek 47: Okno pro nastavení parametrů CWS při nastavení e) .....	64
Obrázek 48: Rovinnost broušené plochy měřené na CMM Zeiss Prismo a) naměřené body b) po aplikaci filtru 0,25 a eliminaci odlehlých hodnot c) po aplikaci filtru 0,8 a eliminaci odlehlých hodnot.....	79
Obrázek 49: Okno pro nastavení parametrů CWS při nastavení f) .....	82
Obrázek 50: Okno pro nastavení parametrů CWS při přednastavení Broušená ocel .....	82
Obrázek 51: Rovinnost ploch vybraných na různých místech broušeného povrchu .....	85
Obrázek 52: Mikroskopický snímek broušeného povrchu .....	87
Obrázek 53: Optická čočka.....	99
Obrázek 54: Měření čočky v měřicím softwaru .....	100
Obrázek 55: Měření bodu na horní ploše a) ve středu měřicího rozsahu b) na horní hranici měřicího rozsahu c) na dolní hranici měřicího rozsahu .....	101
Obrázek 56: Měření bodu na spodní rovině .....	101
Obrázek 57: Měřený skleněný materiál .....	102
Obrázek 58: Hodinky .....	104

## Seznam tabulek:

Tabulka 1 Specifikace kontaktního systému Vast XXT TL3 [70] .....	52
Tabulka 2: Specifikace kamerového systému Discovery V12 [70] .....	53
Tabulka 3 Přednastavené hladiny zvětšení kamerového systému .....	54
Tabulka 4: Specifikace chromatického senzoru bílého světla [70] .....	54
Tabulka 5: Doporučené hodnoty parametrů pro jednotlivé typy materiálů .....	55
Tabulka 6 Specifikace kontaktního systému Vast gold .....	56
Tabulka 7: Drsnost lapované plochy .....	58
Tabulka 8: Hodnoty rovinností lapované plochy naměřené na Zeiss Prismo .....	60
Tabulka 9: Hodnoty parametrů CWS pro jednotlivá nastavení u lapované plochy .....	61
Tabulka 10: Ukázky rovinností lapované plochy při jednotlivých nastaveních .....	65
Tabulka 11: Hodnoty rovinností lapované plochy při jednotlivých nastaveních .....	66
Tabulka 12: Hodnoty rovinností lapované plochy při jednotlivých rychlostech při nastavení a) .....	67
Tabulka 13: Hodnoty rovinností lapované plochy při jednotlivých rychlostech při nastavení c) .....	68
Tabulka 14: Ukázky extrahovaných bodů z lapované plochy při jednotlivých rychlostech .....	69
Tabulka 15: Ukázky rovinností při jednotlivých úhlových polohách lapované plochy .....	72
Tabulka 16: Hodnoty rovinností při jednotlivých úhlových naklonech lapované plochy .....	74
Tabulka 17: Přenastavené parametry CWS při vyšších úhlových naklonech lapované plochy .....	76
Tabulka 18: Hodnoty rovinností po přenastavení CWS při vyšších úhlových naklonech lapované plochy .....	77
Tabulka 19: Drsnost broušené plochy .....	78
Tabulka 20: Hodnoty rovinností broušené plochy naměřené na Zeiss Prismo .....	80
Tabulka 21: Hodnoty parametrů CWS pro jednotlivá nastavení u broušené plochy .....	80
Tabulka 22: Ukázky rovinností broušené plochy při jednotlivých nastaveních .....	84
Tabulka 23: Hodnoty rovinností broušené plochy při jednotlivých nastaveních .....	84
Tabulka 24: Hodnoty rovinností broušené plochy při jednotlivých rychlostech při nastavení c) .....	63
Tabulka 25: Hodnoty rovinností broušené plochy při jednotlivých rychlostech při nastavení f) .....	64
Tabulka 26: Ukázky extrahovaných bodů z broušené plochy při jednotlivých rychlostech .....	90
Tabulka 27: Ukázky rovinností při jednotlivých úhlových polohách broušené plochy .....	93
Tabulka 28: Hodnoty rovinností při jednotlivých úhlových naklonech broušené plochy .....	95
Tabulka 29: Přenastavené parametry CWS při vyšších úhlových naklonech broušené plochy .....	97
Tabulka 30: Hodnoty rovinností po přenastavení CWS při vyšších úhlových naklonech broušené plochy .....	98
Tabulka 31: Hodnoty tloušťky skla měřené více způsoby .....	103
Tabulka 32: Hodnoty tloušťky hodinkového skla .....	104

## **Seznam grafů:**

Graf 1: Průměrný počet extrahovaných bodů z lapované plochy v závislosti na rychlosti .....	69
Graf 2: Průměrná hodnota rovinnosti lapované plochy v závislosti na rychlosti včetně směrodatných odchylek .....	70
Graf 3: Průměrný počet extrahovaných bodů při jednotlivých naklonech lapované plochy...	74
Graf 4: Průměrná hodnota rovinnosti v závislosti na naklonění lapované plochy .....	75
Graf 5: Průměrná hodnota rovinnosti v závislosti na naklonění lapované plochy po přenastavení parametrů CWS .....	77
Graf 6: Průměrný počet extrahovaných bodů z broušené plochy v závislosti na rychlosti .....	90
Graf 7: Průměrná hodnota rovinnosti broušené plochy v závislosti na rychlosti včetně směrodatných odchylek .....	91
Graf 8: Průměrný počet extrahovaných bodů při jednotlivých naklonech broušené plochy ..	95
Graf 9: Průměrná hodnota rovinnosti v závislosti na naklonění broušené plochy .....	96
Graf 10: Průměrná hodnota rovinnosti v závislosti na naklonění broušené plochy po přenastavení parametrů CWS .....	98


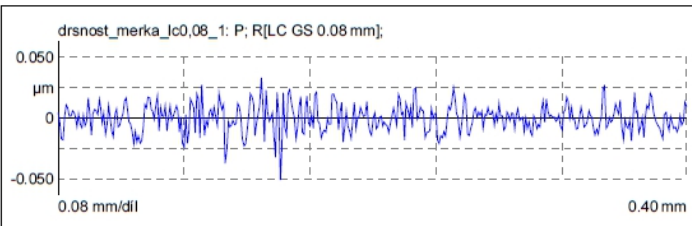
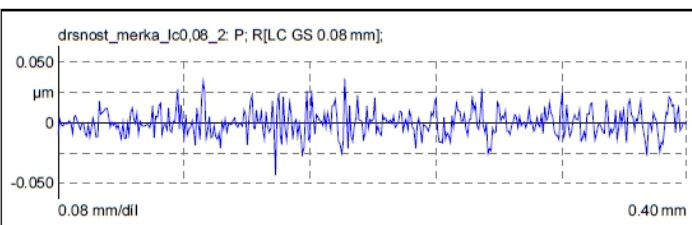
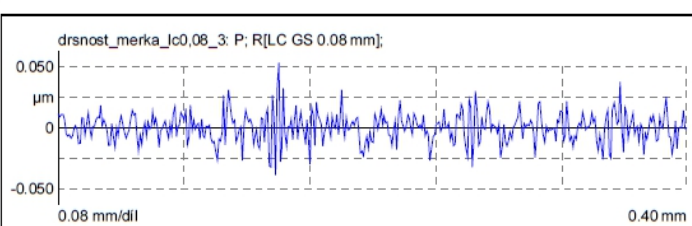
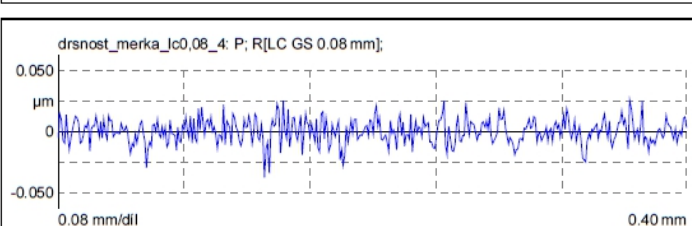
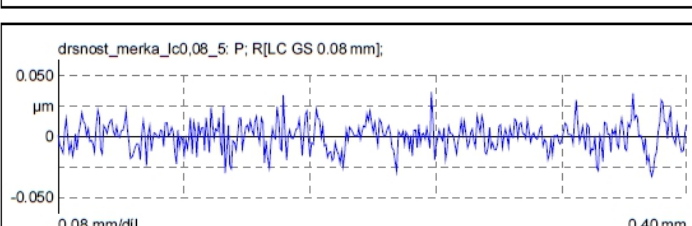
## **Seznam příloh:**

Příloha 1 – Naměřené hodnoty drsnosti lapované plochy


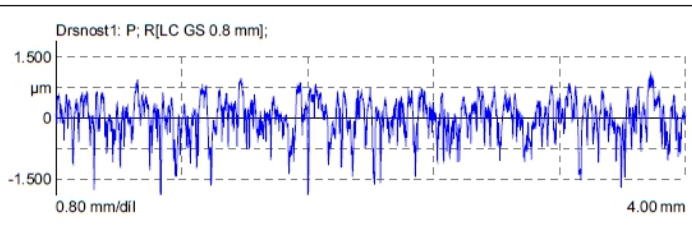
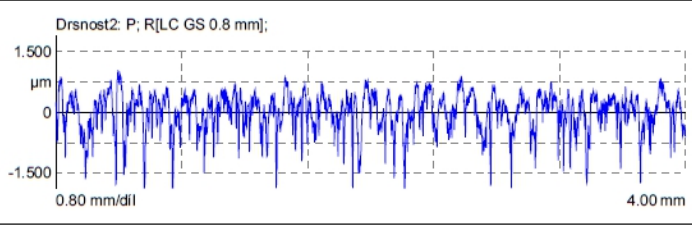
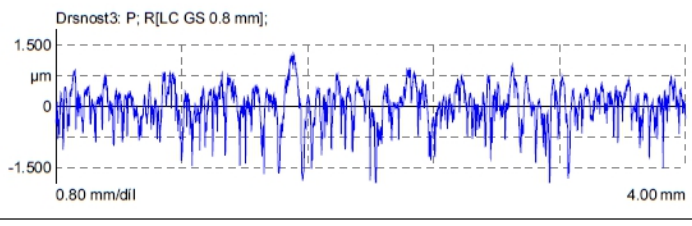
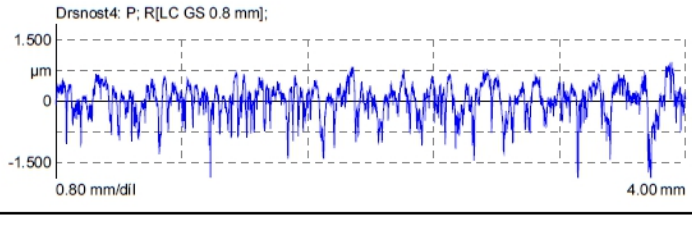
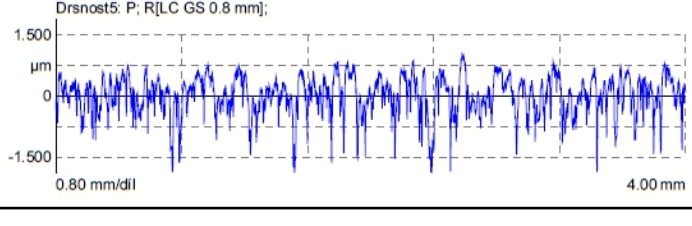
Příloha 2 – Naměřené hodnoty drsnosti broušené plochy

# Přílohy:

## Příloha 1 – Naměřené hodnoty drsnosti lapované plochy

		<b>MarWin</b> 8.00-24 SP 2	<b>ČVUT Praha,</b> Fakulta strojní	<b>16.7.2018</b> <b>1</b> 11:37:28 Kontrolor: <b>Kotrč Jiří</b> Podpis:						
Díl: <b>Měrka - Lapovaná plocha</b>		Číslo výkresu:	Krok obrábění: <b>Lapování</b>							
Komentář: <b>1</b>										
Měřicí přístroj: <b>MarTalk</b> Posuvová jednotka: <b>DriveUnit.PGK 20</b> Snímač: <b>MFW-250:2 (#1854) -1.8 %</b>		Lt: <b>0.56 mm</b> Ls: <b>2.50 μm</b> VB: <b>+/-250.0 μm</b> Vt: <b>0.50 mm/s</b> Body: <b>560</b>								
		<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>0,0088 μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>0,0517 μm</td></tr> <tr><td>R Sm</td><td>-,----</td></tr> </table>			Ra	0,0088 μm	Rz	0,0517 μm	R Sm	-,----
Ra	0,0088 μm									
Rz	0,0517 μm									
R Sm	-,----									
		<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>0,0083 μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>0,0571 μm</td></tr> <tr><td>R Sm</td><td>-,----</td></tr> </table>			Ra	0,0083 μm	Rz	0,0571 μm	R Sm	-,----
Ra	0,0083 μm									
Rz	0,0571 μm									
R Sm	-,----									
		<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>0,0091 μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>0,0634 μm</td></tr> <tr><td>R Sm</td><td>-,----</td></tr> </table>			Ra	0,0091 μm	Rz	0,0634 μm	R Sm	-,----
Ra	0,0091 μm									
Rz	0,0634 μm									
R Sm	-,----									
		<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>0,0079 μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>0,0501 μm</td></tr> <tr><td>R Sm</td><td>-,----</td></tr> </table>			Ra	0,0079 μm	Rz	0,0501 μm	R Sm	-,----
Ra	0,0079 μm									
Rz	0,0501 μm									
R Sm	-,----									
		<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>0,0090 μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>0,0557 μm</td></tr> <tr><td>R Sm</td><td>-,----</td></tr> </table>			Ra	0,0090 μm	Rz	0,0557 μm	R Sm	-,----
Ra	0,0090 μm									
Rz	0,0557 μm									
R Sm	-,----									

Příloha 2 – Naměřené hodnoty drsnosti broušené plochy

	<b>MarWin</b> 8.00-24 SP 2	<b>ČVUT Praha,</b> Fakulta strojní	<b>16.7.2018</b> 1 11:50:29 Kontrolor: <b>Kotrč Jiří</b> Podpis:						
	Díl: <b>Měrka - Broušená plocha</b>		Číslo výkresu: _____    Krok obrábění: <b>Broušení</b>						
Komentář: <b>1</b>									
Měřicí přístroj: <b>MarTalk</b> Posuvová jednotka: <b>DriveUnit.PGK 20</b> Snímač: <b>MFW-250:2 (#1854) -1.8 %</b>		Lt: <b>5.60 mm</b> Ls: <b>2.50 μm</b> VB: <b>+/-250.0 μm</b> Vt: <b>0.50 mm/s</b> Body: <b>5600</b>							
Drsnost1: P; R[LC GS 0.8 mm]; 		<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>0,3705 μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>2,6840 μm</td></tr> <tr><td>R Sm</td><td>49,6709 μm</td></tr> </table>		Ra	0,3705 μm	Rz	2,6840 μm	R Sm	49,6709 μm
Ra	0,3705 μm								
Rz	2,6840 μm								
R Sm	49,6709 μm								
Drsnost2: P; R[LC GS 0.8 mm]; 		<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>0,3771 μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>2,8822 μm</td></tr> <tr><td>R Sm</td><td>53,0405 μm</td></tr> </table>		Ra	0,3771 μm	Rz	2,8822 μm	R Sm	53,0405 μm
Ra	0,3771 μm								
Rz	2,8822 μm								
R Sm	53,0405 μm								
Drsnost3: P; R[LC GS 0.8 mm]; 		<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>0,3729 μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>2,8873 μm</td></tr> <tr><td>R Sm</td><td>53,1892 μm</td></tr> </table>		Ra	0,3729 μm	Rz	2,8873 μm	R Sm	53,1892 μm
Ra	0,3729 μm								
Rz	2,8873 μm								
R Sm	53,1892 μm								
Drsnost4: P; R[LC GS 0.8 mm]; 		<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>0,3159 μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>2,4476 μm</td></tr> <tr><td>R Sm</td><td>60,2769 μm</td></tr> </table>		Ra	0,3159 μm	Rz	2,4476 μm	R Sm	60,2769 μm
Ra	0,3159 μm								
Rz	2,4476 μm								
R Sm	60,2769 μm								
Drsnost5: P; R[LC GS 0.8 mm]; 		<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>0,3737 μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>2,7932 μm</td></tr> <tr><td>R Sm</td><td>55,9859 μm</td></tr> </table>		Ra	0,3737 μm	Rz	2,7932 μm	R Sm	55,9859 μm
Ra	0,3737 μm								
Rz	2,7932 μm								
R Sm	55,9859 μm								