

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2020

**PETR
LINDUŠKA**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav přístrojové a řídicí techniky

Použití a modifikace triangulačního senzoru

Use and modification of triangulation displacement probe

Diplomová práce

Studijní program: Kombinované studium

Studijní obor: Optomechanika

Autor práce: Bc. Petr Linduška

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Hošek Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Linduška** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **345848**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Přístrojová a řídicí technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Použití a modifikace triangulačního senzoru vzdálenosti

Název diplomové práce anglicky:

Use and modification of triangulation distance sensor

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši principu, realizace a použití triangulačního senzoru vzdálenosti.
- 2) Proveďte rešerši možnosti bezkontaktního měření vnitřních stěn otvorů.
- 3) Dle zadání proveďte konstrukci nástavce, který umožní měření vnitřních stěn otvorů pomocí standardního triangulačního senzoru vzdálenosti.
- 4) Proveďte analýzu chyb, ovlivňující přístrojovou funkci.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kamarád J., Sládek, Z.: Základy přesné mechaniky I, ČVUT, 1987.
- [2] Emmanuel Rosencher, Borge Vinter, Optoelectronics, Cambridge University Press, 2002
- [3] Jorg Haus, Optical Sensors: Basics and Applications, John Wiley & Sons, Inc., 2010.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

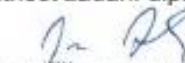
doc. Ing. Jan Hošek, Ph.D., odbor přesné mechaniky FS

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

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **07.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce: _____



doc. Ing. Jan Hošek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



podpis vedoucí(ho) konzultanta(ky)


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.


Datum převzetí zadání


Podpis studenta

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem, *Použití a modifikace triangulačního senzoru vzdálenosti*, vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci.

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

V Praze dne 20.08.2020



.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji především vedoucímu diplomové práce panu doktoru doc. Ing. Jan Hošek Ph.D. za cenné rady, konzultace, připomínky a odborné vedení během zpracovávání požadované úlohy. Dále bych velmi rád poděkoval mým kolegům Dott. Geiland Porrovecchio, Ing. Břetislavu Osmíkovi, kteří se vždy velice rádi a ochotně podělili o jejich cenné rady v oblasti analýz dat v softwarovém prostředí MATLAB. Velký dík patří mému přímému vedoucímu Dr. Ing. Marku Šmídovi a panu řediteli ČMI LPM Praha Ing. Michalu Bartošovi za jejich vstřícnost a podporu během celého studia. Závěrem bych rád poděkoval mé přítelkyni, rodině, kolegům a přátelům za jejich trpělivost a morální podporu.

Název diplomové práce:

Použití a modifikace triangulačního senzoru vzdálenosti.

Abstrakt:

Tato práce se zabývá návrhem modifikace triangulačního laserového snímače vzdálenosti (TLSV), zajišťující schopnost bezdotykově charakterizovat vnitřní rozměry válcových děr. Úvodní část práce obsahuje širší rešerši metod týkajících se bezdotykového měření v oblasti průmyslové metrologie. Z nalezených a analyzovaných metod jsou detailněji popsány metody využívající k měření triangulaci.

Navržená konstrukce vychází z řešení obsaženém v patentové přihlášce PV2019-412. Hlavní část práce popisuje návrh a realizaci konstrukčních prvků zajišťujících správnou funkci a polohu osvětlovacího laserového svazku a detekčního obrazového svazku a dále polohování snímače do optimální pracovní pozice. Prototyp modifikovaného snímače a jeho vlastnosti jsou popsány v experimentální části této práce. Z analýzy experimentálních dat, bylo možné definovat měřicí rozsahy a linearitu modifikovaného snímače.

Cílem této práce bylo navrhnout takové zařízení, které svou mobilitou, spolehlivostí a rychlou zpětnou vazbou bude v průmyslu alternativou ke komplexním nepřenosným měřicí zařízením.

Klíčová slova:

Optický triangulační snímač, triangulace, vnitřní průměr díry, osvětlovací svazek, zobrazovací svazek, zrcadlicí plocha, referenční poloha snímače.

Master's Thesis title:

Use and modification of triangulation distance sensor.

Abstract:

This Master's Thesis deals with the development and design of the triangulation laser displacement sensor (LDS) modification aiming to allow a non-contact measurement of inner dimensions of cylindrical holes. The initial part of the thesis is focused on general summary of existing methods of non-contact displacement measurement currently used in the field of metrology of physical dimensions. In following chapter, the particular attention is paid to the triangulation-based displacement measurements methods. The presented design is based on the construction covered by the patent application nr. PV2019-4.

The core task of this Thesis describes design and realisation of the mechanical adjustable components providing the deflection of the laser beam and its optimal positioning to the working position. The experimental part of this work describes the parameters of the modified LDS design prototype and presents all results of provided experimental works. The analysis of measurement data was performed with particular emphasis on establishment of the measurement range and linearity of response of the modified device.

The aim of this thesis was to design, built and validate the compact and portable device with sufficient accuracy and measurement bandwidth, that will be able to replace complex non-portable measuring machines in the general industry.

Key words:

Triangulation, Optical laser triangulation, inner diameter, illumination laser beam, imaging laser beam, mirror surface, reference position of the LDS.

Seznam zkratk

TLSV	Triangulační laserový snímač vzdálenosti
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
PSD	Position Sensitive Detector
AC	Aperturní clona
AMR	Aktivní měřicí rozsah
MR	Měřicí rozsah
SMR	Začátek měřicího rozsahu
EMR	Konec měřicího rozsahu
CT	Počítačová tomografie
CNC	Computer Numerical Control
ISO	International Organization for Standardization
FP	Fringe Projection
CAD	Computer-aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
FEM	Finite element method
LSM	Least Squares Method
KM100	Kinematic Mirror Mount for Ø1" Optics
EMD	Electrical discharge machining

Seznam symbolů

a	Poloha stínítka od osy osvětlovacího svazku	[mm]
$a_{(i)y}, a_{(m)y}$	Horizontální poloha stínítka v zorném poli AC	[mm]
b	Báze, spojnice mezi světelným zdrojem a detektorem	[mm]
C	Kapacitance	[F]
C_s	Standardní kapacitance	[Ω]
d	Chyba	[mm]
e	Vzdálenost středu AC od laserového svazku	[mm]
Θ	Triangulační úhel	[$^\circ$]
α	Úhel mezi osvětlovacím a zobrazovacím svazkem	[$^\circ$]
α_0	Úhel mezi osvětlovacím a zobrazovacím svazkem v ref. poloze snímače	[$^\circ$]
β	Úhel mezi CCD detektorem a optickou osou snímače	[$^\circ$]
ε	Permitivita	[F/m]
σ	Směrodatná odchylka	[mm]
γ	Úhel mezi rovinou zrcátka a osou laserového svazku	[$^\circ$]
ω	Úhel mezi dopadajícím a odraženým svazkem	[$^\circ$]
$(+)f'$	Vzdálenost ohniska v obrazové rovině	[mm]
$(-)f$	Vzdálenost ohniska v předmětové rovině	[mm]
h	Výška, poloha planžety	[mm]
o	Optická osa	[-]
o_f	Offsetová poloha snímače	[mm]
L	Vzdálenost od povrchu měřeného objektu ke středu AC	[mm]
l	Vzdálenost od středu AC k ploše detektoru	[mm]
$(+)p$	Obrazová vzdálenost	[mm]
$(-)p$	Předmětová vzdálenost	[mm]
r	Poloměr	[mm]
r_p	Referenční poloha snímače	[mm]
S_d	Vzdálenost zdroje od detektoru	[mm]
S_p	Vzdálenost zdroje od objektu	[mm]
S	Plocha	[mm ²]
t	Doba záznamu dat	[s]
v	Šířka planžety	[mm]
U	Napětí	[V]
U_A	Nejistota opakování měření	[%]
U_C	Celková nejistota měření	[%]
w	Velikost CCD detektoru	[mm]
Δx	Změna polohy ve vertikálním směru	[mm]
$\Delta x'$	Změna polohy spotu na čelní ploše CCD	[mm]
x, y, z	Souřadnice kartézského systému	[-]
x_0, y_0, z_0	Počáteční poloha	[mm]
X, Y, Z	Osy kartézského souřadnicového systému	[-]
$X_{(index)}$	Horizontální poloha hrany stínítka	[mm]
x_{si}	Udávaná hodnota snímačem	[mm]
y_{pmi}	Poloha maxima signálu na diodovém poli CCD	[px]

Obsah

1	Úvod.....	12
2	Teoretické základy práce.....	13
2.1	Principy triangulační metody, realizace a použití triangulačního senzoru vzdálenosti.....	13
2.2	Metody aktivní triangulace.....	13
2.2.1	Aktivní 1D triangulace	13
2.2.2	Aktivní 2D triangulace	16
2.2.3	Aktivní 3D triangulace	19
2.3	Metody pasivní triangulace	22
2.4	Princip triangulace snímačů vzdálenosti a polohy	24
3	Možnosti bezkontaktního měření vnitřních stěn otvorů	27
3.1	Počítačová Tomografie (Computed Tomography).....	27
3.2	Optické 3D skenery	33
3.3	Měřicí mikroskopy a projektory	37
3.3.1	Senzory pro souřadnicové měřicí stroje	40
3.3.2	Snímání obrazu.....	40
3.3.3	Zpracování obrazu.....	41
3.4	Kapacitní snímače.....	42
3.4.1	Princip standardního kapacitního snímače.....	42
3.4.2	Princip kapacitního snímače pro měření vnitřních rozměrů.....	43
3.4.3	Aplikace snímače.....	44
3.5	Triangulační laserové sondy	46
3.5.1	Princip měření.....	46
4	Popis snímače	48
4.1	Funkční princip a technické údaje snímače.....	49
5	Analýza vlastností snímače	51
5.1	Stanovení nejistoty měření snímače	54
5.1.1	Mezní poloha stínítka od osy osvětlovacího svazku.....	56
5.1.2	Mezní poloha stínítka v zorném poli optiky snímače.....	57
5.1.3	Krajní oblasti volného prostoru snímače.....	58
5.2	Analýza snímače při změně vertikální polohy	60
5.3	Aplikace naměřených dat na modelový tvar snímače	62
5.3.1	Porovnání modelu s naměřenými hodnotami	65
6	Konstrukce nástavce a modifikace snímače.....	67
6.1	Tolerance úhlu roviny zrcátka.....	68

6.2	Konstrukce k uchycení nástavce a snímače	70
7	Koncepční záměr modifikovaného snímače	72
7.1	Optomechanický stůl	72
7.2	Pouzdro snímače	74
8	Experiment s modifikovaným snímačem	75
8.1	Nastavení počáteční polohy snímače	76
8.2	Pracovní poloha osvětlovacího laseru	77
8.3	Měření snímačem ve směru osy – X	78
8.4	Vyhodnocení dat	81
8.5	Měření snímačem ve směru osy – Z	84
8.5.1	Vyhodnocení dat	84
8.5.2	Krajní polohy v geometrii snímače	89
9	Vyhodnocení výsledků	91
10	Závěr	93
	Seznam použité literatury	94
	Seznam obrázků	97
	Seznam tabulek	101
	Přílohy	102

1 Úvod

Ve strojírenské metrologii je běžným požadavkem měření vnitřních stěn otvorů nebo předvrtaných děr, kde se měří jejich průměr. Existuje celá řada způsobů kontroly kvality průměrů otvorů, které dosahují různých přesností naměřených hodnot. Výsledná nejistota měření závisí nejen na metrologickém vybavení, ale i na dalších složkách jako jsou např. teplota okolí, čistota povrchu, materiál výrobku, zkušenosti uživatele a další.

Dodnes je nejpoužívanější metodou pro kontrolu kvality vnitřních průměrů dotykové měření. Mezi konvenčními měřidly to je posuvné měřítko s měřením ve dvou bodech nebo dutinoměr, kterým lze měřit ve třech bodech na vnitřní ploše válcové díry, případně dílenské kalibry. V praxi se ovšem setkáváme s požadavky na měření geometricky složitějších tvarů otvorů. U složitějších tvarů otvoru je žádoucí získat více informací o geometrii, a je zapotřebí měřit ve více bodech vnitřního povrchu. V těchto případech se velmi často používají souřadnicové měřicí stroje, které jsou vybaveny dotykovými, optickými nebo multi-senzorovými snímacími systémy.

Přesnost měření u dotykových snímacích systému souřadnicových měřicích strojů je ovlivněna nejen residuálními chybami stroje, ale také možnou deformací povrchu vlivem kontaktu stroje s měřeným objektem. Zejména v případě měkkých např. plastových výrobků. Tato deformace, je způsobená přitlačnou silou, která vzniká mezi kontaktní kuličkou a povrchem. Na základě těchto zjištěných omezení, je záměrem nalézt vhodnou bezkontaktní metodu, umožňující skenovat vnitřní stěny otvorů bez možného vlivu deformace.

Záměrem práce je zvolit takovou bezkontaktní metodu, díky které bude možné provádět měření vnitřních rozměrů stěn u malých otvorů od 2 až do 5 mm. V této práci jsou podrobně probrány principy laserové triangulace, počítačová tomografie, měřicích mikroskopů, kapacitní metody a optického 3D skenování.

Cílem této diplomové práce, je konstrukce nástavce, který umožní měření vnitřních stěn otvorů pomocí triangulačního snímače pro měření vzdálenosti polohy. Navržená konstrukce vychází z řešení obsažené v patentové přihlášce PV 2019-412. Zařízení bude navrženo tak, aby bylo možné měřit malé otvory v rámci aktivního měřicího rozsahu laserového snímače.

2 Teoretické základy práce

2.1 Principy triangulační metody, realizace a použití triangulačního senzoru vzdálenosti.

Metoda optického měření je založena na principech triangulace, která vychází z trigonometrie a elementární geometrie k definování souřadnic a vzdáleností. Z toho je zjevné, že se jedná o měření bezkontaktní. Hledaným bodem bývá většinou souřadnice vrcholu trojúhelníku. Triangulační technika se používala především v oblasti fyzického měření. Tato metoda, byla již dávno použita řeckým matematikem Thalétem z Milétu, datováno kolem roku 600 př. n. l. při měření výšky pyramid v Gíze, k určování vzdálenosti od břehu k lodi, která plula na moři a také k určování polohy hvězd [1].

V současnosti je triangulace hojně používanou technikou, která se používá při optickém nebo opto-elektronickém měření. Triangulačních metod je celá řada, ale všechny jsou založeny na stejném principu. Ve strojním průmyslu klasifikujeme obvykle dva principy, a to *aktivní triangulace* a *pasivní triangulace*. V obou případech se jedná o odlišné druhy digitální fotogrammetrie, tzn. získat metrologické údaje pomocí fotografií, respektive obrazových snímků [2].

2.2 Metody aktivní triangulace

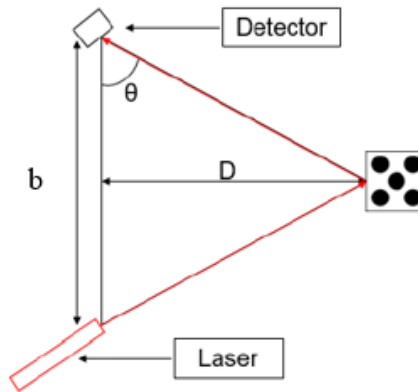
Triangulační metoda měření vzdálenosti spočívá ve výpočtu úhlu dopadu světla vyzářeného zdrojem na detektor. Aktivní triangulace tedy vychází z následujícího geometrického uspořádání, a to obvykle z laserového zdroje světla, snímače a světelným spotem, které takto tvoří trojúhelník (Obrázek 1) [3]. Metoda vychází z fotogrammetrické rekonstrukce snímaného objektu nasvícením jeho povrchu světelným zdrojem a souběžným snímáním. Princip, je dále rozdělen dle typu stopy světelného svazku, dopadajícího na povrch snímaného objektu. V případě světelného spotu (bodu) se jedná o princip 1D měření, je-li stopou linie tak 2D plošné skenování a v případě strukturovaného světla se jedná o 3D skenování.

2.2.1 Aktivní 1D triangulace

Tato technika se používá při měření vzdálenosti a polohy objektu za pomoci výpočtu úhlu. Světelný zdroj (laserová dioda) generuje paprsek, který je dále přes výstupní optiku fokusován a namířen na povrch měřeného objektu. Rozptýlené záření světelné stopy je zobrazeno přes zobrazovací optiku na plochu foto-elektricky citlivého lineárního CCD (*Charge-Coupled Device*) detektoru. Signalizační a stabilizační elektronika pro úpravu signálu jdoucího z laseru detekuje bodovou polohu na detektoru a po linearizaci a další digitální nebo analogové úpravě signálu poskytuje výstupní signál, který je úměrný cílové poloze objektu. Proto je detektor nejdůležitějším a zároveň taky nejkritičtějším prvkem v tomto optickém uspořádání. Detektory u těchto zařízení bývají většinou lineární. Nejčastěji se používají senzory buď to CCD, CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) nebo provedení PSD (*Position Sensitive Detector*). V závislosti na vzdálenosti povrchu

měřeného objektu a ze změny polohy světelného bodu na detektoru se vypočítá skutečná vzdálenost od měřeného objektu.

Triangulační trojúhelník je tvořen spojnicemi zdroje světla, snímače a světelným spotem na měřeném předmětu. Spojnice mezi snímačem a světelným zdrojem se nazývá triangulační báze b a konstantní úhel θ je tzv. triangulační úhel (Obrázek 1) [1].



Obrázek 1: Triangulační trojúhelník a difúzní odraz od povrchu měřeného objektu [1].

V dnešní době je metoda triangulace mezi výrobci snímačů stále oblíbenější. Nejběžnější aplikace tohoto principu jsou bezpochyby laserové triangulační snímače vzdáleností. Náklady na výrobu takových snímačů totiž poklesly do té míry, že se pomalu začínají blížit cenám kvalitních difuzních optických snímačů, přičemž poskytují nesrovnatelně lepší detekční schopnosti, hlavně z hlediska spolehlivosti. Výrobci těchto snímačů je na trhu celá řada. Laserové snímače se prakticky konstrukčně od sebe nijak zvláště moc neliší. Většinou se jedná o malé kompaktní zařízení, jehož běžné konstrukční provedení zachycuje například Obrázek 2.



Obrázek 2: Konstrukční provedení komerčního laserového snímače a jeho aplikace. [4].

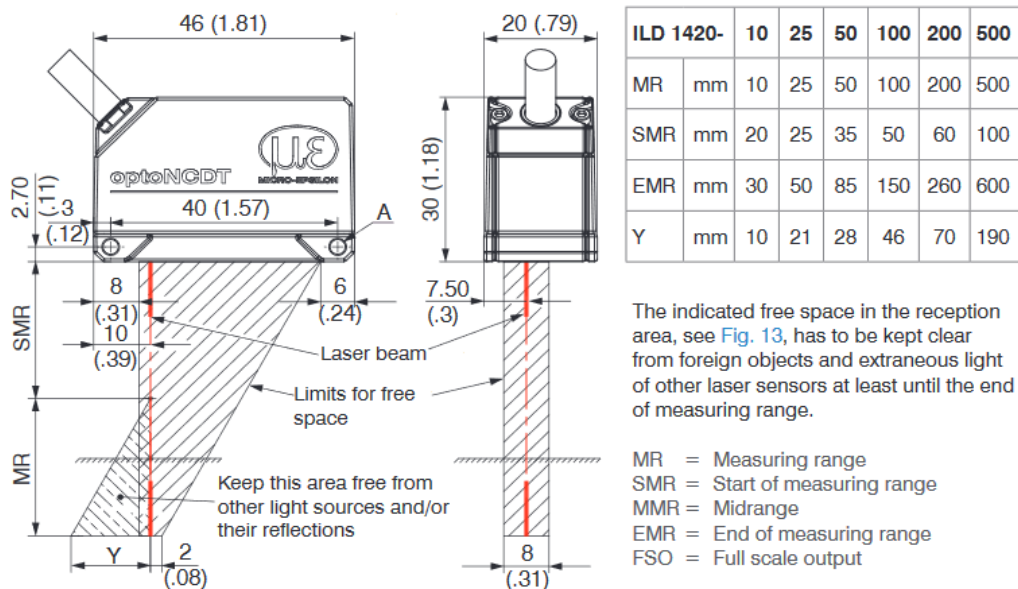
Hlavními výběrovými parametry snímačů jsou zcela určitě měřicí rozsah, přesnost a rozlišení. U snímačů s triangulační metodou měření obecně platí, že s rostoucím měřicím rozsahem se snižuje hodnota linearity a rozlišení měření. Proto také dost často mají takové snímače uváděny ve svých parametrech dvě či více hodnot rozlišení pro různé rozsahy vzdáleností měřicího rozsahu. Většinou se uvádí začátek, střed a konec měřicího rozsahu, viz . Je tedy zřejmé, že čím větší vzdálenost, tím menší je rozlišení. Měřicí rozsahy

u těchto zařízení bývají většinou od 5 mm až do 500 mm s linearitou 8 μm , vzorkováním až 4 kHz a rozlišením 1 μm .

Tabulka 1: Parametry podle třídy modelu snímače.

Model	ILD	1402-5	1402-10	1402-20	1402-50
Měřicí rozsah	[mm]	5	10	20	50
Začátek měřicího rozsahu	[mm]	20	20	30	45
Střed měřicího rozsahu	[mm]	22.5	25	40	70
Konec měřicího rozsahu	[mm]	25	30	50	95
Linearita	[mm]	5 ... 9	5 ... 18	7 ... 36	12 ... 90
		$\leq 0.18\%$ FSO			

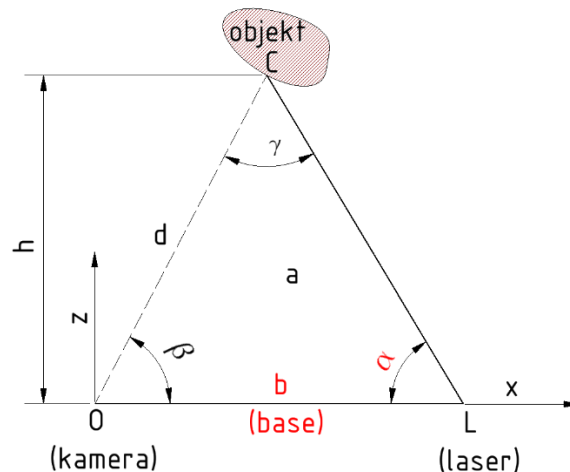
Jako příklad takového komerčního provedení může být triangulační snímač optoNCDT, modelové řady ILD 1420 od výrobce MICRO-EPSILON (Obrázek 3). Tyto laserové snímače jsou extrémně kompaktní a vybaveny integrovaným kontrolérem umožňující přímočarou a rychlou montáž a elektroinstalaci [5].



Obrázek 3: Laserový triangulační snímač řady IDL 1420 [5].

Mezi výhody laserového měření vzdálenosti patří jeho přesnost, rychlost a široké možnosti aplikací. Laserové snímače jsou schopny detekovat vzdálenosti i od zakřivených ploch předmětů jakýchkoliv barev i drsností. Místo, ke kterému měříme, je navíc jednoznačně definováno bodem vykresleným laserovým paprskem. Paprsek může dopadat na měřenou plochu i pod úhlem (dokonce až 85°!), může procházet v těsné blízkosti jiných předmětů – postačí přímková viditelnost na cíl [6]. Vzhledem k tomu, že je snímán difúzní odraz není vhodné snímat lesklé či průhledné povrchy.

Příklad jednoduchého trigonometrického výpočtu polohy bodu C pomocí triangulace (Obrázek 4).



Obrázek 4: Schéma triangulace pro výpočet polohy bodu C .

Pomocí sinové věty vyjádříme vztah (1)

$$\frac{d}{\sin(\alpha)} = \frac{b}{\sin(\gamma)} \quad (1)$$

Vzdálenost strany d se pak vyjádří vztahem (2)

$$d = \frac{b \cdot \sin(\alpha)}{\sin(\gamma)} = \frac{b \cdot \alpha}{\sin(\pi - \alpha - \beta)} = \frac{b \cdot \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2)$$

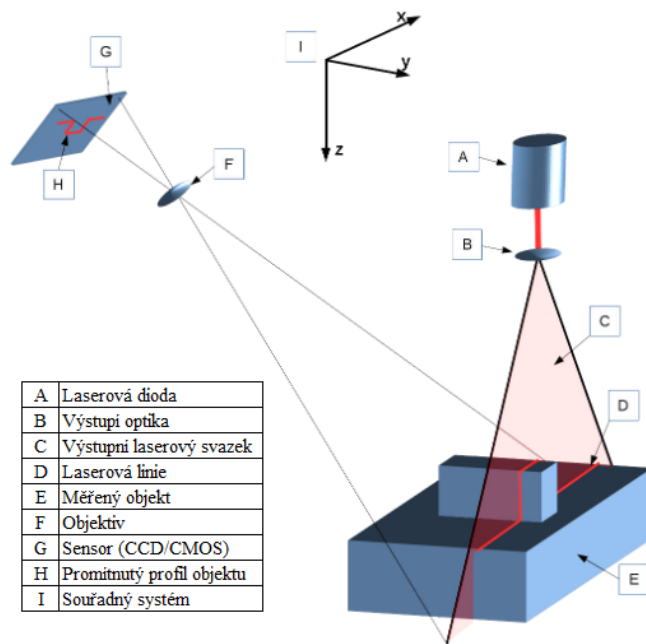
Souřadnice bodu C (3)

$$C = (d \cdot \cos(\beta), d \cdot \sin(\beta))^T \quad (3)$$

2.2.2 Aktivní 2D triangulace

Tato metoda je hojně používána v oblasti výzkumu, designu a konstrukce. Jedná se o tzv. plošné skenování různě strukturovaného povrchu objektu. Výstupní laserový svazek je válcovou čočkou rozšířen tak, že na povrchu měřeného objektu vytvoří linii, Proto se často uvádějí též jako liniové skenery. Laserová linie, je poté monitorována pomocí zobrazovacího systému podobného fotoaparátu obsahujícího optiku (objektiv + clona) a maticového obrazového senzoru (CCD nebo CMOS), který je namontován úhlově vzhledem k laserové linii.

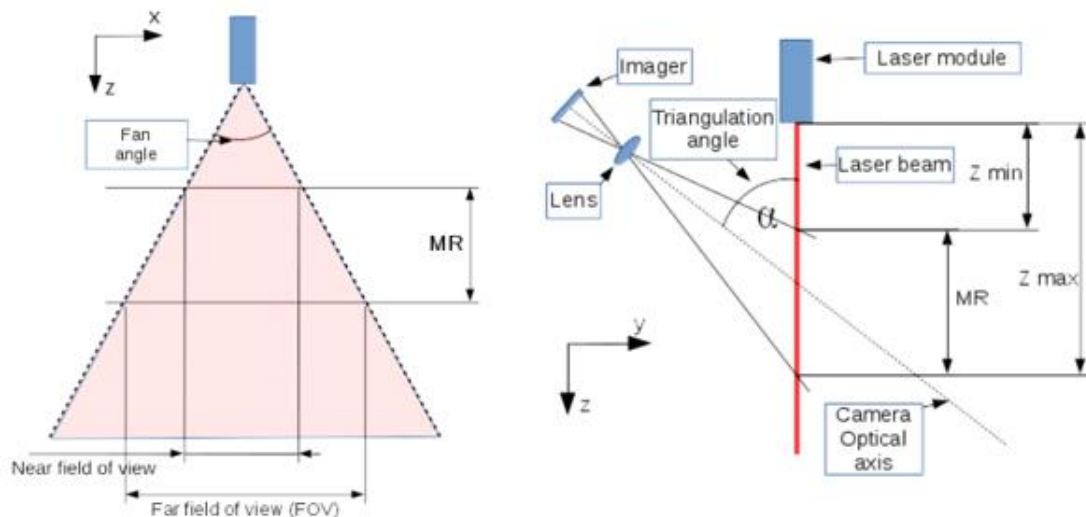
Díky této úhlové montáži se laserová linie promítá do objektivu kamery jako výškový profil, který je pak přenesen jako obraz na senzor, viz Obrázek 5. Tyto snímače pracují na principu plošné 2D optické triangulace pro dvourozměrné získání výškového profilu různých měřených povrchů. Jedná se o analogický princip, který využívají také 1D laserové triangulační snímače.



Obrázek 5: Princip 2D plošného skenování [7].

V závislosti na velikosti úhlu triangulace a objektivu jsou viditelné pouze objekty v rámci definovaného měřicího rozsahu (MR), který leží mezi minimální a maximální vzdáleností Z , jak je znázorněno na Obrázek 6.

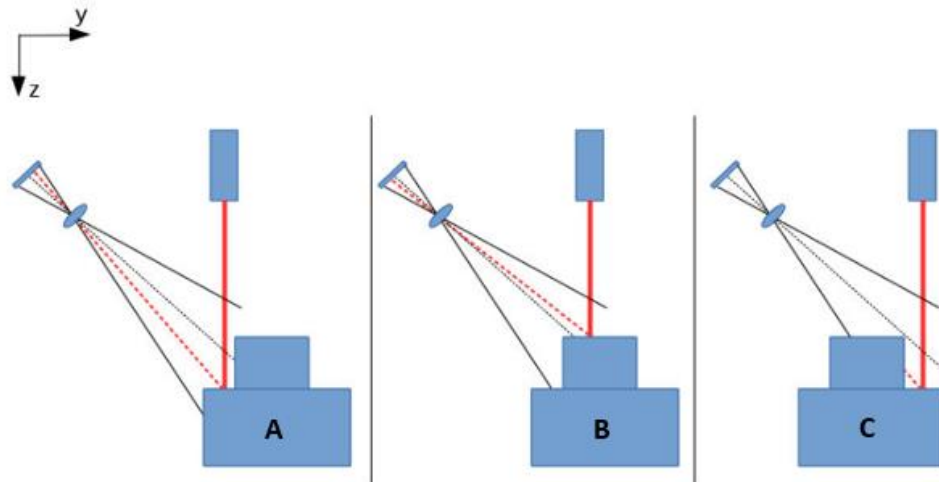
Předměty, které jsou blíže laseru, než je minimální vzdálenost Z , nejsou kamerou ostře zobrazitelné; to samé platí pro objekty překračující maximální vzdálenost Z .



Obrázek 6: Oblast snímání definovaná měřicím rozsahem [7].

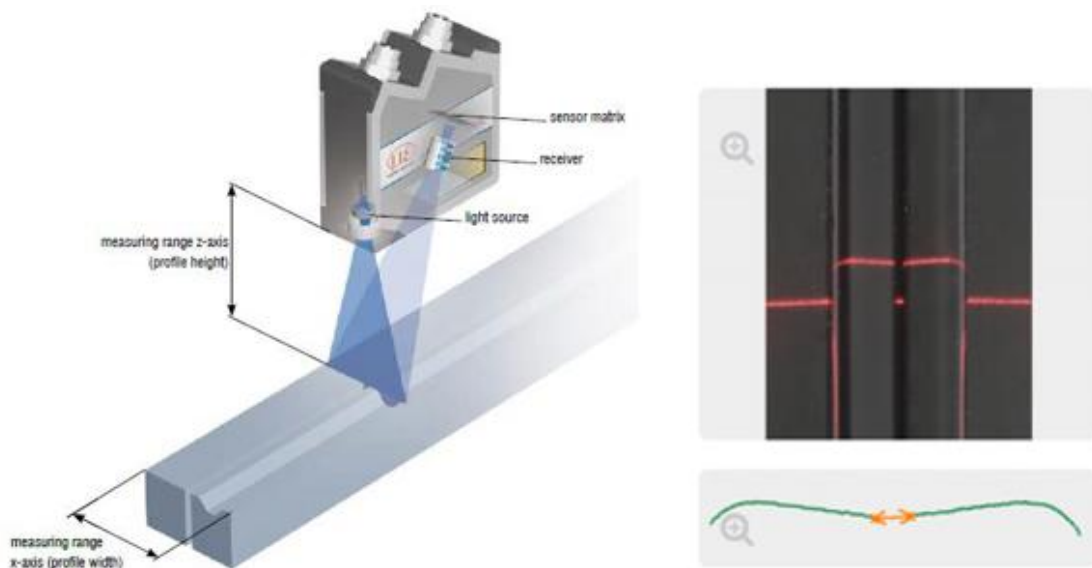
Dalším problémem při použití, ať už 1D nebo 2D technik měření vzdálenosti, které jsou založeny na principu triangulace, je zastínění od ostrých hran. Zastínění laseru je znázorněno na Obrázek 7, kde jsou znázorněny tři polohy profilového skeneru. V situaci, kdy je skener v poloze A a B, je objektivem přenášen předmět do obrazové roviny senzoru

[7]. Naopak v situaci, kdy je skener v poloze C, je zpětný chod svazku zastíněný ostrou hranou snímaného předmětu.



Obrázek 7: Chyba měření při triangulaci vlivem zastínění svazku ostrou hranou [7].

Tato zařízení jsou často využívána rovněž především tam, kde je potřeba rychle snímat a vyhodnocovat skenované plochy nebo profily, jsou běžně kompaktní a výrobců existuje spousta. Je obvyklé, že kamera a laserový zdroj jsou většinou zakrytovány v jednom těle. Tyto skenery například vyrábí a dodává společnost LMI TECHNOLOGIES a MICRO-EPSILON. Oba tito výrobci nabízejí pouze zabudované kamery do boxu spolu s laserem, kamery nejsou přímo určené na velkou záznamovou plochu, nicméně nejvyšší modely již nabízejí velkou plochu záznamu. Ukázka aplikace komerčního zařízení, viz (Obrázek 8).



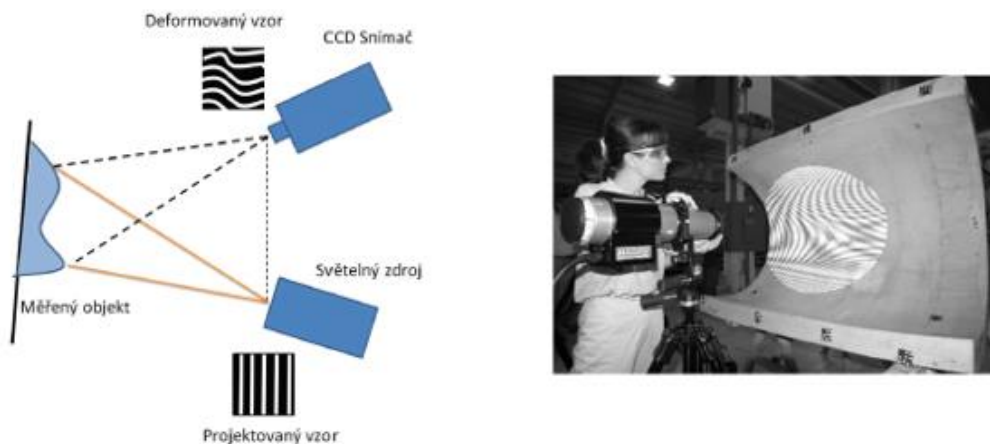
Obrázek 8: Aplikace laserového profilového (liniového) skeneru [8].

2.2.3 Aktivní 3D triangulace

Zařízení, která využívají princip 3D aktivní trigonometrie, jsou 3D skenery s plošným skenováním. V tomto případě se světelný zdroj generuje na měřený objekt například strukturu proužků (tzv. *Fringe – Projection*), viz Obrázek 9 (pravá část). Světelné pruhy jsou promítnuty na objekt a tím je získán jejich zdeformovaný obraz promítané textury na reálném objektu. Dále jsou snímáním takto zdeformovaného obrazu získány data souřadnic bodů skenované plochy. Pomocí CCD snímačů, které jsou umístěny ve známé kalibrované poloze vůči zdroji světla se pak spočítá vzdálenost světla odraženého od povrchu předmětu.

Samotný měřený objekt je popsán hustou sítí bodů, pomocí které znázorníme digitalizovaný povrch reálného objektu.

V dnešní době moderní a výkonné techniky není pro počítače problém pracovat až s milióny takto získaných bodů. Přesnost takovýchto měřidel v praxi, je uváděna na setina až tisíciný milimetru.



Obrázek 9: Princip a ukázka – projekce strukturovaným světlem [9].

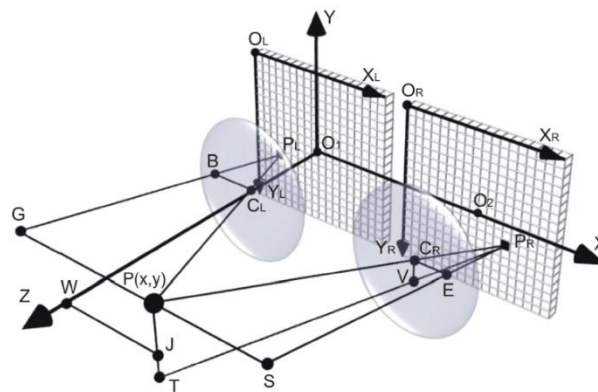
Spektrum použití těchto skenerů je v dnešní době velice rozsáhlé. Díky své mobilitě nacházejí tyto skenery celou řadu uplatnění [9]. Lze s nimi skenovat jak velké předměty (formy, výkovky), tak drobné objekty pro měření detailů (biomedicína, přístrojová technika).

Uplatnění najdou také přímo ve výrobních linkách, předně tam kde je požadovaná automatizace (např. kontrola zmetků při výrobě), záznam deformací karoserie automobilů. Na Obrázek 10 je ukázka použití skeneru v kombinaci s robotickým ramenem.

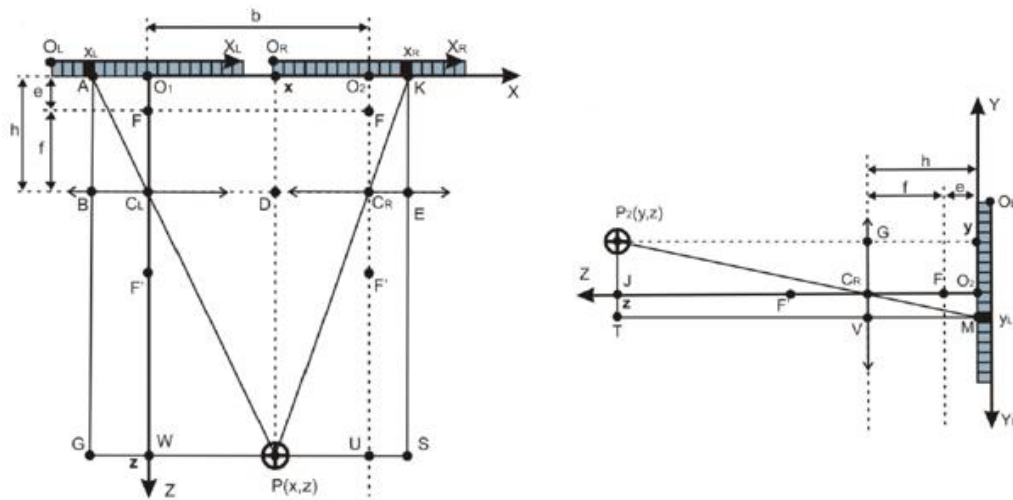


Obrázek 10: Použití automatizované inspekce pomocí 3D skeneru ATOS [10].

Geometrické znázornění polohy bodu P v prostoru vůči poloze pixelu na maticovém CCD senzoru popisuje Obrázek 11 a Obrázek 12.



Obrázek 11: 3D pohled na geometrické znázornění polohy bodu P vůči poloze pixelů na CCD senzoru [11].



Obrázek 12: Vlevo, je pohled v rovině x, z a vpravo na obrázku boční pohled v rovině z, y [11].

Na základě podobnosti trojúhelníků ΔABC_L a ΔAGP (levý obrázek) lze vyjádřit (4)

$$\frac{|BC_L|}{|AB|} = \frac{|GP|}{|GA|} \quad (4)$$

Totéž analogicky platí pro trojúhelníky ΔKEC_R a ΔKSP

$$\frac{|C_RE|}{|EK|} = \frac{|PS|}{|SK|} \quad (5)$$

Z Obrázek 12, $AB = KE = h$, $WP = x$, $GW = BC_L$ a $AG = KS = z$, pak lze rovnici (4) zapsat

$$\frac{|BC_L|}{h} = \frac{|BC_L| + x}{z} \quad (6)$$

Jelikož $|PS| = |O_1O_2| - x + |O_2K|$ a $|US| = |C_RE|$

$$\frac{|C_RE|}{h} = \frac{|PU| + |US|}{z} = \frac{b - x + |C_RE|}{z} \quad (7)$$

Z rovnic (6) a (7) vyplývají vztahy (8) a (9)

$$\frac{|BC_L|}{|BC_L| + x} = \frac{h}{z} \quad (8)$$

$$\frac{|C_RE|}{b - x + |C_RE|} = \frac{h}{z} \quad (9)$$

Z rovnic (8) a (9), tak lze vyjádřit souřadnice bodu P x a z .

$$x = \frac{b \cdot |BC_L|}{|BC_L| + |C_RE|} \quad (10)$$

$$z = \frac{h \cdot b}{|BC_L| + |C_RE|} + h \quad (11)$$

Stejným postupem z Obrázek 12 (pravá část) získáme souřadnici y .

$$y = \frac{|C_LV| \cdot b}{|BC_L| + |C_RE|} \quad (12)$$

Vyjádřené prostorové souřadnice bodu P nám popisují jeho polohu na objektu. Jelikož obraz bodu P je optikou promítán na CCD detektor (Obrázek 11) tak tyto získané souřadnice $P_L(x_L, y_L)$ a $P_R(x_R, y_R)$ je nutné porovnat vůči pixelům CCD detektoru. Jinými slovy, bude potřeba z geometricky získaného výpočtu (10), (11) a (12) interpretovat tyto vztahy do matice pixelů. Středů souřadnic bodu O_1 a O_2 jsou dány $(\frac{w}{2}; \frac{d}{2})$, kde w je šířka v pixelech podél osy x a d je výška v pixelech podél osy y .

Body zobrazené v pixelech $P_L(x_L, y_L)$ a $P_R(x_R, y_R)$ mají následující globální souřadnice (13)

$$\begin{aligned}x'_L &= -m \cdot \left(x_L - \frac{w}{2}\right); y'_L = -m \cdot \left(y_L - \frac{d}{2}\right) \\x'_R &= -m \cdot \left(x_R - \frac{w}{2}\right); y'_R = -m \cdot \left(y_R - \frac{d}{2}\right)\end{aligned}\tag{13}$$

Z Obrázek 11 je patrné, že $|BC_L| = x'_L$, $|C_R E| = x'_R$ a $|C_L V| = y'_L = y'_R$, potom lze (10), (11) a (12) upravit.

$$\begin{aligned}x &= \frac{b \cdot x'_L}{x'_R + x'_L} = \frac{-b \cdot m \cdot \left(x_L - \frac{w}{2}\right)}{-m \cdot \left(x_L - \frac{w}{2}\right) + m \cdot \left(x_R - \frac{w}{2}\right)} = \frac{b \cdot \left(x_L - \frac{w}{2}\right)}{x_L - x_R} \\y &= \frac{b \cdot y'_L}{x'_R + x'_L} = \frac{-b \cdot m \cdot \left(y_L - \frac{d}{2}\right)}{-m \cdot \left(x_L - \frac{w}{2}\right) + m \cdot \left(x_R - \frac{w}{2}\right)} = \frac{b \cdot \left(y_L - \frac{d}{2}\right)}{x_L - x_R}\end{aligned}\tag{14}$$

$$z = \frac{h \cdot b}{x'_R + x'_L} + h = \frac{h \cdot b}{-m \cdot \left(x_L - \frac{w}{2}\right) + m \cdot \left(x_R - \frac{w}{2}\right)} + h = \frac{h \cdot b}{m \cdot (x_L - x_R)} + h$$

Pro přehlednost lze uvést $Q = \frac{b}{x_L - x_R}$, potom (15) lze vyjádřit následovně:

$$\begin{aligned}x &= Q \cdot \left(x_L - \frac{w}{2}\right) \\y &= Q \cdot \left(y_L - \frac{d}{2}\right) \\z &= h \cdot \left(1 - \frac{Q}{m}\right)\end{aligned}\tag{15}$$

2.3 Metody pasivní triangulace

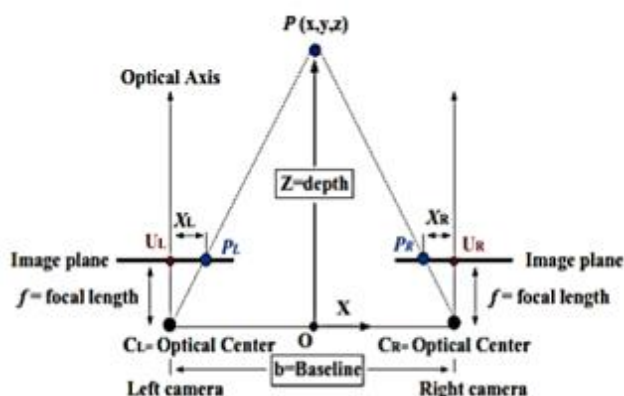
Triangulační pasivní technika vychází z principu digitalizace diskrétních bodů, a přitom není bráno v úvahu geometrické uspořádání osvětlení. Obvykle postačí v systému kvalitní fotoaparát s poměrně vysokým rozlišením a sadou tzv. záměrných značek, které mohou být kódované nebo dekódované. Těmito značkami je potom měřený objekt označen.

Fotoaparát zachycuje scénu v náhodných pozicích a současně úhlech vůči snímanému objektu. K vytvoření bodů v prostoru je zapotřebí minimálně dvou snímků z různých pozic. V měřicím prostoru se spolu nachází navíc kalibrovaný předmět (etalon) se známou vzdáleností dvou středů záměrných značek. Pomocí tohoto kalibrovaného etalonu se definuje měřítko, na jehož základě lze provést rekonstrukci ostatních bodů snímaného objektu. Běžně se jako etalon používá objekt tyčového tvaru, jehož základ tvoří nejčastěji kompozitní materiál, například karbonové profilové tyče (Obrázek 13).



Obrázek 13: Sada záměrných značek a kalibrováný kompozitní etalon [11].

Obdobnou technikou pasivní triangulace je také metoda Stereo – vidění. Tato technika je velice blízká a souvisí s definováním trojrozměrné scény ze dvou nebo více digitálně pořízených snímků. Stereo – vidění využívá dvou kamer stejného typu jejichž úhlová poloha vůči bázi b – *baseline* je stejná (Obrázek 14).



Obrázek 14: Princip Stereo – epipolární geometrie s paralelními optickými osami kamer [12].

Nutností pro správné měření vzdáleností k objektu je to, aby byl každý měřený bod v zorném poli obou snímacích zařízení. Základ pro určení polohy, tedy tvoří snímáný objekt, respektive snímáný bod a dvojice snímacích zařízení. Toto uspořádání (Obrázek 14) tvoří trojúhelník, ze kterého lze díky triangulaci vypočítat vzdálenost k měřenému bodu. K tomu je potřeba znát rozteč dvou snímacích zařízení, které se říká „báze“ b . Tento parametr se volí na největší možnou vzdálenost obou snímacích zařízení, tak aby obě zařízení snímala celý objekt a tím také získáme přesnější výsledky měření.

Vztahy pro úhlový výpočet změny pozice z jsou:

$$\frac{b}{z} = \frac{(b + x_r) - x_l}{z - f} \quad (16)$$

$$z = \frac{b \cdot f}{x_l - x_r} = \frac{b \cdot f}{d} \quad (17)$$

Kde:

d je rozdíl levé a pravé souřadnice x_l a x_r [mm]

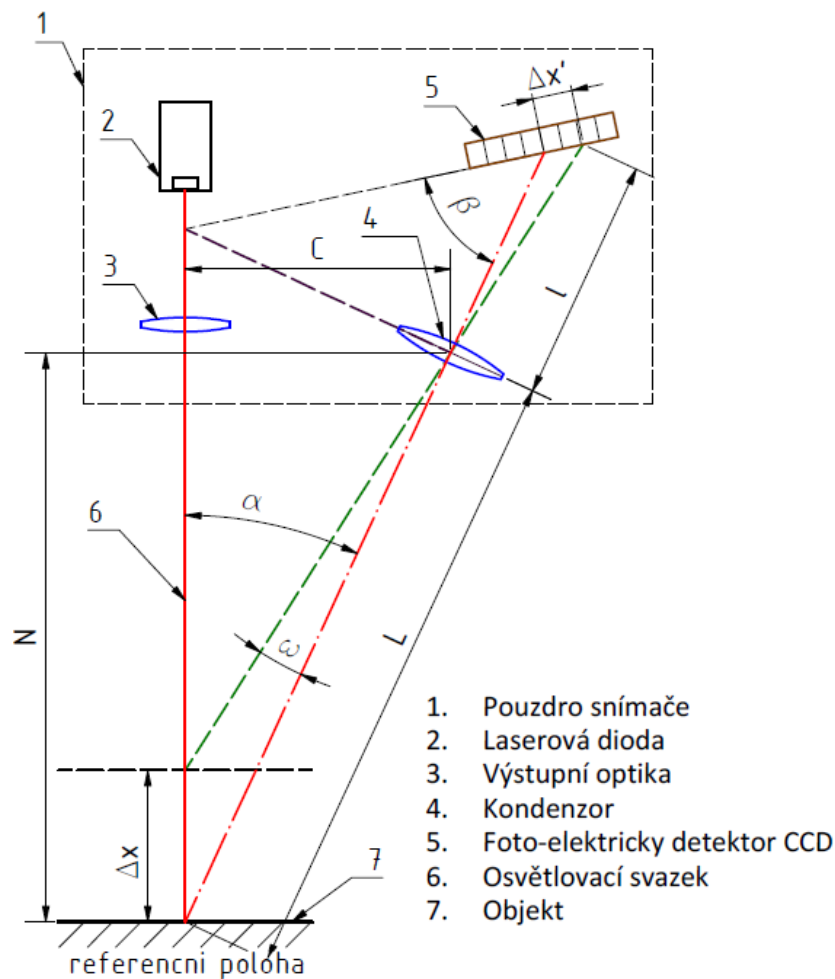
b je délka báze (vzdálenost optických os obou kamer) [mm]

f je ohnisková vzdálenost kamer [mm]

Rovnice (16) dokazuje to, že vzdálenost z je nepřímo úměrná rozdílu d , protože čím je hodnota d větší tím je objekt blíže k bázi b a analogicky je tomu naopak.

2.4 Princip triangulace snímačů vzdálenosti a polohy

Pro získání metrologických údajů se v dnešní době hojně využívá metoda triangulace. Ta se dělí na tři základní principy a to 1D, 2D a 3D. Mezi nejpoužívanější 1D aplikace se řadí laserové snímače pro měření vzdálenosti a polohy. Tyto snímače se skládají převážně ze zdroje světla, což může být například laserová dioda pracující na vlnové délce červeného světla cca $\lambda = 650\text{--}670$ [nm], kolimační výstupní čočky, zobrazovací čočky (kondenzor), foto-elektricky citlivého čipu a převodníku, který se používá pro zpracování signálu. Na Obrázek 15, je znázorněno schéma a princip triangulačního snímače, kde je změna polohy objektu od měřené roviny označena Δx , naopak posun obrazu světelného spotu vůči posuvu na čipu je označen $\Delta x'$.



Obrázek 15: Schéma a princip triangulačního snímače posuvu.

Laserové triangulační snímače určují polohu objektu pomocí měření odraženého difusního, respektive rozptýleného svazku od jeho povrchu (7). Výstupní osvětlovací svazek (6) je promítán a současně fokusován na povrch měřeného objektu.

Odraz bodu světla je pak zaostřen zobrazovací čočkou (4) na CCD detektor (5). Pokud objekt změní svou polohu o Δx od referenční polohy snímače, změní se rovněž poloha jeho zobrazovacího svazku na detektoru o $\Delta x'$.

K tomu, aby byla zajištěna přesnost snímání signálu, musí být v případě reálných aplikací splněna Scheinpflugova podmínka [13][14],

$$\tan \alpha = \delta \cdot \tan \beta \quad (18)$$

kde

δ je zvětšení

α je úhel mezi optickou osou kondenzoru a osou výstupního svazku

β je úhel mezi povrchem fotocitlivého senzoru a optickou osou kondenzoru.

Dále za předpokladu použití ideálních tenkých čoček a pomocí Sínové věty získáme vztahy (19) a (20),

$$\frac{\sin \omega}{\Delta x} = \frac{\sin (\omega + \alpha)}{L} \quad (19)$$

$$\frac{\sin \omega}{\Delta x'} = \frac{\sin (\beta - \omega)}{l} \quad (20)$$

Které po úpravách dostanou finální podobu (21) a (22).

$$\tan \omega = \frac{\Delta x \cdot \sin \alpha}{L - \Delta x' \cdot \cos \alpha} \quad (21)$$

$$\tan \omega = \frac{\Delta x' \cdot \sin \beta}{l + \Delta x' \cdot \cos \beta} \quad (22)$$

V důsledku změny vzdálenosti objektu A od měřicího přístroje se mění i úhel pohledu α odraženého paprsku dopadajícího na přijímač a tím pádem také jeho bod dopadu A' na přijímač světla. Je-li splněna výše zmíněná podmínka, pak je možné tuto závislost vyjádřit vztahem (23).

Ze vztahů (21) a (22) lze získat závislost mezi polohou předmětu od referenční polohy Δx

$$\Delta x = \frac{L \cdot \Delta x' \cdot \sin \beta}{l \cdot \sin \alpha + \Delta x' \cdot \sin (\alpha + \beta)} \quad (23)$$

Kde

ω je úhel, který svírají dva odražené svazky [°]

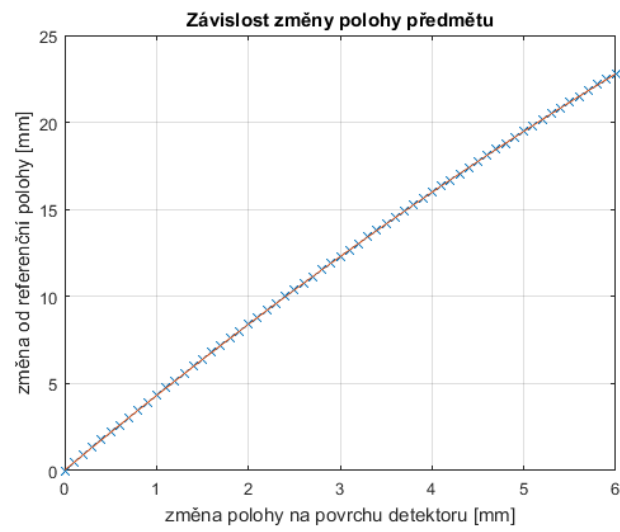
α je úhel mezi optickou osou kondenzoru a osou výstupního svazku [°]

β je úhel mezi povrchem fotocitlivého senzoru a optickou osou kondenzoru [°]

L je vzdálenost od povrchu objektu k optickému středu zobrazovací tenké čočky [mm]

l je vzdálenost od středu optiky k ploše detektoru [mm]

Grafické vyjádření závislosti změny vzdálenosti od měřeného povrchu Δx a jeho obraz posunutý na detektoru o $\Delta x'$ (Obrázek 16).



Obrázek 16: Vynesení průběhu funkce (23) do grafu.

3 Možnosti bezkontaktního měření vnitřních stěn otvorů

V oblasti strojní výroby je běžným požadavkem měření vnitřní strany otvorů, respektive rozměru průměru $\varnothing D$. Mohou to být například předvrtané díry, průchozí otvory, rozměry vnitřních závitů, jejich výběhy apod. Zejména v případech malých rozměrů se nejedná o snadný úkol. Z toho také plyne, že ve strojírenství není velké spektrum těchto bezkontaktních metod, zvláště pro případy, kdy průměry děr dosahují poměrně malých rozměrů. Rostoucí požadavky na rychlost měření, přesnost měření a menší rozměry vyžaduje vývoj nových, přizpůsobivých měřících technologií [15].

V současné době se měření rozměrové a tvarové přesnosti v průmyslové praxi provádí konvenčními metodami, jako je třeba kontaktní metoda používající souřadnicové měřicí stroje. Přestože tyto stroje poskytují jedny z nejpřesnějších výsledků, v některých případech je není možné použít. To například budeme-li hovořit o malých rozměrech (jednotky milimetrů). Díky tomu se stále častěji využívají laserové a optické měřicí systémy.

Tato kapitola bude zaměřena na přehled běžných i těch méně známých bezdotykových metod měření vnitřních stěn otvorů. Většina metod bezdotykového měření je postavena na principu optických měření. Oproti klasickým kontaktním metodám nabízí několik významných výhod, jako je rychlé měření dílů, a to i těch složitých, dále nám poskytuje vysokou hustotu naměřených dat, mobilitu a co je nejdůležitější, výsledky jsou nezávislé na tuhosti měřené části. Mezi běžně používané zařízení pro bezkontaktní měření patří:

Počítačová tomografie CT

Optické 3D scannery

Měřicí mikroskopy

Kapacitní snímače

Triangulační sondy

3.1 Počítačová Tomografie (Computed Tomography)

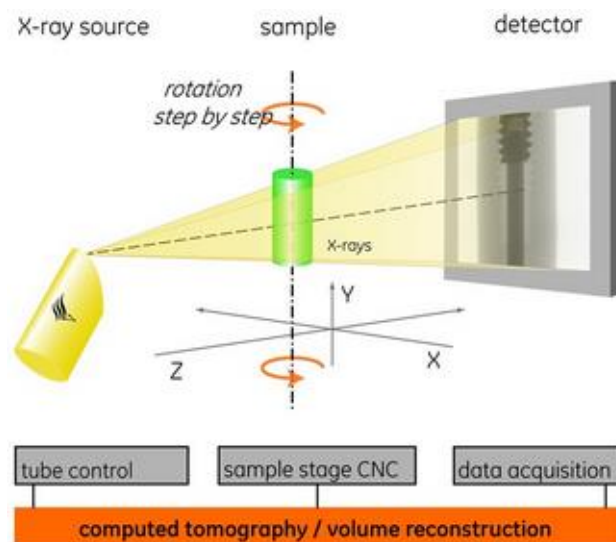
V dnešní době jsou časté požadavky na přesnost výrobků přísnější a stále se tyto požadavky zvyšují. Rovněž roste potřeba měření objektů zejména s komplikovanější geometrií. Vývoj a implementace nových výrobních technologií vyžaduje také vývoj a aplikaci nedestruktivních metod inspekce a měření. Z tohoto důvodu je aplikace průmyslových CT systémů základním a dnes také velice důležitým požadavkem. Počítačová tomografie poskytuje snímat prostorově rozsáhlé předměty, včetně jejich vnitřní struktury v požadované přesnosti [15].

Počítačová tomografie (CT) je již historicky dobře zažitou technikou, která se využívá hlavně v lékařství a je známá více než 40 let. První komerční přístroje byly nabízeny již v sedmdesátých letech. Její aplikace ve strojírenství k rozměrovým měřením započala přibližně před 10 lety. Dnes je tato metoda běžně zaváděná do průmyslové oblasti a její aplikace se již zavedla také do oblasti rozměrové metrologie. Umožňuje nám

nedestruktivním (bezdotykově) způsobem definovat rozměry, jak vnějších, tak i vnitřních struktur objektů, a dokonce i sestavených celků. Právě tato schopnost měřit vnitřní rozměry součástí bez dotyku činí průmyslovou CT atraktivní a jedinečnou ve světě rozměrové metrologie. Poprvé tak bylo možno kontrolovat bezdotykově vnitřní struktury (předvrtané díry, otvory). Díky této metodě lze během několika pouhých minut získat kompletní 3D model dílů s jedním skenovacím procesem a bez nutnosti měřený předmět zničit. Alternativní metodou k počítačové tomografii jsou souřadnicové optické 3D skenery.

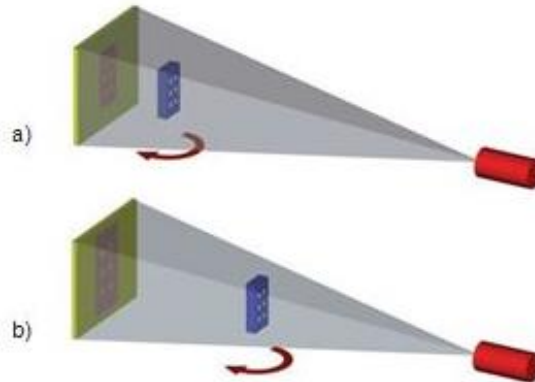
Základní princip metody využívá rentgenového záření (tok fotonů různých kmitočtů) a jeho schopnosti pronikat skrze materiál snímaného objektu. Zdrojem záření je rentgenka, která dokáže vytvořit téměř bodový zdroj. Čím delší je dráha procházejících paprsků skrze objekt (absorpce), tím méně záření vychází z měřeného objektu. Zeslabení rentgenového paprsku tedy definuje prozářenou délku předmětu. S absorpcí záření také souvisí to, jaký druh materiálu je zrovna snímán. Tento princip je podobný vytváření stínového obrazu u částečně transparentního objektu osvětleného bodovým zdrojem světla. Také zde závisí na optické hustotě. Podle absorpce materiálu a složitosti dílu se rentgenové záření dostává na rentgenový detektor. Pomocí výpočetní techniky a za použití matematických algoritmů je obraz dále zpracován [16].

Použitím kuželového nebo jehlanového paprsku lze vytvořit dvourozměrné rentgenové obrazce předmětu (Obrázek 17) [15]. Tyto obrazce jsou zachycovány rentgenovým detektorem, který je dále předáván v digitálním tvaru k dalšímu vyhodnocení. Takto se po několika krocích za sebou provede několik set až tisíce 2D snímků předmětu v jeho různých polohách (rotace kolem osy). V podstatě je jedno, jestli se otáží zdroj s detektorem okolo měřeného předmětu nebo zda se otáčí předmět v dráze paprsků. Pro použití v oblasti přesnějšího měření se upřednostňuje statické provedení zdroje záření a detektoru. V takto provedeném snímání je vložena informace o 3D tvaru měřeného předmětu. Použitím vhodné matematické metody se z této informace dá vypočítat objemový model předmětu, který ideálně charakterizuje jeho geometrii. Tím se získá jeho finální 3D model.



Obrázek 17: Princip počítačové tomografie, použití jehlanového svazku [17].

Posouváním předmětu mezi zdrojem a detektorem lze nastavovat zvětšení či zmenšení měřeného předmětu (Obrázek 18). Tento krok se provádí před začátkem měření. Díky tomu lze měřit velké i drobné předměty nebo jejich výřezy s velkým zvětšením. S vhodným zvolením zvětšení také souvisí s dosažené rozlišení měřeného předmětu.



Obrázek 18: Závislost zvětšení vůči poloze předmětu: a, malé zvětšení, b, velké zvětšení. [2]

Vhodné umístění předmětu do prostoru mezi rentgenový zdroj a detektor, respektive nastavení počáteční geometrie, je určeno na základě vhodných kalibračních metod, které jsou pak zohledněny v dalších krocích vyhodnocování.

Pomocí vztahu (24), lze vyjádřit geometrické zvětšení předmětu [18]

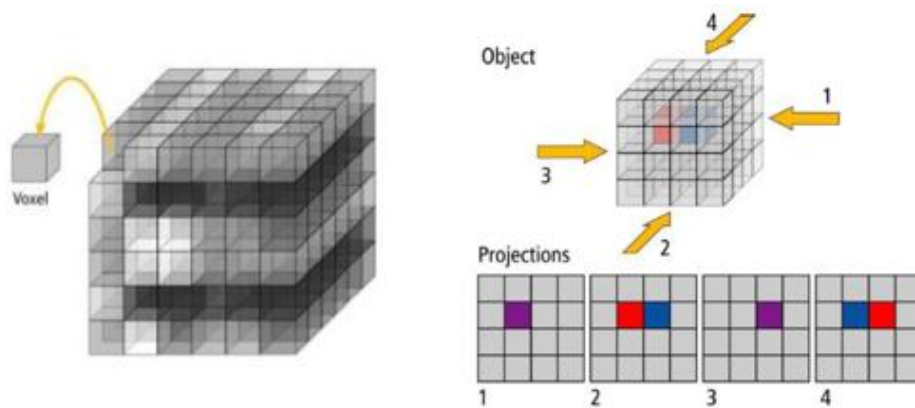
$$\text{Geometrické zvětšení} = \frac{S_d}{S_p}, \quad (24)$$

kde

S_d je vzdálenost zdroje od detektoru [mm]

S_p je vzdálenost zdroje od objektu [mm]

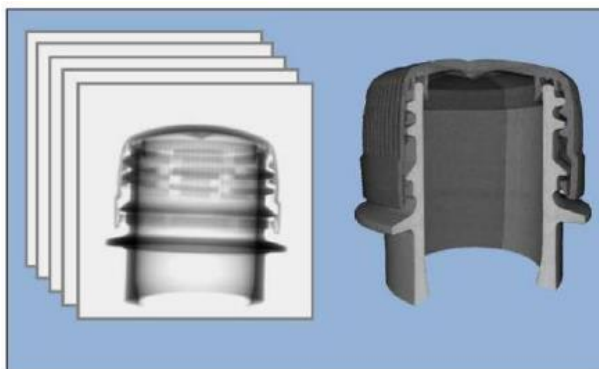
K tomu, aby se ze 2D snímků získala objemová data závisí na rentgenových detektorech. Běžné fotocitlivé detektory například 2D optických senzorů zpracovávají data pomocí pixelů. V počítačové tomografii se používají tzv. voxely (Obrázek 19), neboli objemový obrazový bod. Vychází z absorpce záření na objemové mřížce v 3D prostoru. Tmavé voxely charakterizují pole s nízkou absorpcí a světlé voxely pole s vysokou absorpcí.



Obrázek 19: Voxel a projekce bodů z různých pohledů. [19]

Tato 3D objemová data se vypočítávají většinou metodou filtrovaného zpětného promítání z 2D rentgenových snímků (Obrázek 20). Tato rekonstrukce dat vychází z inverzní Radonovy transformace.

Samotná rekonstrukce probíhá v podstatě ve třech krocích: příprava před zpracováním dat, filtrování a zpětné promítání snímků [16].



Obrázek 20: Ze sady d snímků je získán 3D obrazec (PET láhev s víčkem) [20]

Výhodou oproti jiným metodám bezdotykových měření je skutečnost, že tato metoda je vhodná pro kontrolu dílů ve stavu montáže. Není tedy nutností před vlastním měření jejich demontáže.

To je jedna z velkých výhod, a to v případech, kdy jsou všechny vyrobené díly v rozloženém stavu vyráběny správně dle předepsaných tolerancí, ale po montáži může dojít odchylkám díky posunu v tolerančních polích. Průmyslové systémy CT navíc umožňují provádět jak rozměrová měření, tak analýzu materiálu na stejném modelu. To je obzvláště výhodné, když se ve výrobním procesu například používají nové materiály. Proto jsou systémy CT velmi žádané v mnoha různých průmyslových odvětvích.

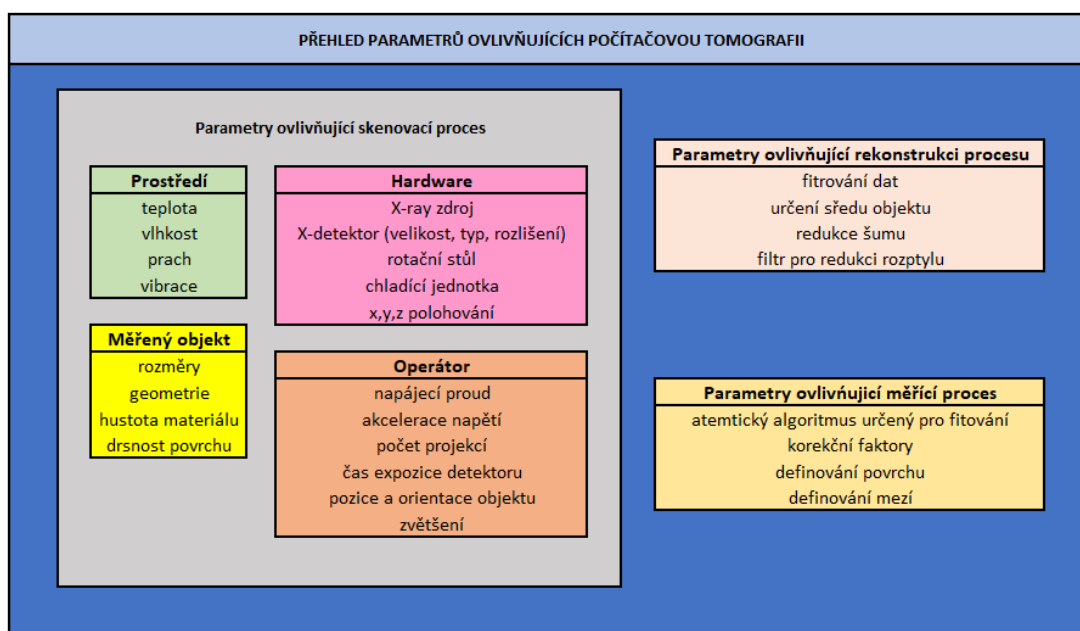
Jelikož se jedná o poměrně „mladou“ metodu rozměrového měření, tak kromě mnoha výhod má však metoda počítačové tomografie také některé své nevýhody. Hlavním problémem jejího využití v oblasti rozměrového měření je skutečnost, že nejistotu měřených výsledků nelze jednoduše vyhodnotit. Metoda CT, je ovlivněna velkým počtem parametrů, a proto nejistota měření je stále neznámá a její metrologická návaznost není dosud optimálně

dosažena. K tomu abychom mohli provést posouzení nejistoty měření, je potřeba identifikovat a klasifikovat ovlivňující parametry.

Klasifikaci ovlivňujících parametrů lze provést několika různými způsoby. Například lze parametry pro určení nejistot rozdělit dle vlivu zdroje rentgenového záření, vlivu rotačního stolu vůči měřenému objektu, vlivu detektoru a také způsobem analýzy naměřených dat. V neposlední řadě také prostředí a vliv lidského faktoru. Nejvhodnější je měření kalibrovaných dílců v souladu s ISO 15530 [16].

Názorné a zjednodušené rozdělení do skupin ovlivňujících parametrů, které mohou ovlivnit proces rekonstrukce a parametry ovlivňující měření modelu, je znázorněno na [16].

Na základě tohoto rozdělení je už možné rekonstruovat rozpočet nejistot.



Obrázek 21: Parametry ovlivňující počítačovou tomografii [16].

Tomografická měření jsou omezena možnostmi snímacího zařízení, jakož i softwarovými nástroji používanými k rekonstrukci a zpracování dat, což znamená, že operátor má velký vliv na výsledky měření a v neposlední řadě na nejistotu měření získaných výsledků. Operátor je parametr, který má vliv v celém průběhu měření, např. při výběru nastavení CT nebo umístění objektů na otočný stůl (geometrie), dále volbě filtrů při 3D rekonstrukci, při vyhodnocování dat, při výběru přístupu měření a volbě matematického algoritmu, který se hodí k jednoduchým geometrickým objektům.

Konstrukční provedení se dělí na dva případy. V prvním případě jde o konstrukci, kde měřená součást rotuje a detektor spolu se zdrojem záření jsou statické. Ve druhém případě je zdroj a detektor uchycen na rotujícím rameni, které se otáčí kolem měřeného objektu, který je položen na pevné desce. S tím také souvisí požadavky na přesnost házení rotační osy. Zvláště u velkých rozměrů, jsou nároky na házení vysoké.

Dodavatelů a výrobců, kteří se zabývají počítačovou tomografií je celá řada. Mezi nejvýznamnější dodavatele se řadí firmy: Carl Zeiss (Německo), General Electric Company (USA) a Nikon (Japonsko). Všichni tito dodavatelé jsou již velice dobře známí jak

v metrologii, tak i průmyslových aplikacích. Ukázky různých konfigurací CT systémů jsou na Obrázek 22.



Obrázek 22: Provedení CT jednotek od různých dodavatelů: a) NIKON, b) General Electric Company a c) Carl Zeiss [20][21][22].

3.2 Optické 3D skenery

V průmyslu jsou konvenční měřicí metody stále více nahrazovány novými metodami, kde je kontrovaná součást nejprve digitalizována pomocí tzv. optických 3D skenerů. Kontrola získané přesnosti rozměrů a tvarů je prováděna na základě získaného virtuálního modelu. Tento přístup přináší mnoho výhod a v mnoha případech poskytuje rychlejší a objektivnější výsledky.

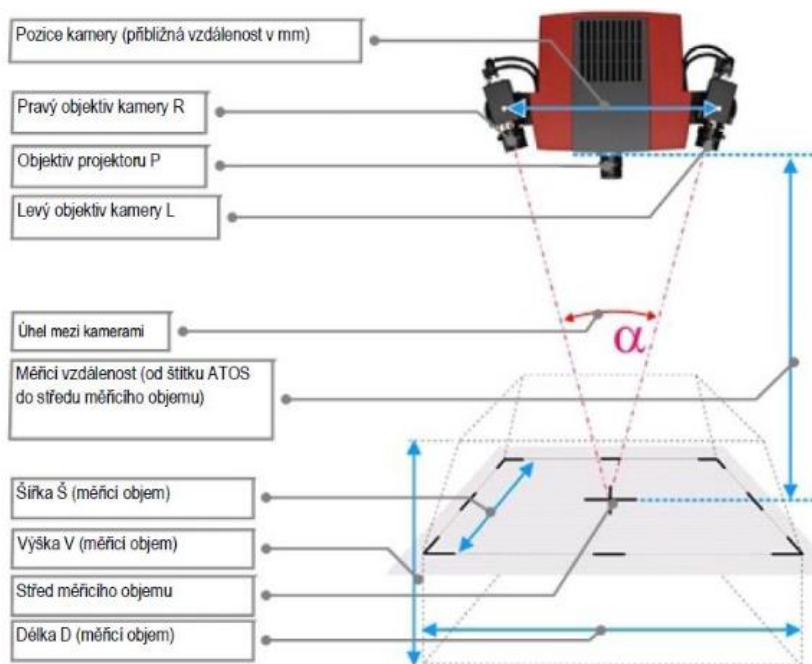
Optické 3D skenery se řadí mezi mobilní bezdotykové souřadnicové měřicí stroje, které získávají souřadnice bodů na povrchu reálných objektů a následně jsou převedeny do podoby digitálních dat. Právě v jejich mobilitě je obrovský potenciál. Objekty nemusí být transportovány do měřících laboratoří, ale mohou být měřeny přímo na určeném místě nebo dokonce během výrobního procesu. Odpadá tím tedy nutnost transportu například velkých a těžkých dílců [23].

Oproti dotykovým souřadnicovým měřicím strojům, které postupně měří souřadnice jednotlivých bodů na povrchu součástí, snímají 3D optické skenery v jednom okamžiku souřadnice celé *množiny bodů*, tj. velkého množství (od tisíce až do milionů) bodů na povrchu součástí. Vzhledem k současnému stavu výpočetní techniky, která dokáže velmi rychle analyzovat velké objemy dat, lze v poslední době zaznamenat prudký nárůst průmyslového použití 3D optických skenerů v aplikacích jako je digitální rekonstrukce objektu, inspekce kvality produktu, měření nežádoucích deformací výrobku, apod. Vzhledem k dosažitelné přesnosti setin až tisícin milimetru lze tyto měřicí přístroje použít i jako nástroj pro inspekci kvality geometrických specifikací. K hlavním výhodám optických 3D skenerů patří rychlost měření, mobilita a flexibilita měřících objemů.

V dnešní době se optické měřicí systémy 3D používají v různých aplikacích, jako je automobilový průmysl, stavby lodí nebo velký strojírenský průmysl, stavebnictví, výroba letadel a kosmický výzkum. Ve strojírenství se 3D skenery často používají pro kontrolu obrobků, deformační analýzu a reverzní inženýrství. Kromě statické kontroly jsou tyto systémy používány jako nástroj pro dynamické měření, tzv. *online fotogrammetrické měření*. Typickou ukázkou může být trhací zkouška, kde skener sleduje fyzickou změnu testovaného vzorku pomocí rychlého snímání. Přesnost měření je omezena počtem snímku za sekundu [24].

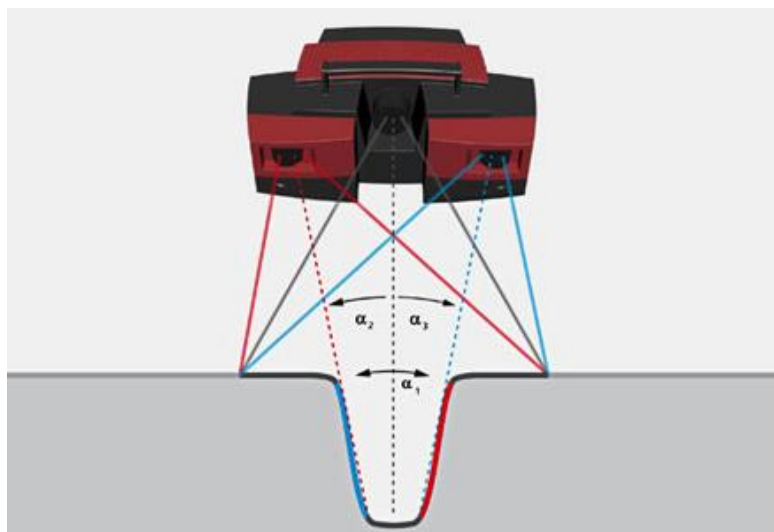
Systémy 3D optických skenerů pracují na principu triangulace a stereo - vidění viz kapitoly 2.2 Metody aktivní triangulace a 2.3 Metody pasivní triangulace. Projekční jednotka promítá na skenované objekty různé strukturované motivy (Fringe – Projection), které jsou poté zaznamenány dvěma fotoaparáty (Obrázek 23).

Promítáním strukturovaného světla na měřený objekt je získán deformovaný obraz promítaného vzoru na fyzickém objektu. Snímáním tohoto deformovaného obrazu jsou získány souřadnice bodů měřené plochy. Počítačová rekonstrukce je schopna pracovat se souřadnicemi až milionů bodů. Přesnost a kvalita je závislá nejen na snímači, ale i na prostředí a vzhledu povrchu skenovaného objektu. V praxi se jedná o měřidla s přesností setin až tisícin milimetru [24].



Obrázek 23: Princip a schéma optického 3D skeneru, definice objemu [25].

Na druhé straně v porovnání s počítačovou tomografií CT má optické 3D skenování svá omezení, jako například problematickou digitalizaci detailních prvků, jak mohou být ostré hrany nebo právě malé a hluboké díry nebo jiné opticky nedostupné oblasti (Obrázek 24) [26].



Obrázek 24: Omezení snímání předmětu optickým 3D skenerem [27].

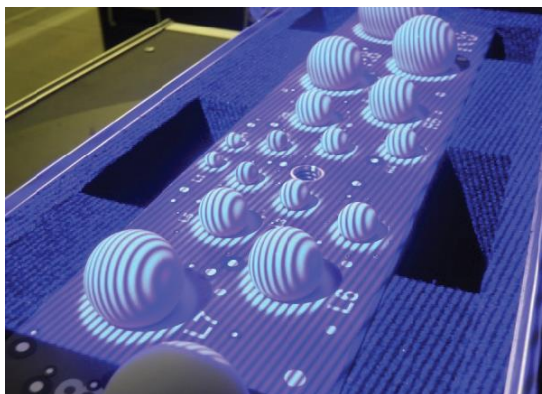
Další nevýhodou je problematické měření některých povrchů. Často je nutno na povrchy nanášet antireflexní nástřiky. Optické 3D skenery mohou být také citlivé na okolní světlení. V případě, že je požadovaná vysoká přesnost je nutný vyšší počet pruhů (Fringe Projection) a z toho tedy plyne delší snímací čas

Hlavními výhodami optického 3D skenování jsou plynulé a rychlé měření tvarově složitých objektů, získání reálného 3D modelu, v jednom okamžiku nasnímání až milionů dat, přesnost měření až 0,01 mm, flexibilita v měření (lze současně měřit různé rozměry), nezávislé na tuhosti, hmotnosti a teplotě součástí.

Přesnost tohoto přístupu měření není možné jasně kvantifikovat a vždy se musíme uspokojit s výsledky, které vzejdou na základě srovnávacích analýz. Pro optické skenery obecně neexistují žádné přísně stanovené specifikace k nejistotám měření. Proto je běžné, že výrobci těchto zařízení si vyrábějí své vlastní standardy (Obrázek 25) a jejich přesnost si následně nechávají ověřovat v různých metrologických laboratořích na laboratorních etalonech (Obrázek 26). Použité etalony bývají ideálně geometrických tvarů, a to například sférických.



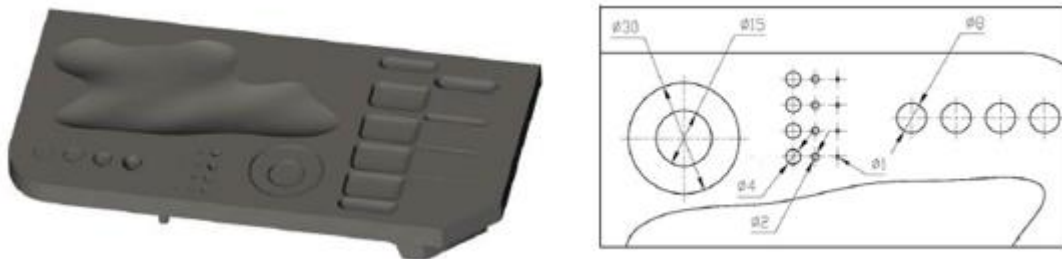
Obrázek 25: Kalibrační artefakty dle VDI/VDE [27].



Obrázek 26: Příklad kalibračního etalonu, dle VDI/VDE 2634 části 2 a 3 [24].

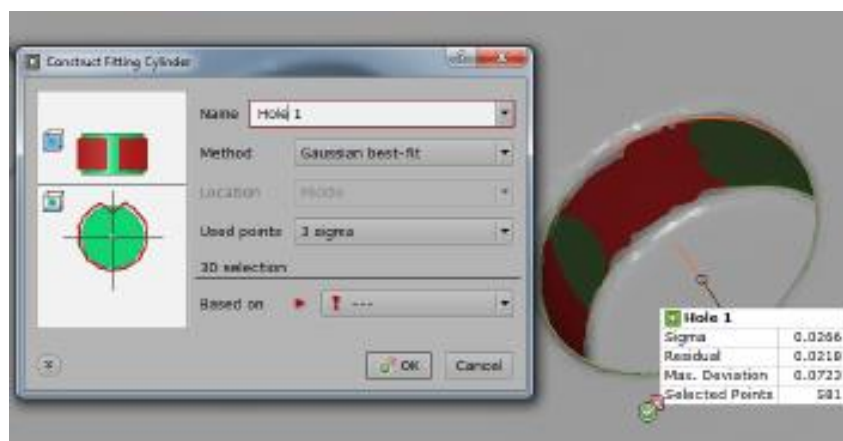
Výrobci těchto zařízení je na trhu celá řada. Velice populární je systém ATOS (Advanced Topometric Sensor) společnosti GOM. Tento mobilní systém, je optický měřicí systém, jehož proces měření je založen na principech optické triangulace, fotogrammetrie a metody promítání úzkých pásů světla na trojrozměrně tvarovaný povrch (Fringe Projection). Vzniklé deformace vzoru vlivem geometrie objektu jsou zaznamenány jednou nebo více CCD kamerami. Nejdůležitějším prvkem celého systému je optický 3D skener, který se skládá z projektoru, dvou kamer a řídicí jednotky. Výběrem vhodné optiky definujeme velikost 3D oblasti, respektive její objem, ve které bude 3D objekt skenován. Při měření se buď otáčí celý skenovací systém okolo měřeného dílu nebo se pomocí rotačního stolku otáčí skenovaný předmět. Také je možné celý systém upnout na robotické rameno. Tato aplikace je hojně využívána v automobilovém průmyslu. Toho lze využít právě v plně automatizovaném průmyslu.

Systémy ATOS jsou známy především svou vysokou výkonností, velkým rozlišením a širokou flexibilitou měřicích rozměrů umožňující přesnou a efektivní kontrolu kvality výroby, dále ukládáním optimalizovaných dat z designových aplikací, skenování například poškozených tvarových vložek a celých sestav lisovacích nástrojů a vstřikovacích forem. Nejširší využití má systém ATOS v oblastech CAD, CAM a FEM, kde je vyžadováno měření reálných objektů nebo normálů, viz Obrázek 27, kde jsou okótovány nominální rozměry otvorů.



Obrázek 27: Model normálu [30].

Získaná data naměřených otvorů u těchto systémů ATOS jsou dále vyhodnocována v softvérovém prostředí GOM Inspect Professional (Obrázek 28) K vyhodnocování se používají stochastické metody, a to obvykle metody konečných čtverců pomocí Gaussova nejlepšího přizpůsobení pro 3σ



Obrázek 28: Fitování vnitřního rozměru válcové díry (GOM Inspect Professional software) [29].

Jak již bylo zmíněno výše, je celá řada výrobců těchto systémů. Výběr předních výrobců s běžně uváděnými parametry a jejich srovnání, je vidět v Tabulka 2.

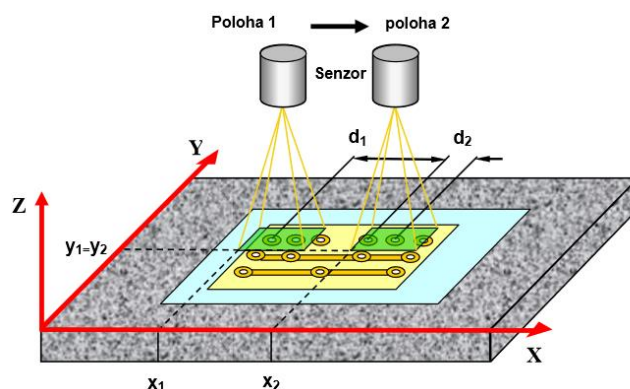
Tabulka 2: Porovnání komerčních optických 3D skenerů.

Výrobce	Výrobek	Přesnost [mm]	Měřitelný objem	Rychlost
GOM	Atos II	0,005–0,02	5×28×20 mm až 1200×960×960 mm	1 300 000 bodů za 7 s
Breuckmann	OptoTOP-HE100	0,015	80×60×50 mm	1 300 000 bodů/s
Breuckmann	OptoTOP-HE600	0,050	480×380×300 mm	1 300 000 bodů/s
Genex	EI3D Digitizer	0,025-0,25	59×48×32 mm	442 368 za <1 s
			až	
			250×200×200 mm	
Optotechnik	Comet C50	0,02	45×35 mm	6 666 bodů/s
Optotechnik	Comet C400	0,07	420×340 mm	6 666 bodů/s

3.3

3.3 Měřicí mikroskopy a projektory

Souřadnicové 3D měřicí stroje se používají k měření geometrických částí fyzických objektů, jako je průměr (vnější, vnitřní), sklon, přímost a také úhel. Výsledky těchto měření je možné vynést do grafu nebo do tabulek. Většina těchto měřicích zařízení má jako základ kartézský systém uspořádání os vybaveným lineárním odměřováním. Měřicí pojezdy se mohou v osách (X, Y) ovládat buď to ručně anebo jsou poháněny krokovými motory. Na svislé ose Z (pinola), bývá obvykle umístěn senzor k snímání měřených bodů. U bezdotykového měření jsou to optoelektrické senzory. Tyto senzory mají vlastní, většinou 2D oblast měření. V případě takovýchto senzorů je možné současně měřit více bodů na jednom geometrickém objektu bez nutnosti přejíždění v souřadnicových osách. Tento způsob se nazývá *měření v obraze*. Naopak je tomu v případě, pohybuje-li se senzor mezi dvěma měřenými body, pak se jedná o způsob *měření na obraze* (Obrázek 29).

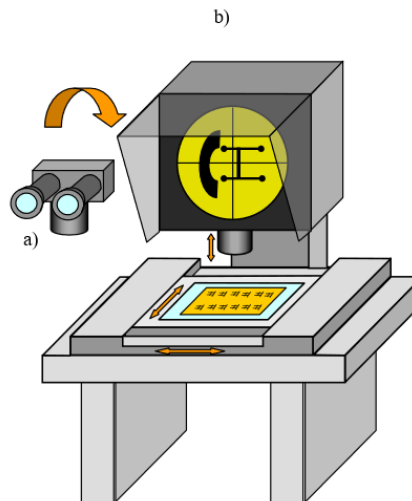


Obrázek 29: Měření v obraze a měření na obraze [30].

Předchůdcem souřadnicových měřících strojů je mikroskop. Ve funkci senzoru byla sestava mikroskop s lidským okem. Operátor pomocí nitkového kříže, který je integrovaný do dráhy paprsků zaměří měřené body objektu a odečte tak souřadnice. Velkou nevýhodou je to, že operátor vizuálním najížděním na měřené body výrazně ovlivňuje výsledky měření (subjektivní měření). Zařízení této konstrukce se používají jen pro jednodušší měřící úkony. Zejména tedy ve 2D oblasti měření, nebo pro rychlé orientační měření. V dnešní době se u moderních měřících mikroskopů vyhodnocují a odčítají souřadnice pomocí vyhodnocovacích počítačů.

U měřících profil projektorů (Obrázek 30) je obraz promítán v měřítku přes optiku na matnici. Pomocí průhledného kontrolního výkresu, který je také v určeném měřítku, je možné porovnání promítnuté oblasti objektu s rozměry na výkrese.

Touto technologií bylo tak možno nejjednodušeji kontrolovat více geometrických prvků. Od toho se také však odvíjely výsledky a stanoviska těchto měření. Byly zkrátka buď dobré – špatné. Opět zde hraje roli lidský faktor. Pro dosažení optimální přijatelné nejistoty měření je nutné mít optiku s mimořádně nízkým zkreslením.



Obrázek 30: Princip konstrukce měřícího mikroskopu: a) měřící mikroskop, b) profil-projektor [30].

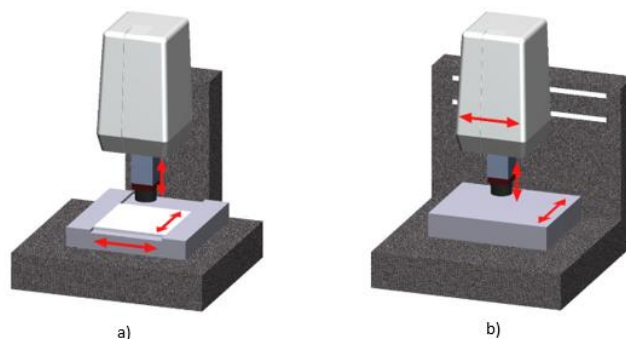
Pokrokovějším zařízením je měřící projektor (Obrázek 31), který využívá výhody profil projektoru a měřícího mikroskopu. Měřící projektor má ve svých souřadnicových osách odměřování.



Obrázek 31: Měřicí projektor (Werth OPTIMUS 300) s integrovaným optoelektronickým senzorem [31].

Současné měřicí projektory jsou vybaveny optoelektrickým senzorem (náhrada lidského oka). Tyto přístroje se pak, díky CNC (Computer Numerical Control) řízení daly automatizovat. Jejich uváděná nejistota měření se pohybovala v rozsazích několika mikrometrů.

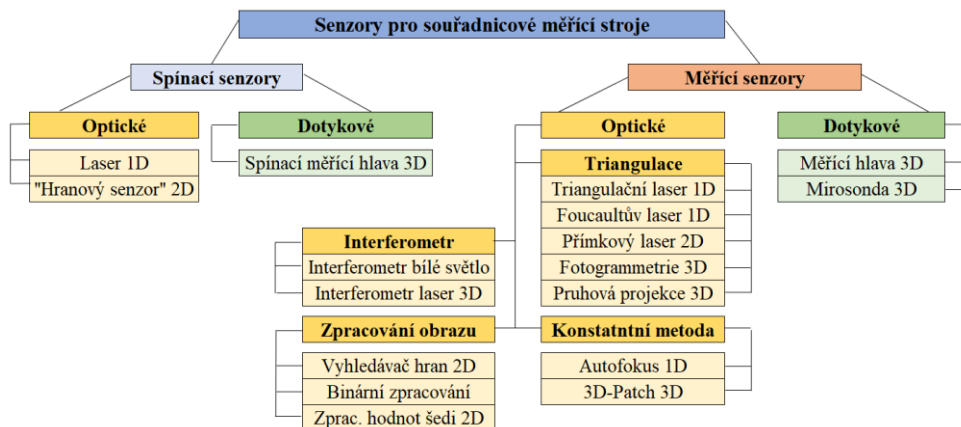
Vzhledem ke stále vyšším požadavkům na přesnost a požadavkům na širší spektrum měřicího rozsahu je nahrazeno klasické mechanické vedení konstrukce stolu systémy se vzduchovými ložisky. To má za následek daleko nižšího tření, tudíž menší síly potřebné k pohybu měřících suportů. Souřadnicové měřicí stroje s takto pohyblivým portálem jsou dnes nejčastěji používané (Obrázek 32). Souřadnicové měřicí stroje běžně používají senzory na zpracování obrazu, proto jsou do měřicího stroje integrovány vysoce výkonné automatické systémy osvětlení procházejícím a dopadajícím světlem. Nejpřesnější měřicí stroje této kategorie jsou ještě navíc vybaveny mechanickými snímacími systémy a laserovými senzory a tím se stávají multisenzorovými souřadnicovými měřicími stroji [30].



Obrázek 32: Princip konstrukce: a) stroj s křížovým stolem a b) stroj se stolem konstrukce "L" [30].

3.3.1 Sensory pro souřadnicové měřicí stroje

K zachycení primárního signálu měřeného objektu slouží senzory. Senzorů je pro souřadnicové měřicí stroje celá řada. Dělí se na dvě základní skupiny: *Spínací senzory* a *Měřicí senzory*. Ty jsou dále rozděleny dle principu snímání (Obrázek 33)

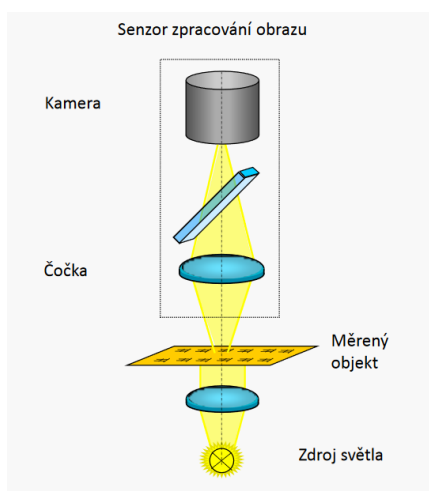


Obrázek 33: Členění senzorů dle jejich funkce [30].

V současnosti se běžné senzory v této souvislosti dělí na optické a dotykové senzory. Informace o poloze měřeného bodu se na optický senzor přenáší pomocí světla. Z toho lze definovat příslušné souřadnice.

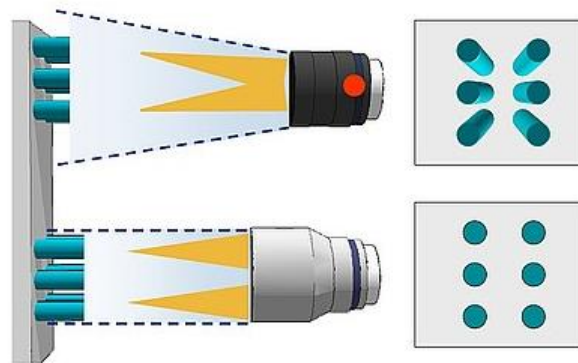
3.3.2 Snímání obrazu

Dnes se typicky používá jako vizuální senzor tzv. senzor zpracování obrazu (Obrázek 34). Měřený objekt je přes objektiv zobrazen na maticový CCD detektor a elektronikou jsou pak optické signály převedeny na digitální obraz, který se dále použije k výpočtu měřených bodů. Ve vyhodnocovacím počítači s příslušným softwarovým prostředím dojde ke zpracování obrazu.



Obrázek 34: Senzor zpracování obrazu s osvětlením procházejícím a dopadajícím světlem [32].

Výkony těchto senzorů ovlivňují různé jednotlivé součástky, jako je optika, osvětlení, čip senzoru, elektronika a algoritmus pro výpočet. Nejlepších výsledků v rámci nejmenší nejistoty měření lze dosáhnout pomocí telecentrických objektivů. Tyto objektivy jsou speciálně určeny pro strojové vidění. Charakteristickou vlastností telecentrických objektivů je, že průměr vstupního členu optické soustavy se rovná úhlopříčce zorného pole – při změně snímací vzdálenosti se úhlopříčka nemění. Z Obrázek 35 je vidět, jak jsou zobrazovány objekty standardním objektivem (horní část) a jak ten stejný počet zobrazuje telecentrický objektiv (spodní).

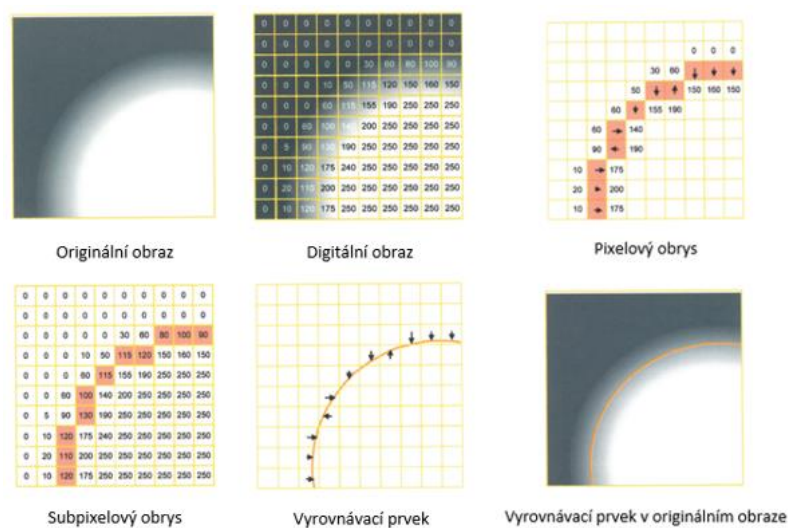


Obrázek 35: Zobrazení standardním objektivem (horní část) a zobrazení telecentrickým objektivem (spodní část) [33].

3.3.3 Zpracování obrazu

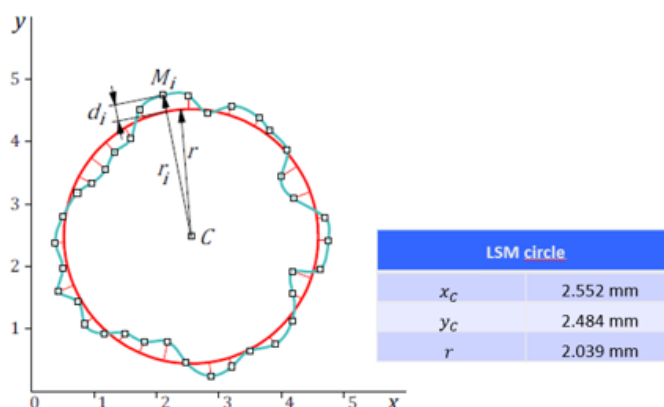
Jak již bylo zmíněno výše, tak optický signál, je elektronikou převeden na digitální obraz. K digitalizaci obrazu se nejčastěji používají CCD kamery včetně počítačových součástek pro zachycení obrazu například Frame-Grabber-Boards. Výhoda CCD kamer je lineární závislost mezi vstupním signálem (intenzitou světla) a digitálním výstupním signálem, který je potřebný pro přesné měření. Pro zpracování polohy měřených bodů z digitálních dat se používají 2 způsoby „Edge Finder-vyhledávač hran“ a zpracování obrysového obrazu.

Pro spolehlivé měření se nejčastěji používá koncepce zpracování obrysového obrazu (Obrázek 36)



Obrázek 36: Princip zpracování obrysového obrazu [30].

Senzor obrazu vidí objekt jako obraz šedi (Originální obraz), pixely hodnot šedi se převedou na digitální amplitudy (Digitální obraz), dále se z digitalizovaného obrazu vypočte pixelový nebo přesnější sub-pixelový obrys. Z obrysu se matematicky určí vyrovnávací prvek, který se zobrazí zpět do originálu obrazu. Běžnou matematickou metodou v případě kruhových obrysů (například vnitřní průměry) je přiřazení kružnice metodou nejmenších čtverců (LSM – Least Squares Method). Princip výpočtu je znázorněn na Obrázek 37.



Obrázek 37: Kružnice přiřazená metodou LSM [35].

Množinou měřených bodů $M_i = (x_i, y_i), i = 1, 2, 3, \dots, n$ se proloží kružnice se středem $C = (x_c, y_c)$ a poloměrem r tak, aby součet druhých mocnin (tedy čtverců) vzdáleností každého měřeného bodu od této kružnice byl minimální.

$$\text{Vzdálenost } d_i = r_i - r = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} - r.$$

Neznámé souřadnice středu x_c, y_c kružnice a poloměr r se naleznou pomocí kritéria (25):

$$i = \sum_{i=1}^n d_i^2 \rightarrow \min \quad (25)$$

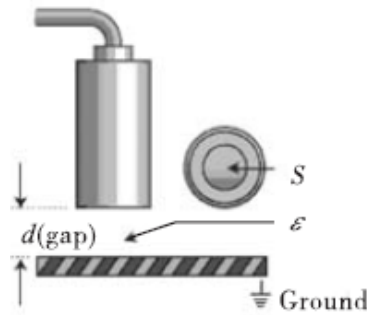
3.4

3.4 Kapacitní snímače

Do oblasti bezdotykového měření také patří měření polohy pomocí kapacitních snímačů. Tyto snímače jsou schopny bezkontaktně detekovat případně i měřit přiblížení předmětů až na několik desítek milimetrů. Hlavní předností těchto snímačů, je neomezenost detekovat předmět z jakéhokoliv materiálu [35]. Jinými slovy snímače mohou detekovat i nevodivé materiály. Což může být výhodou. V této kapitole bude popsán kapacitní snímač, kterým lze měřit rozměry vnitřních stěn otvorů, a to až rozměry dostávající se pod 3 mm. Tímto snímačem je možno měřit i hluboké díry.

3.4.1 Princip standardního kapacitního snímače

Schéma principu kapacitního snímače polohy popisuje Obrázek 38, kde je kapacitance C definována:



Obrázek 38: Princip kapacitního snímače [35].

$$C = \frac{\varepsilon S}{d} \quad (26)$$

Kde:

ε je permitivita [F/m]

S je plocha snímače [mm²]

d je vzdálenost od předmětu [mm]

Dielektrické vlastnosti mezi plochami měřeného předmětu a sondou zůstávají konstantní. Jedinou proměnnou, která způsobuje změnu kapacity je vzdálenost od předmětu d [36]. Měnicí se kapacita je převedena na lineární napětí (27), které je úměrné mezeře d .

$$U = -\frac{C_s U_s}{\varepsilon S} d = kd \quad (27)$$

Kde:

C_s je standardní kapacitance [F]

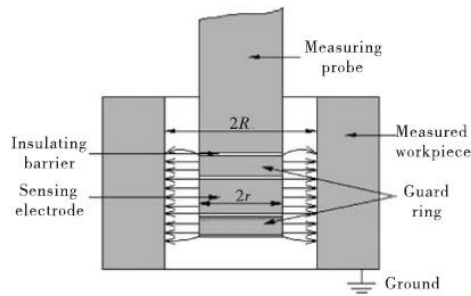
U_s je fixní amplitudové napětí [V]

U je výstupní napětí ze zesilovače [V]

k je proporční koeficient [22] [-]

3.4.2 Princip kapacitního snímače pro měření vnitřních rozměrů

K získání vysoce lineární odezvy je důležité vytvořit v mezeře mezi sondou a měřeným objektem homogenní elektrické pole. Toho lze docílit pomocí tzv. detekčních prvků („Guard ring“) které jsou součástí sondy (Obrázek 39). Tyto detekční prvky zároveň slouží k zajištění vystředění sondy uvnitř měřeného otvoru



Obrázek 39: Schéma a princip měřicí sondy. Sonda umístěna uvnitř kruhového otvoru [35].

Je-li válcový kapacitní snímač ve středu měřeného otvoru lze kapacitanci mezi měřicí sondou a předmětem vyjádřit vztahem (28).

$$C = \frac{2\pi L_m}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} = \frac{2\pi L_m}{\ln\left(\frac{r+d}{r}\right)} \quad (28)$$

Kde:

C je kapacitance mezi sondou a otvorem [F]

L_m je zasunutá délka elektrody do otvoru [m]

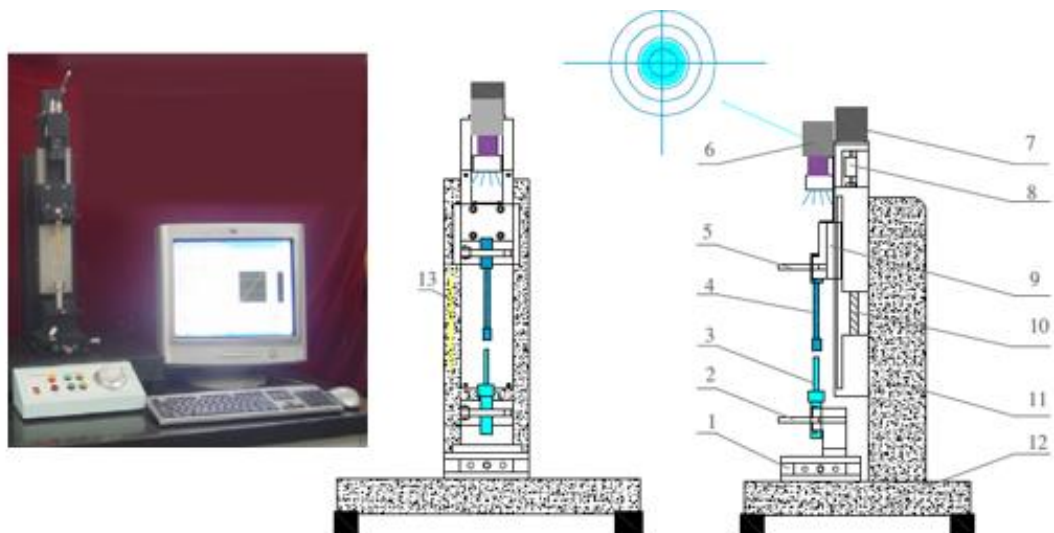
R je poloměr měřeného otvoru [m]

r je poloměr elektrody [m]

3.4.3 Aplikace snímače

Na Obrázek 40 je ukázka aplikace kapacitního snímače pro měření vnitřních rozměrů děr, kde:

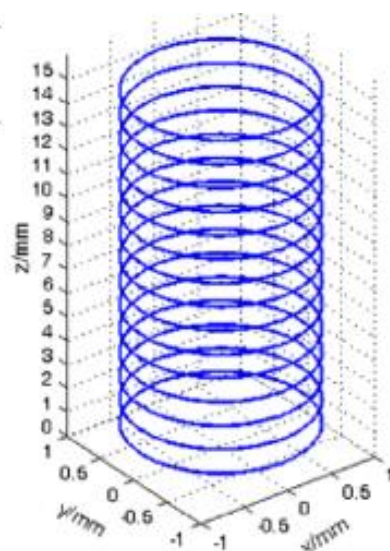
1) je X, Y polohovací zařízení; 2) je držák kapacitního snímače (sondy); 3) je kapacitní snímač; 4) je měřený vzorek; 5) je držák vzorku; 6) je CCD kamera (vizuální kontrola centřivity); 7) je krokový motor; 8) je spojka; 9) lineární posuv; 10) je vodící šroub a 11),12) je robustní rám.



Obrázek 40: Schéma aplikace při měření průměru díry [38].

Tato metoda je poměrně nová, a tudíž stále se vyvíjející. Jsou však už touto metodou dosaženy výsledky při různých experimentech (Obrázek 41), kde jsou vidět získaná data z experimentu, kde se měřil vzorek o vnitřním průměru 1,85 mm a o délce 25 mm [38].

Measurement position	Measurement value at initial position	Measurement value after revolution 90°	Average value
1	1.85746	1.85773	1.85760
2	1.85794	1.85779	1.85786
3	1.85732	1.85748	1.85740
4	1.85745	1.85726	1.85736
5	1.85782	1.85778	1.85780
6	1.85756	1.85748	1.85752
7	1.85788	1.85776	1.85782
8	1.85746	1.85729	1.85738
9	1.85733	1.85736	1.85734
10	1.85769	1.85746	1.85757
11	1.85743	1.85768	1.85756
12	1.85776	1.85757	1.85767
13	1.85738	1.85785	1.85761
14	1.85761	1.85773	1.85767
15	1.85735	1.85763	1.85749



Obrázek 41: Ukázka výsledků z měření [38].

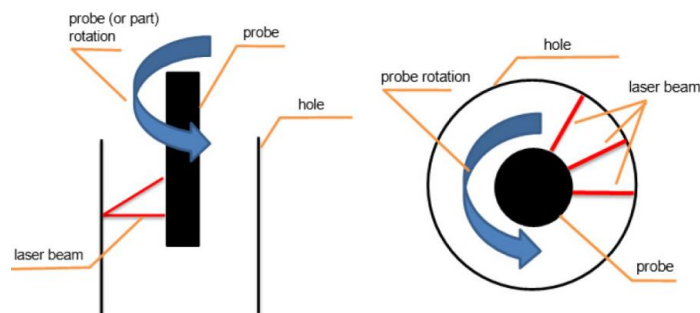
Výsledná hodnota vnitřního průměru je 1.85758 ± 0.000498 mm [38].

3.5 Triangulační laserové sondy

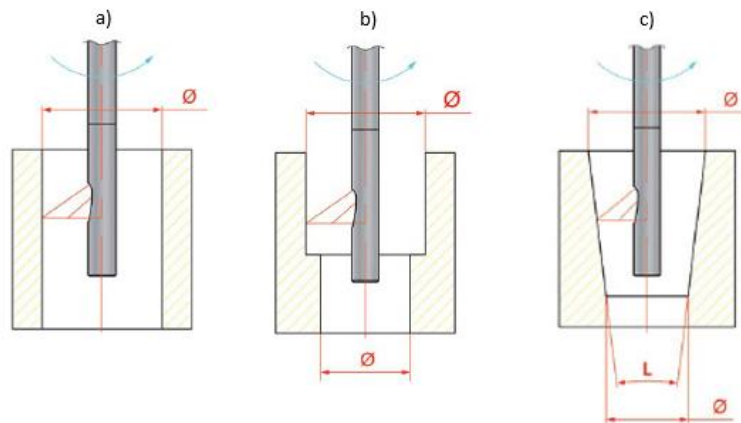
Na trhu se již v dnešní době začínají objevovat komerční přenosná zařízení, která pracují na principu aktivní triangulace a jsou určena právě k bezdotykovému měření vnitřních rozměrů děr. Jedním takových komerčních zařízení je snímač s označením RF 609 a RF609RT, který vyrábí a dodává společnost RIFTEK. Jedná se o nejmenší komerční provedení snímače pro měření vnitřních rozměrů děr, které lze na trhu zakoupit. Tímto zařízením lze bezkontaktně měřit ovalitu a vnitřní průměr.

3.5.1 Princip měření

Laserové sondy jsou určeny pro bezkontaktní měření a kontrolu geometrických parametrů otvorů nebo děr. Sonda je vložena do otvoru a je možné rotovat měřenou součástí nebo snímačem (Obrázek 42 a Obrázek 43Obrázek 43).

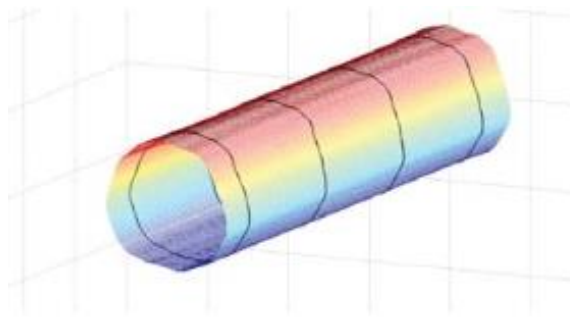


Obrázek 42: Princip triangulační laserové sondy. Měření vnitřních rozměrů děr [24].



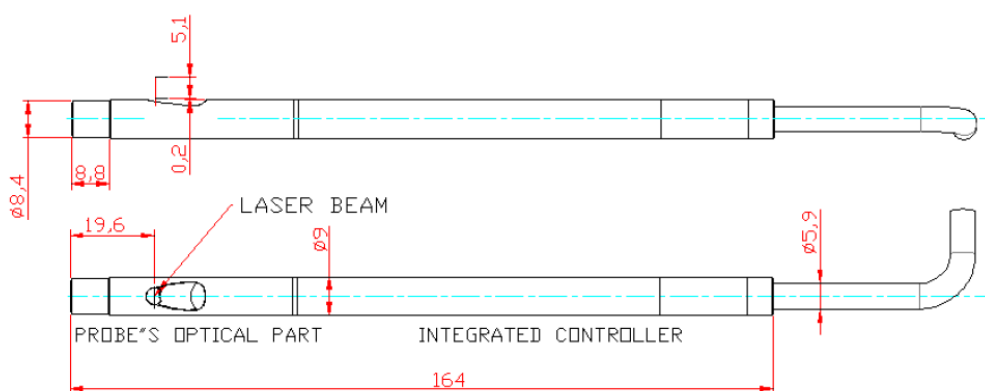
Obrázek 43: Použití triangulační laserové sondy: a) měření vnitřního průměru, b) měření dvou různých vnitřních průměrů a c) měření kónické díry [40].

Laserový triangulační senzor zabudovaný v sondě měří vzdálenost ke stěně otvoru synchronně s úhlem rotace. Triangulační laserový snímač, který je zabudován do sondy, měří vzdálenost k povrchu otvoru synchronně s úhlem otáčení. Z polárních souřadnic jsou získána data, která jsou použita pro výpočet geometrických parametrů otvoru. Pohybem sondy podél měřeného otvoru umožňuje získat geometrické parametry díry v různých částech a vytvořit tak 3D model vnitřního povrchu (Obrázek 44).

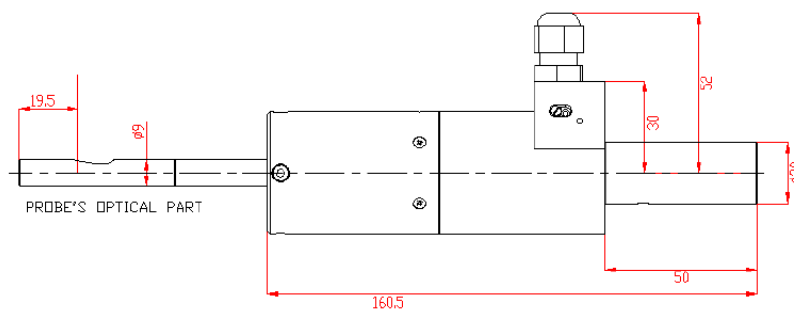


Obrázek 44: 3D model vnitřní stěny měřené součásti [41].

Výrobce RIFTEK dodává tyto senzory ve dvou provedeních, a to pod označením RF609 (Obrázek 45) a RF609RT (Obrázek 46).



Obrázek 45: Schéma měřící sondy RF609-19 [39].



Obrázek 46: Schéma měřící sondy RF09-619 Rt (rotační sonda) [39].

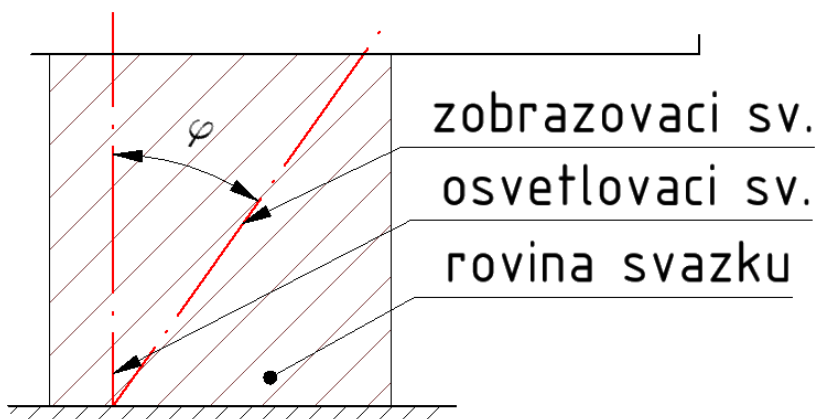
Snímač musí být umístěn tak, aby měřený objekt ležel v jeho pracovním měřicím rozsahu jeho senzoru. Měřicí rozsahy těchto zařízení se pohybují od 6,5 do 48 mm. Tyto a další základní parametry bývají většinou uvedeny v katalogích výrobce. Předností těchto zařízení, je jejich mobilita a kompaktnost. Nevýhodou je v omezení velikosti měřených předmětů. Ta je v podstatě daná průměrem sondy. Tedy nejmenší možný vnitřní průměr, který lze tímto snímačem změřit je 6,5 mm [41].

4 Popis snímače

Záměrem této diplomové práce je modifikace standardního triangulačního snímače vzdálenosti s typovým označením optoNCDT ILD 1402-5 od výrobce MICRO-EPSILON (Obrázek 47). Modifikace snímače má umožnit měření vnitřních stěn otvorů, a to řádově v jednotkách milimetrů. Koncová číslice v typovém označení snímače vyznačuje jeho měřicí rozsah v mm. Aktivní měřicí rozsah (AMR) tohoto snímače je tedy 5 mm, což je pro naše účely dostačující. Základní vnitřní systém těchto snímačů tvoří světelný zdroj (laserová dioda), zobrazovací prvek (optika) a fotocitlivý senzor (CCD nebo PSD), viz první kapitola této diplomové práce. U těchto typů snímačů není směr osy osvětlovacího laserového paprsku totožný s optickou osou čočky (Obrázek 48). Obě osy spolu svírají úhel φ a tím zároveň určují rovinu svazku snímače. Laserový svazek dopadá kolmo na měřený objekt, na jehož povrchu je zobrazen spot. Toto musí být zohledněno také pro případ měření vnitřních stěn otvorů válcového tvaru.



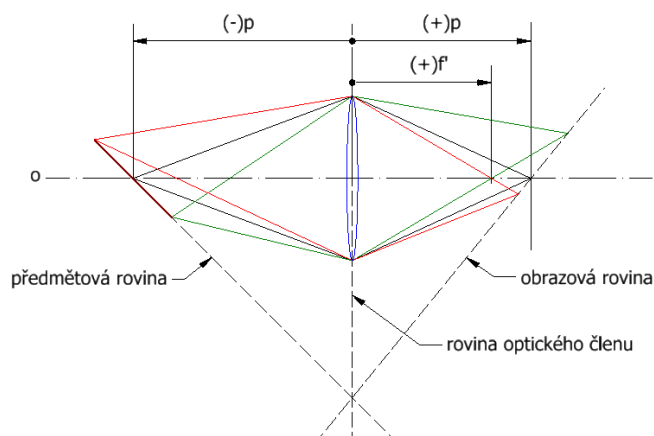
Obrázek 47: Laserový triangulační snímač ILD 1402-5 a rovina svazků svírajících úhel φ .



Obrázek 48: Znárodnění roviny obou svazků.

4.1 Funkční princip a technické údaje snímače

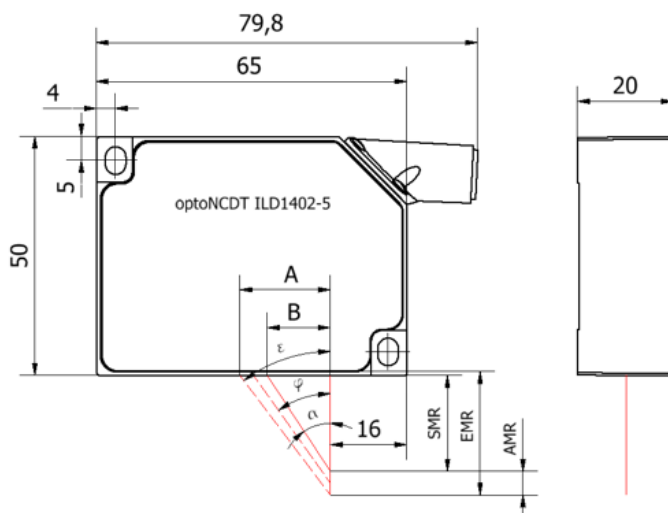
V teoretické části této práce, již bylo zmíněno, že tyto senzory využívají princip optické 1D triangulace. V závislosti na vzdálenosti je difúzní frakce odrazu tohoto světelného spotu poté čočkou zobrazena na fotocitlivý prvek (CCD pole). Přijímací čočka je s ohledem na optickou osu laserového paprsku nastavena do určitého úhlu. V teorii optického zobrazování v ideálních tenkých čočkách se jedná o Scheimpflugovo zobrazení, kdy rovina předmětu, rovina zobrazovacího optického členu a rovina obrazu nejsou vůči sobě paralelní (Obrázek 49).



Obrázek 49: Snímače pracují na principu Scheimpflugova zobrazení.

Řídící jednotka měřenou hodnotu vypočítává na základě pozice obrazu spotu na CCD poli a intenzity signálu. Snímač optoNCDT ILD 1402-5, je dále vybaven indikační světelnou diodou, která indikuje stav v daném aktivním měřicím rozsahu (AMR) zelenou barvou, stav mimo AMR červenou barvou a stav ve středu AMR oranžovou barvou.

Základní technické údaje snímače optoNCDT ILD 1402-5 snímače popisuje Obrázek 50, kde jsou také uvedeny jeho základní stavební rozměry.



Obrázek 50: Počátek a konec aktivního měřicího rozsahu. SMR začátek měřicího rozsahu a EMR konec měřicího rozsahu snímače.

Výrobce ve specifikacích uvádí také hodnoty úhlu, mezi osvětlovacím a zobrazovacím svazkem, viz Tabulka 3. Tyto hodnoty jsou různé pro jednotlivá typová označení snímačů. Detailnější technické údaje jsou uvedeny přímo v katalogu nebo na webových stránkách výrobce.

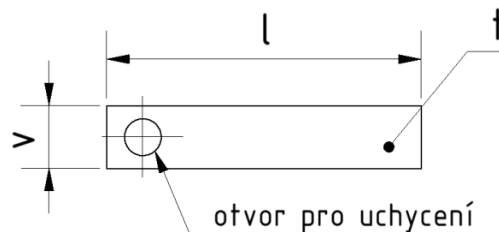
Tabulka 3: Technické parametry snímače optoNCDT ILD 1402-5.

AMR	SMR	EMR	α	φ	ε	A	B
[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[°]	[°]	[mm]	[mm]
5	20	25	33,5	35,5	37,1	18,9	13,2

5 Analýza vlastností snímače

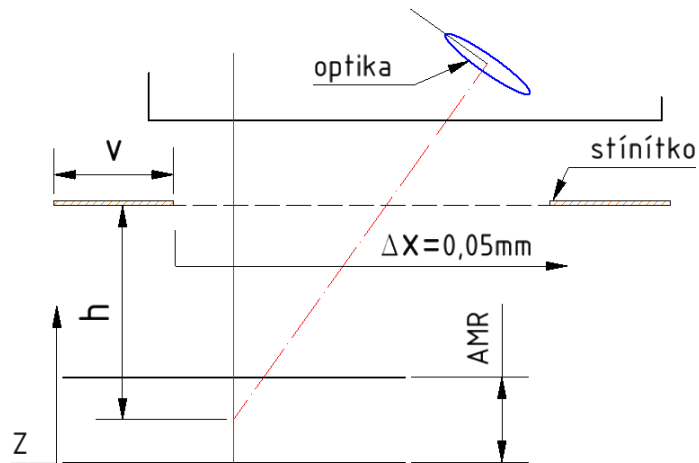
V úvodu této kapitoly, byly stanoveny požadavky na konstrukci nástavce. Jedním z požadavků je, aby nástavec nestínil osvětlovacímu a zobrazovacímu svazku laseru. Před samotnou konstrukcí nástavce jsme tedy museli provést analýzu snímače v jeho rovině svazků. V této rovině leží jak osvětlovací, tak i zobrazovací svazek, viz Obrázek 48. Provedli jsme experiment, při kterém byly oba svazky jednotlivě zastiňovány. Pro zastínění osvětlovacího svazku, bylo nutné zvolit takové stínítko, aby splňovalo optimální tuhost a zároveň jeho tloušťka odpovídala zhruba tloušťce nožové hrany. Šířka stínítka musí být zvolena tak, aby zcela zakryla zorné pole optiky snímače, viz Tabulka 3 parametry A a B . Jako optimální přípravek se osvědčila ocelová planžeta (Obrázek 51) o tloušťce $t = 0,2 \text{ mm}$ a šířce $v = 7 \text{ mm}$ a zvolené délky $l = 30 \text{ mm}$. Stínítko bylo ve výšce $h = 17,095 \text{ mm}$ od měřeného povrchu. Rozměr v musí splňovat podmínku:

$$v \geq A - B \quad (29)$$



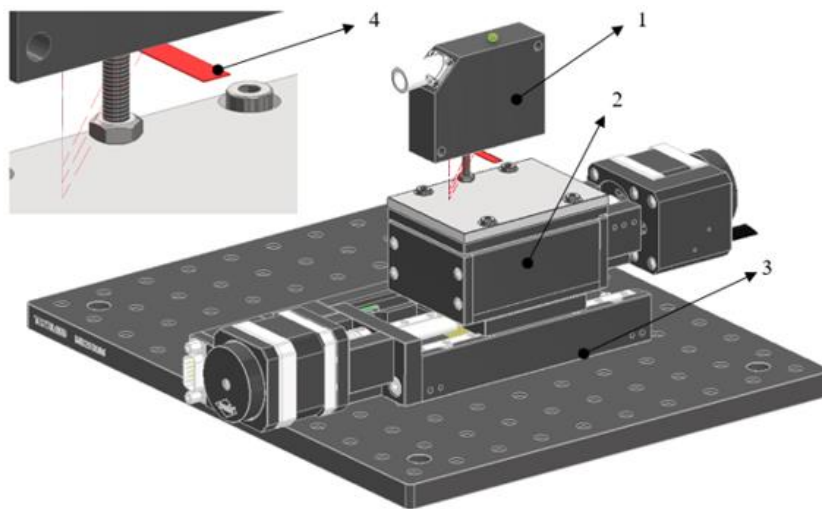
Obrázek 51: Přípravek pro zastiňování laserového svazku a optiky snímače (ocelová planžeta).

Schéma experimentu se zastiňováním svazku a optiky snímače ilustruje Obrázek 52. Zastiňování jsme provedli ve třech bodech AMR, a to v jeho krajních polohách a uprostřed. Krok ve směru osy x , byl zvolen $0,05 \text{ mm}$ a čas snímání $t = 1 \text{ s}$, kdy v tomto čase bylo odečteno 50 hodnot a z nich pak vypočítán aritmetický průměr. Cílem analýzy získaných dat, bylo definovat aperturní clonu optiky snímače a také mezní oblasti v blízkosti osvětlovacího svazku. Jinými slovy, aby bylo možno detekovat taková místa v blízkosti svazku a optiky, která již mohou ovlivňovat měření.



Obrázek 52: Schéma experimentu.

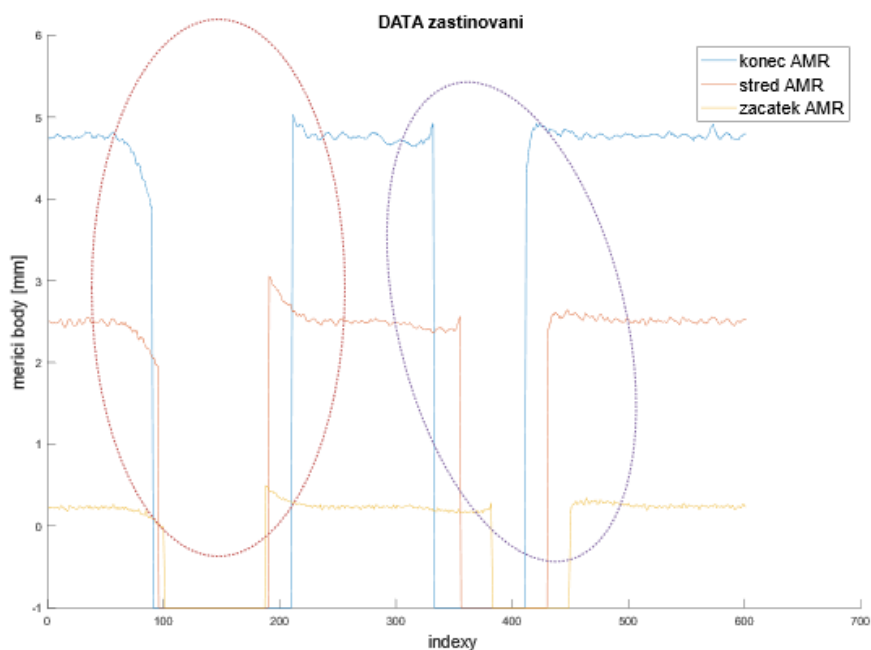
Celý experiment probíhal zcela autonomně. Byly použity motorizované precizní lineární posuvy OWIS (Obrázek 53), které bylo možno softwarově ovládat, a to díky systémovému prostředí LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench).



Obrázek 53: Realizace experimentu s detailním pohledem na stínítko: 1) optoNCDT 1402-5, 2) polohovací stoleček osa Z, 3) polohovací stoleček osa X, 4) stínítko (detail).

S tímto softwarem je také spojena kompatibilita snímače optoNCDT ILD 1402-5, bylo tedy možné současně zapisovat a ukládat naměřená data. Naměřená data byla uložena ve formátu „xx.JSON“ (JavaScript Object Notation), se kterými bylo dále možno pracovat v prostředí MATLAB (matrix laboratory).

Výsledné naměřené hodnoty byly vyneseny do grafu (Obrázek 54).

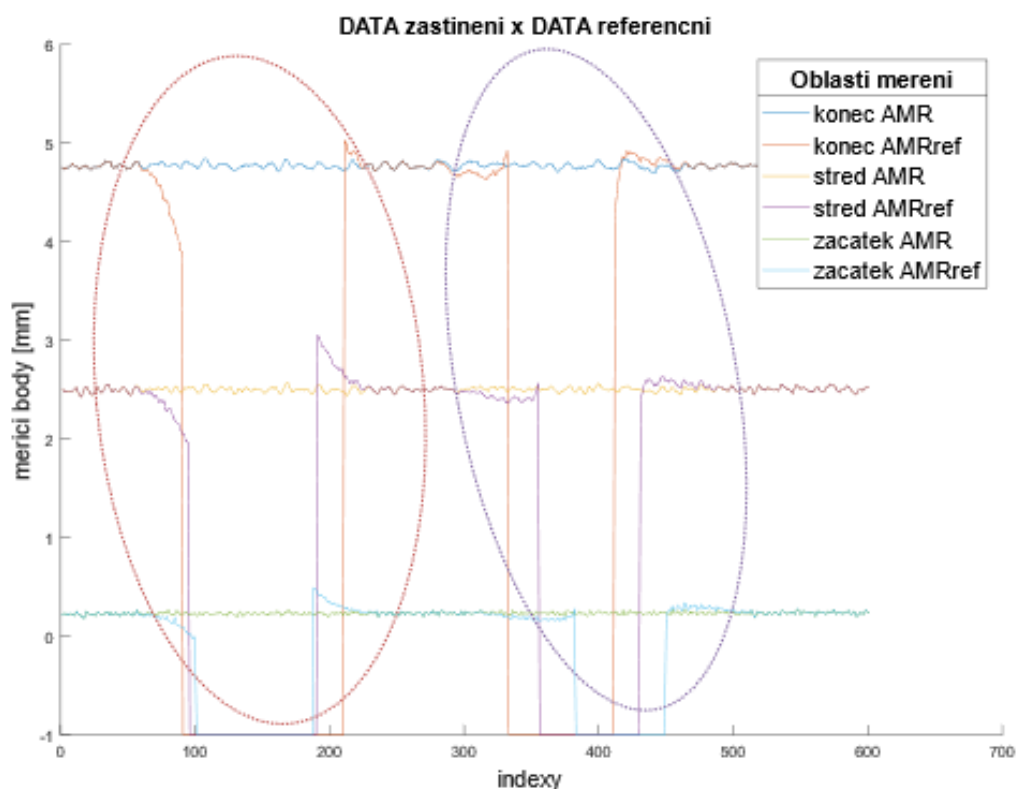


Obrázek 54: Získaná data z měření snímačem ve třech bodech AMR, při zastínování laseru a optiky.

V grafu (Obrázek 54) jsou vyznačeny oblasti, kdy je laser a optika zcela zastíněny. Hodnota -1 na ose y v grafu znamená, že snímač je mimo měřící oblast AMR, to znamená, že na CCD snímači není promítnut obraz světelného spotu laseru „optika nic nevidí“. Čárkovanou červenou čarou je oblast osvětlovacího svazku a fialová čárkovaná čára hraničí zastíněnou oblast viditelného pole optiky.

Díky těmto výsledkům, jsme již mohli vizuálně stanovit, kde zhruba budou kritické oblasti v blízkosti laseru a ve viditelném poli optiky. Také je vidět, jak snímač reaguje na stínítka vůči jeho poloze v rovině svazku.

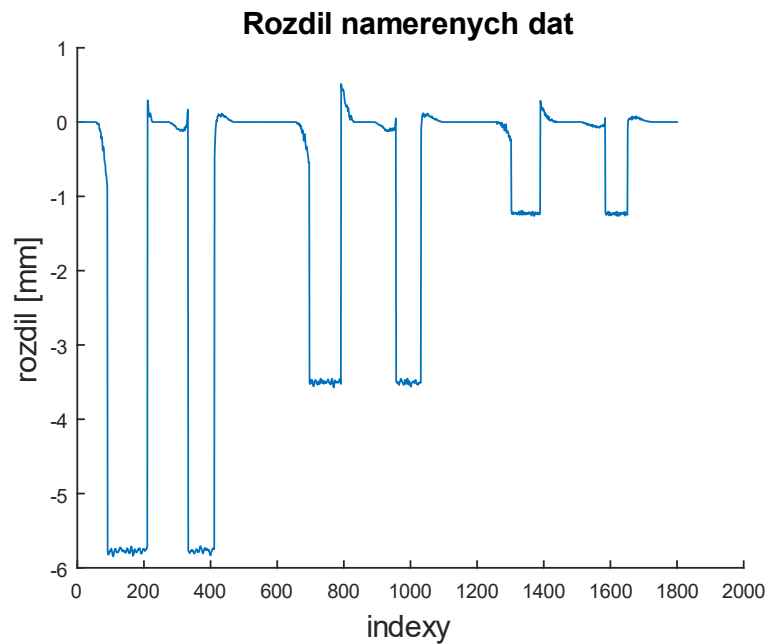
K tomu, abychom přesně určili kritická místa, kdy dochází k ovlivnění měření způsobené stíněním, bylo nutno experiment provést znovu, a to bez zastínování. Tím získáme tzv. referenční hodnoty, a tak bude možné dále porovnat odchylky od naměřených dat. Měření jsme provedli ve stejných měřících bodech a podmínkách jako při použití stínítka. Porovnání referenčních hodnot s hodnotami naměřenými při zastínování jsou vyneseny do grafu (Obrázek 55). Čárkovanou červenou čarou je oblast osvětlovacího svazku a fialová čárkovaná čára hraničí zastíněnou oblast viditelného pole optiky. V těchto označených oblastech je již vidět, kdy a v jakém místě vnášíme do měření chybu stíněním, která se projevuje odchýlením od referenční hodnoty.



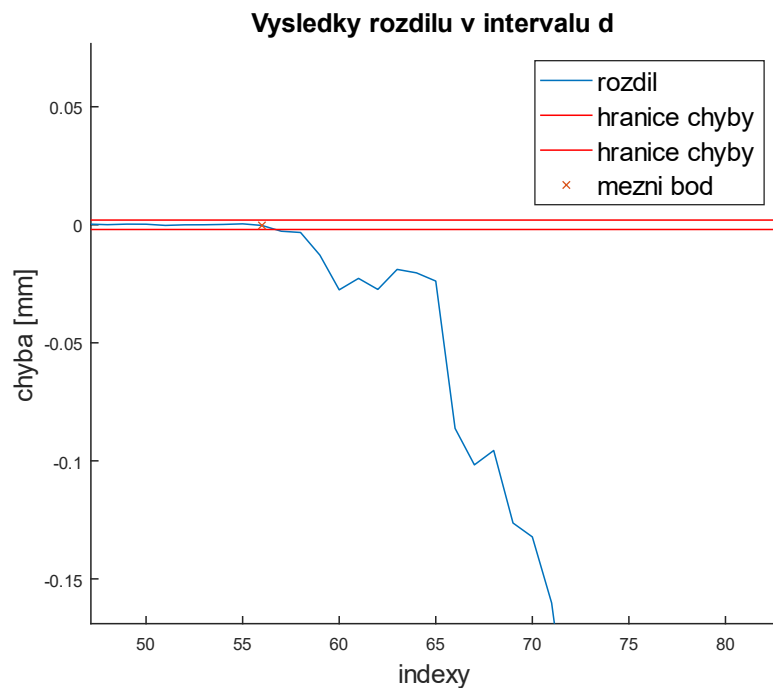
Obrázek 55: Průběh měření při a bez zastiňování snímače.

5.1 Stanovení nejistoty měření snímače

Volbou chyby měření $d = \pm 0,002 \text{ mm}$, kterou si stanovíme je možné získat směrodatnou odchylku 3σ . Směrodatnou odchylku určíme z rozdílu naměřených hodnot (Obrázek 56), jehož výsledek je menší nebo roven zvolené chybě d (Obrázek 57). Z této skupiny získaných výsledků vypočteme aritmetický průměr a z tohoto průměru pak směrodatnou odchylku. Tím získáme nejistotu měření polohy v důsledku vlastních systémů snímače.



Obrázek 56: Výsledné hodnoty rozdílů naměřených dat.



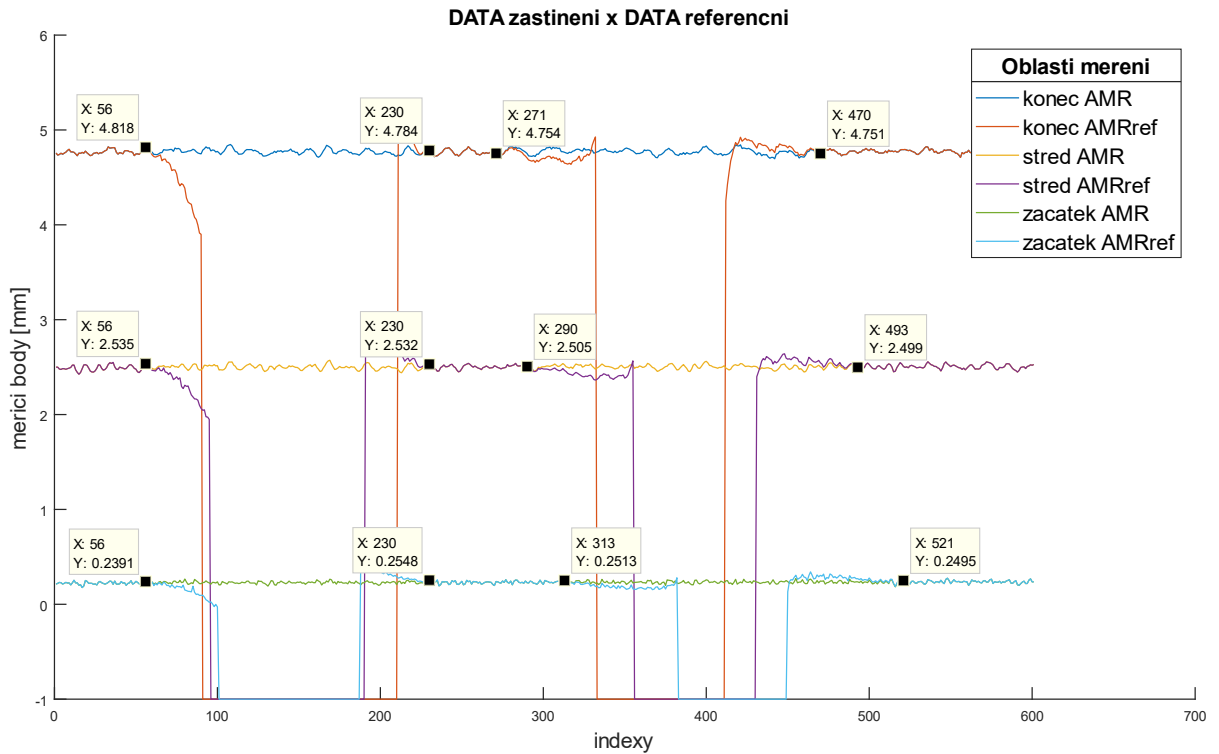
Obrázek 57: Výběr hodnot, ležících v intervalu zvolené chyby.

Výpočet směrodatné odchylky, byl proveden v systémovém prostředí MATLAB a získaná hodnota směrodatné odchylky 3σ při zvolené chybě $d = \pm 0,002 \text{ mm}$, je:

$$3\sigma = 0,0016 \text{ mm}$$

Ve chvíli, kdy výsledný rozdíl dat při stínění s referenčními bude větší než 3σ , tak to už je chyba. Na Obrázek 55 je zároveň vyznačeno místo (červený křížek), kde ještě nedochází k ovlivnění měření vlivem stínění.

Z těchto okrajových bodů, lze již stanovit mezní oblasti osvětlovacího svazku a optiky (Obrázek 58).



Obrázek 58: Označení mezních bodů.

5.1.1 Mezní poloha stínítka od osy osvětlovacího svazku

Poloha stínítka od osy osvětlovacího svazku z naměřených dat získáme dle vztahu (30). V této poloze hrana stínítka již ovlivňuje měření a začíná „řezat“ osvětlovací svazek.

$$a = \frac{(X_{(index)} - X_{(index)}) \cdot x - v}{2} = [mm] \quad (30)$$

Kde:

$X_{(index)}$, je horizontální poloha hrany stínítka v daném měřícím bodě

x , je krok v horizontálním směru

v , je šířka stínítka

a , je poloha stínítka od osy osvětlovacího svazku

5.1.2 Mezní poloha stínítka v zorném poli optiky snímače

Polohy stínítka v oblasti zorného pole optiky snímače ve třech měřících bodech AMR určíme dle vztahu (31) a (32).

$$a_{(i)\bar{y}} = x \cdot (X_{(index)} - X_{56}) = [mm] \quad (31)$$

$$a_{(m)\bar{y}} = x \cdot (X_{(index)} - X_{56}) - v = [mm] \quad (32)$$

Kde:

$X_{(index)}$, je horizontální polohy hrany stínítka v daném měřícím bodě

x , je krok v horizontálním směru

v , je šířka stínítka

$a_{(i)\bar{y}}$, $a_{(m)\bar{y}}$, je horizontální poloha stínítka v zorném poli AC

Dosazením do získaných dat do vztahů (30), (31) a (32), jsme získali polohy mezních bodů, ve kterých již začíná ovlivňování měření v důsledku polohy stínítka. (Tabulka 4).

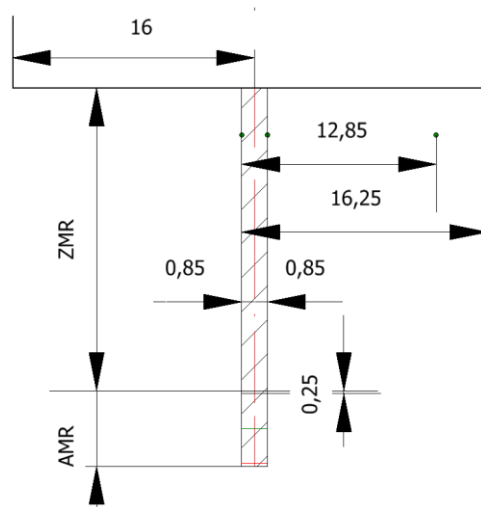
Tabulka 4: Výsledné hodnoty mezních bodů z naměřených dat.

Měřící body vertikální poloha	Osvětlovací svazek	Zorné pole optiky snímače	
	horizontální poloha	Horizontální poloha	
\bar{y} [mm]	a [mm]	$a_{(i)}$ [mm]	$a_{(m)}$ [mm]
4,78	0,85	10,75	13,7
2,58	0,85	11,7	14,85
0,25	0,85	12,85	16,25

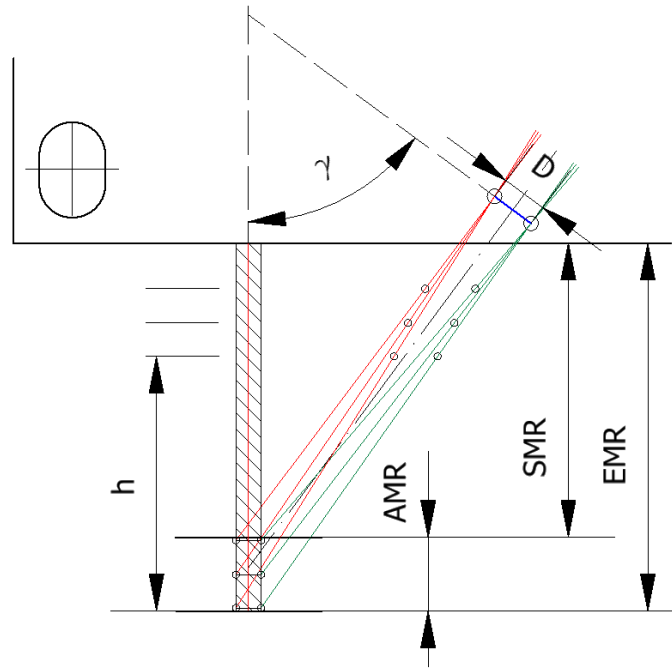
5.1.3 Krajní oblasti volného prostoru snímače

Takto získané hodnoty lze postupně přenést do geometrického zobrazení snímače (Obrázek 59), kde je ukázka vynesení výsledných hodnot, viz Tabulka 3 pro konkrétní měřicí bod $\bar{y} = 0,25 \text{ mm}$.

Stejným postupem jsme vynesli výsledné hodnoty všech zbylých měřících bodů. Následným proložením přímek, které procházely jednotlivými body, jsme dostali jejich společné dva průsečíky (Obrázek 60), kterými lze definovat rozměr aperturní clony (AC). Takto jsme získali kompletně geometrický představu jak o mezích ohraničení osvětlovacího svazku, tak i informaci o velikosti AC $D = 3,08 \text{ mm}$ a poloze $17,95 \text{ mm}$ od laserového osvětlovacího svazku. Mimo rozměr aperturní clony, dále víme, jaký úhel svírá rovina aperturní clony s osou osvětlovacího svazku $\gamma = 53,6^\circ$. Tímto získáváme představu o vnitřním systému snímače.

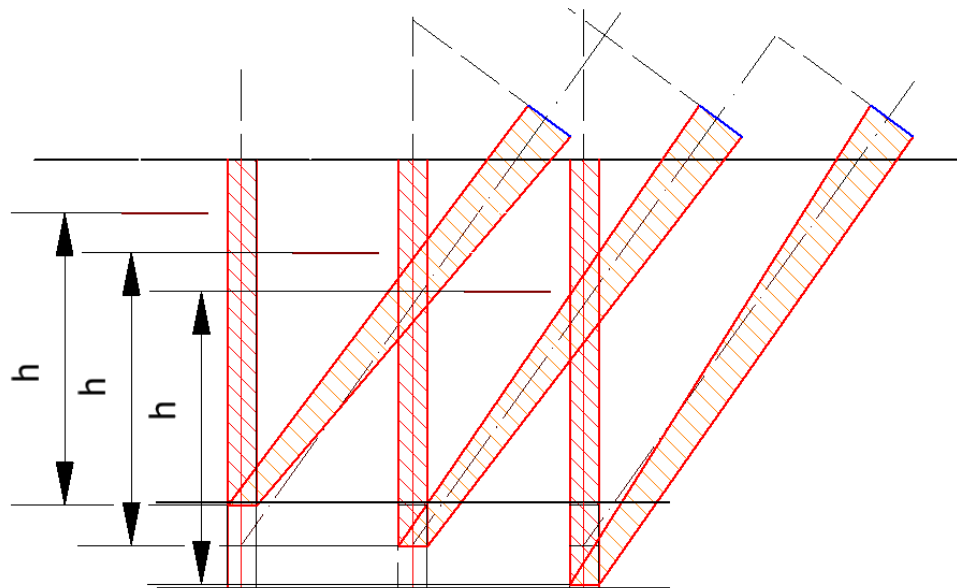


Obrázek 59: Postup vynesení získaných bodů do geometrie snímače v konkrétním měřícím bodě.



Obrázek 60: Proložení přímek přes body v optickém poli snímače.

Díky známé velikosti aperturní clony, lze nyní definovat krajní oblasti volného prostoru snímače. Geometrickou podobu tohoto vymezení oblastí (šrafovaná oblast) pro naše měřicí body znázorňuje Obrázek 61. V obrázku jsou vidět šrafovaná pole a dojde-li k jejich narušení ve smyslu stínění, pak jsou výsledky měření tímto „zásahem“ ovlivněny. Tuto skutečnost je NUTNO zohlednit při návrhu nástavce



Obrázek 61: Limitní oblasti volného prostoru.

5.2 Analýza snímače při změně vertikální polohy

Teoretický model snímače a jeho princip popisuje Obrázek 16 a vztah (23), viz kapitola 1. Při změně vertikální polohy o hodnotu Δx [mm] vůči referenční poloze snímače se projeví změna pozice zobrazeného spotu na přední rovině CCD detektoru o $\Delta x'$ [mm]. U tohoto typu snímače je použit lineární CCD detektor o velikosti 128 [px]. Polohu spotu na čelní rovině CCD detektoru lze vyjádřit modelem, respektive vztahem (33), který je odvozen ze vztahu (23).

$$\Delta x' = \frac{\Delta x \cdot l \cdot \sin \alpha}{L \cdot \sin \beta - \Delta x \cdot \sin(\alpha + \beta)} \quad (33)$$

Kde:

$\Delta x'$, je poloha zobrazeného spotu na čelní rovině CCD detektoru [mm]

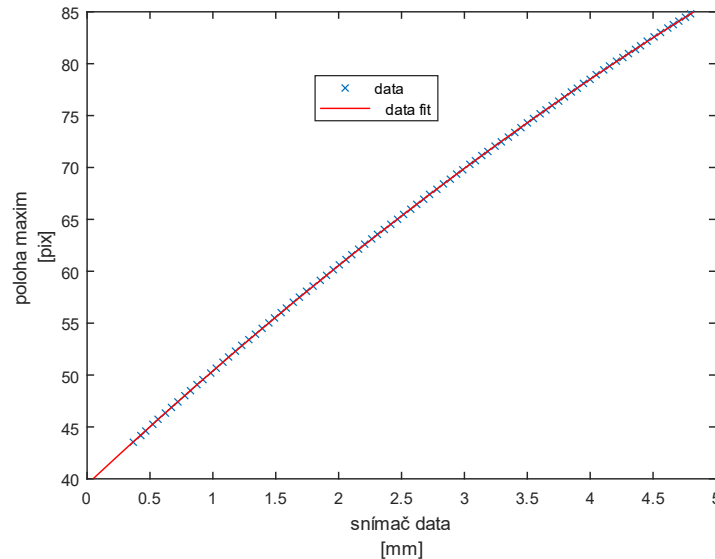
L , je vzdálenost CCD detektoru od zobrazovací optiky snímače [mm]

l , je vzdálenost zobrazovací optiky od spotu na povrchu měřeného objektu [mm]

α , je úhel mezi osou osvětlovacího svazku a zobrazovacího svazku [°]

β , je úhel, který svírá rovina detektoru se zobrazovacím paprskem [°]

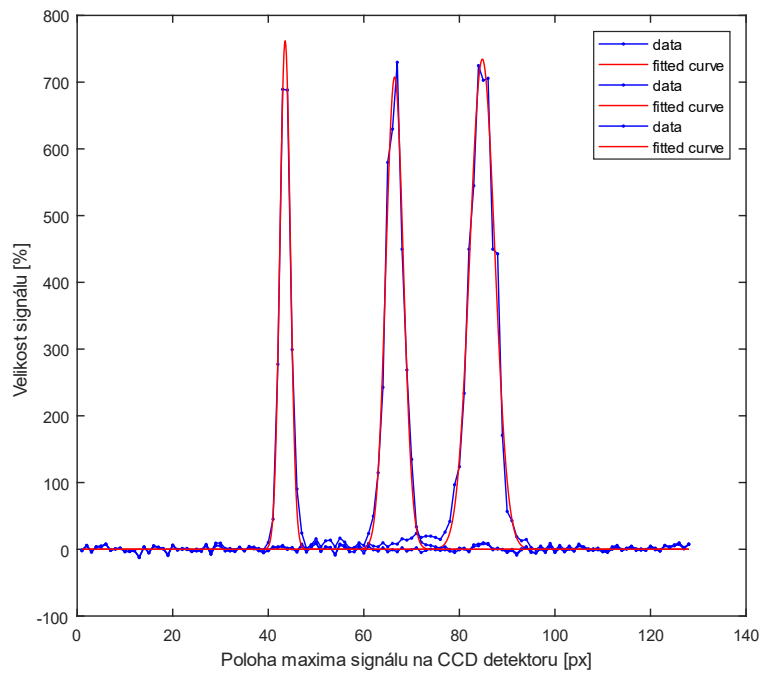
Provedli jsme měření snímačem ve vertikálním směru v jeho AMR. Tím jsme získali naměřená data vertikální polohy, které odečítal laserový snímač a polohy jednotlivých maxim signálu na diodovém poli CCD detektoru $y = px$, (Obrázek 62).



Obrázek 62: Naměřená data. Závislost vertikálního posuvu snímače a polohy spotu na diodovém poli CCD.

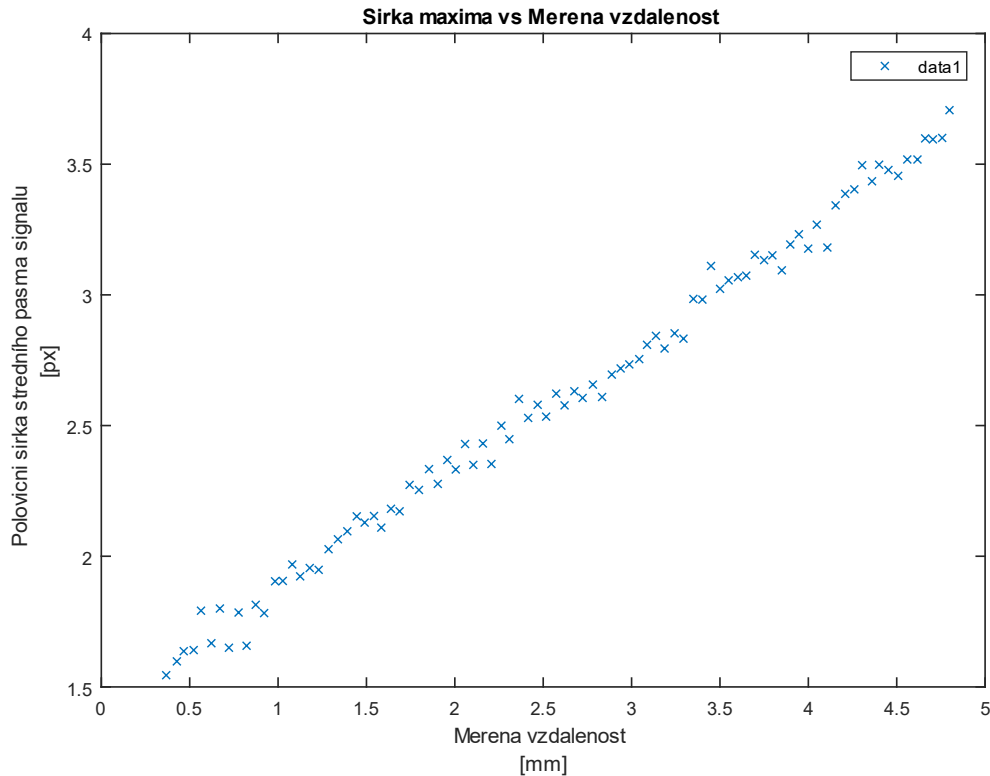
Z grafu je zjevné, že se nejedná o lineární závislost. Také lze vidět, že citlivost detektoru není využita v jeho celém rozsahu 128 [px]. Aktivní rozsah diodového pole detektoru je od 43 do 85 [px]. Zobrazení signálů a jeho polohu na diodovém poli popisuje Obrázek 63. Modrou barvou jsou hodnoty udávané CCD detektorem a červenou barvou je Gaussovou funkcí

provedeno proložení jednotlivých maxim signálu. Proložení touto funkcí bylo provedeno v prostředí MATLAB.



Obrázek 63: Zobrazení signálu na diodovém poli CCD detektoru.

Co, je dále zajímavé, že tvar, respektive poloviční šířka signálu (tzv. BANDWIDTH) není konstantní s vertikální polohou snímače. To může být dáno tím, že se při měření pohybujeme od ohniska a tím se mění také průměr spotu svazku, který je promítán na detektor. Z toho plyne, že velikost průřezu svazku je v každé poloze snímače různá a projeví se právě tvarem a velikostí signálové křivky. Závislost polohy maxima signálu na diodovém poli CCD detektoru a jeho velikosti poloviční šířky pásma popisuje Obrázek 64.

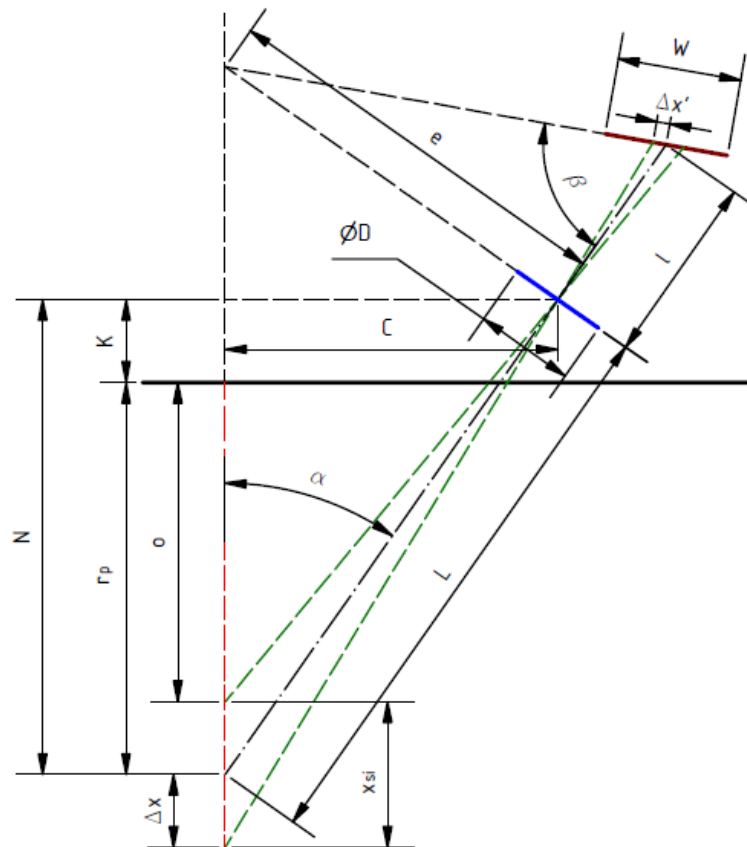


Obrázek 64: Změna poloviční šířky pásma v závislosti na vertikální poloze snímače.

5.3 Aplikace naměřených dat na modelový tvar snímače

Z předchozího experimentu při zastiňování snímače, jsme mimo jiné získali jeho referenční polohu $r_p = 22,06$ mm. K této referenční poloze je vztažen i matematický model snímače (Obrázek 65), kde $\Delta x = \Delta x' = 0$ mm. V této poloze je zobrazovací svazek ztotožněn s optickou osou zobrazovací optiky.

Ze vztahu (33), lze pak vypočítat změnu polohy spotu na přední ploše CCD $\Delta x'$. Tato hodnota je v modelovém tvaru v milimetrech a k ní maximální platné hodnoty signálu v CCD poli jsou v jednotkách pixelů. K tomu, abychom provedli porovnání mezi naměřenými hodnotami a modelem, musíme vypočtené $\Delta x'$ převést na hodnotu $y = px$. K tomuto převodu volíme parametr $m = 0,05$ mm/px čímž si zároveň definujeme velikost jednoho pixel na CCD poli.



Obrázek 65: Geometrické vyjádření referenční polohy snímače.

Hodnotu Δx lze vyjádřit vztahem (34)

$$\Delta x = x_{si} + o_f - r_p \quad (34)$$

Kde:

Δx , je vzdálenost od referenční polohy snímače.

x_{si} , je udávaná hodnota snímačem v jeho AMR.

o_f , je tzv. offsetová hodnota neboli začátek AMR (dáno výrobcem $o_f = 20 \text{ mm}$)

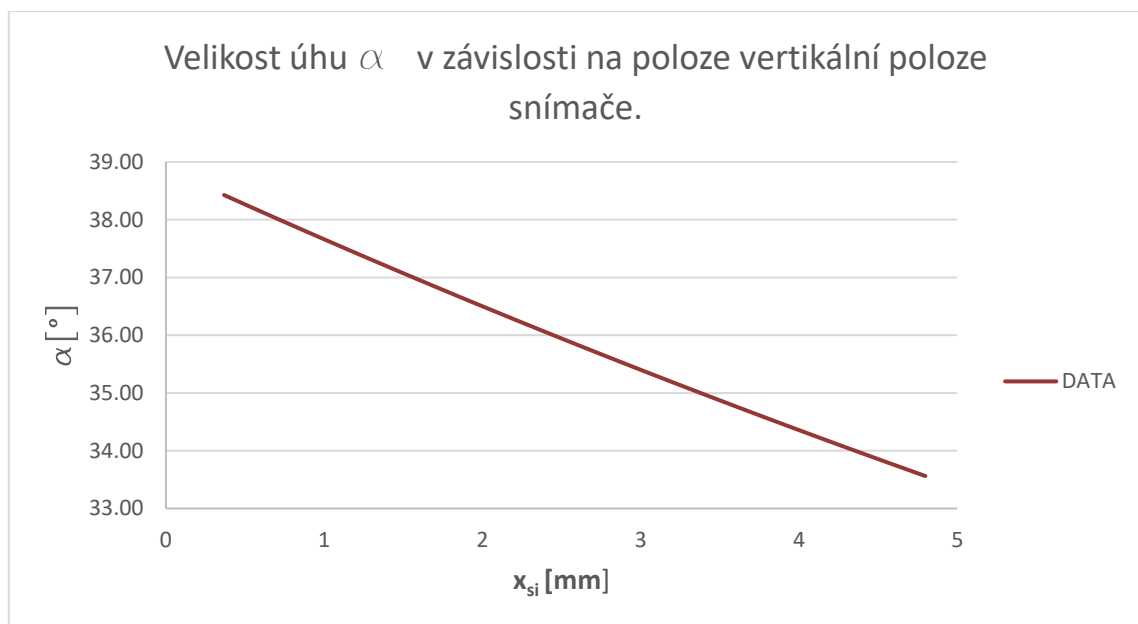
r_p , je referenční poloha snímače získaná z geometrie modelu ($r_p = 22,06 \text{ mm}$).

Jediným neznámým parametrem vnitřního systému, je vzdálenost CCD detektoru l od středu zobrazovací optiky. Ten bylo nutné si zvolit a dále ho optimalizovat tak, aby se vypočtená data z modelu přiblížila k naměřeným datům. Úhel β je funkcí l a dá se dopočítat. Parametr e je konstanta, kterou jsme získali z analýzy naměřených dat při zastiňování snímače, respektive souvisí s polohou zobrazovací optiky.

Hodnoty Δx pro krajní a referenční polohu snímače jsou uvedeny, viz (Tabulka 5). Čím menší je hodnota Δx tím blíže jsme měřeným povrchem ke snímače. V tabulce je také uvedena velikost úhlu α , která je závislá na vertikální poloze snímače (Obrázek 66). Hodnota y_{pmi} vyjadřuje polohu signálu na diodovém poli CCD získanou z měření, viz Obrázek 62 a y_{pri} je odchylka od referenční polohy signálu na diodovém poli.

Tabulka 5: Krajní polohy snímače a odchylky vůči jeho referenční poloze.

x_{si} [mm]	y_{pmi} [px]	α [°]	Δx [mm]	$\Delta x'$ [mm]	y_{pri} [px]
4,80	84,80	33,56	2,74	-1,19	-23,67
2,06	61,13	36,44	0,00	0,00	0,00
0,37	43,53	38,43	-1,69	0,88	17,60

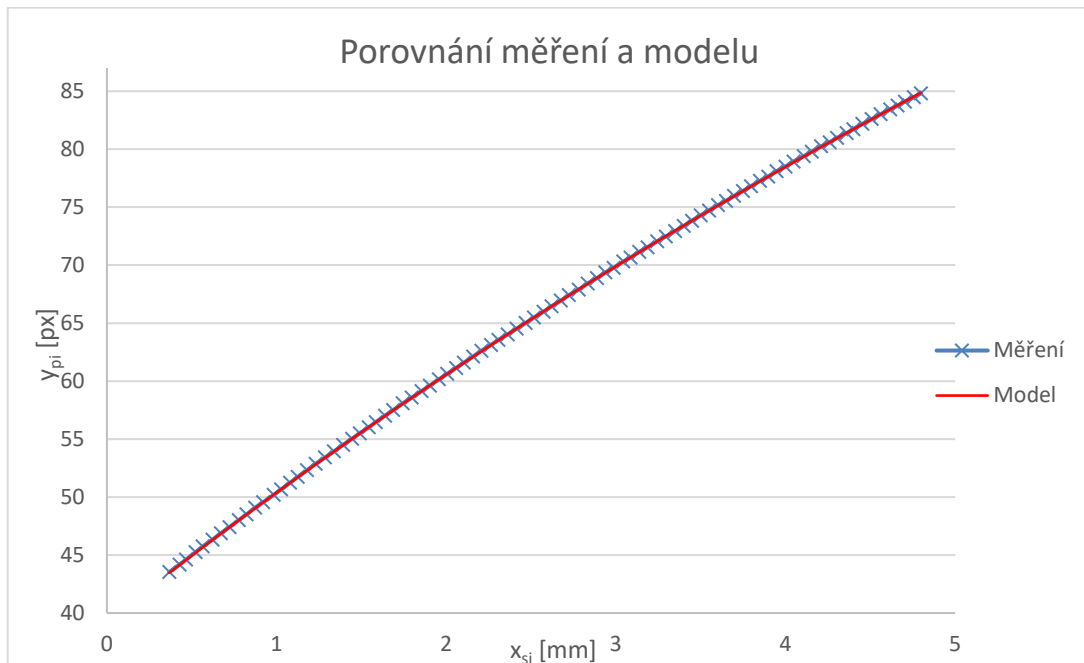


Obrázek 66: Hodnota úhlu α při změně horizontální polohy snímače.

Z grafu, je patrné, že je-li snímač blíže k povrchu měřeného objektu, tak úhel α se zvětšuje. V opačném případě se děje při oddálení měřeného objektu od snímače. Nejedná se lineární závislost.

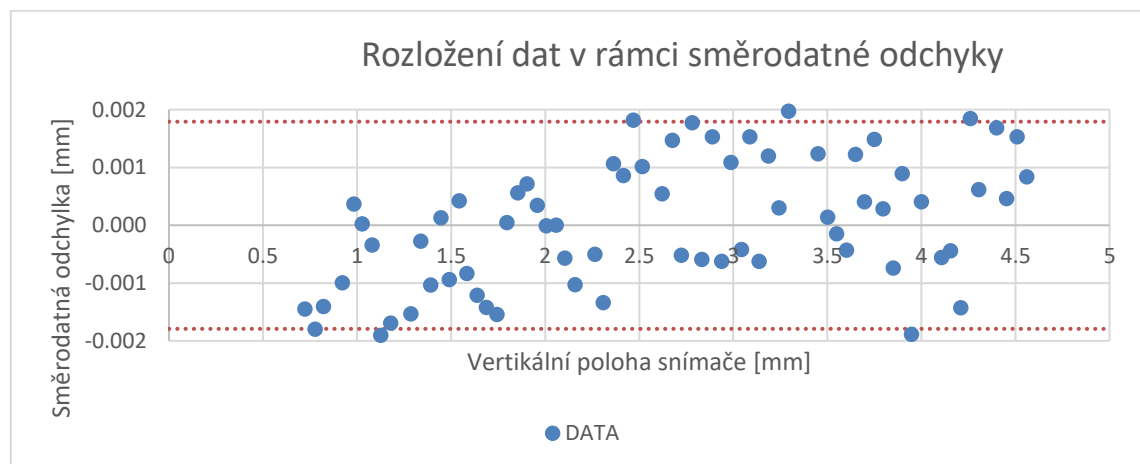
5.3.1 Porovnání modelu s naměřenými hodnotami

Naměřená data ve vertikální poloze snímače jsme porovnali s modelem snímače (Obrázek 67). Je vidět, že model spolehlivě odpovídá naměřeným hodnotám. Směrodatná odchylka z rozdílů $\Delta x'$ měřených dat a modelových je $\sigma_x = 0,0013$ [mm].



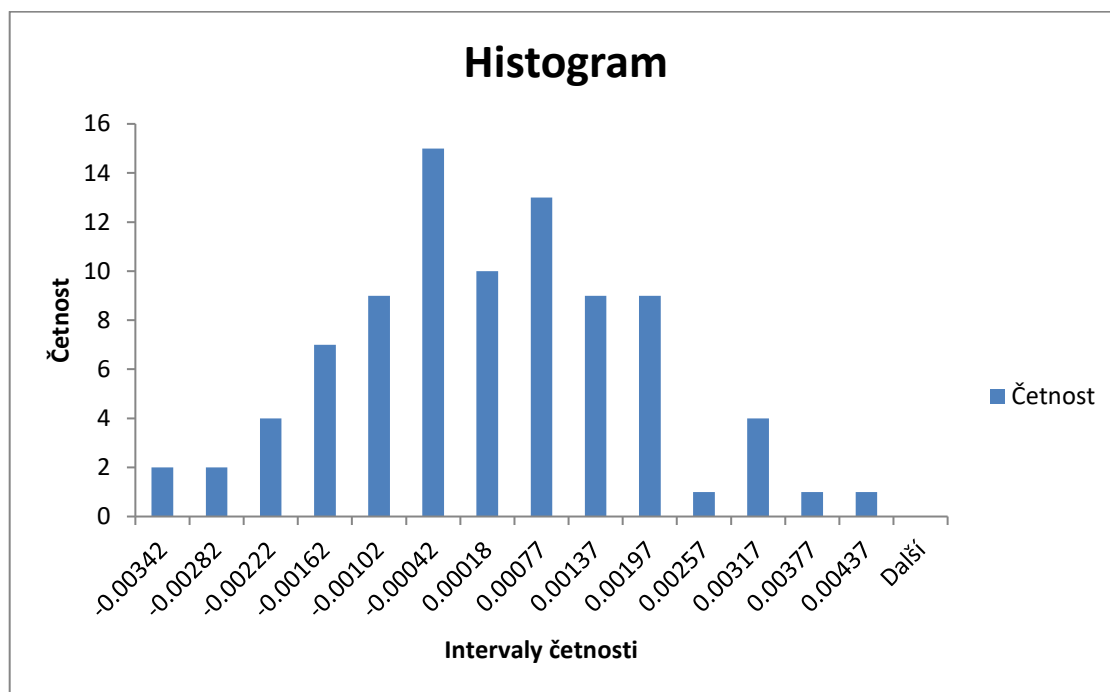
Obrázek 67: Porovnání naměřených dat s modelem.

Ze získaných dat jsme provedli statistickou analýzu rozložení v rámci vypočítané směrodatné odchylky σ_x , (Obrázek 68). V rámci směrodatné odchylky můžeme říci, že se jedná o normální rozdělení dat, protože interval je zaplněn zhruba z 95 % jejího rozsahu.



Obrázek 68: Rozložení dat v intervalu směrodatné odchylky.

Distribucí dat pomocí sloupcového grafu (Histogram), lze říci, že se jedná o Gaussovo normální rozložení dat (Obrázek 69). Z toho lze vyvodit tvrzení, že optimální hodnota parametru l , kterou jsme zvolili můžeme považovat za správnou. Velikost intervalu četnosti vychází z minimálních a maximálních hodnot rozdílů $\Delta x'$, vypočtených naměřených hodnot a také z počtu naměřených dat.



Obrázek 69: Distribuční rozdělení dat v HISTOGRAMU.

Shrnutí výsledných parametrů v rámci analýzy vnitřního systému snímače jsou uvedena, viz (Tabulka 6)

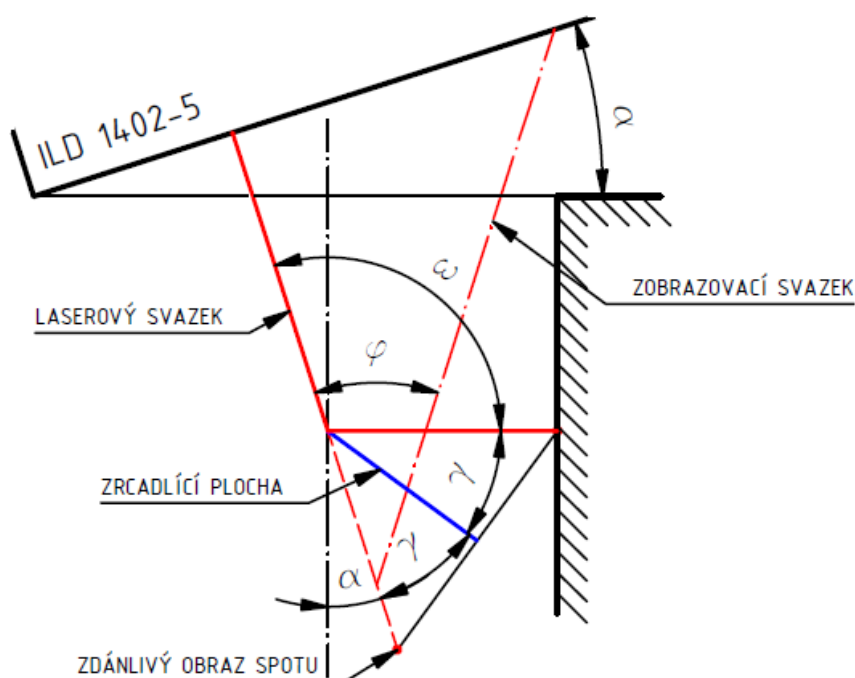
Tabulka 6: Vnitřní parametry systému snímače

l) vzdálenost CCD od optiky snímače, w) velikost CCD detektoru, e) a c) poloha optiky, D) velikost aperturní clony, β) hodnota úhlu mezi přední plochou detektoru a optickou osou zobrazovací optiky snímače.

Parametr	l	w	e	C	D	β
jednotka	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[°]
hodnota	18,84	6,39	22,31	17,95	3,08	49,85

6 Konstrukce nástavce a modifikace snímače

Záměrem tohoto návrhu konstrukce, je takový nástavec, jehož konec bude osazen zrcadlicí plochou, která zajistí odklon laserového svazku tak, aby dopadal kolmo na vnitřní stěnu díry. Odražený laserový svazek svírá s osou laserového svazku úhel ω . Zrcátkem vytvořený zdánlivý obraz musí ležet na ose osvětlovacího svazku, jinak by došlo ke změně jeho pozice na diodovém poli CCD detektoru a tím ke zkreslení udávaných hodnot vzdálenosti. Z toho plyne, že důležitým parametrem bude úhel naklonění zrcátka β vůči ose laserového svazku. Snímač, je nakloněn o úhel $\alpha = \frac{\varphi}{2}$, a to tak, aby dělicí osa úhlu φ byla rovnoběžná s vnitřní stěnou válcové díry. Díky tomuto natočení dostaneme oba svazky do měřicího prostoru uvnitř válcové díry (Obrázek 70). Mezní polohy snímače jsou dány měřicím rozsahem, polohou a velikostí zrcátka.



Obrázek 70: Odklon laserového svazku od původního směru, tak aby dopadal kolmo na vnitřní stěnu otvoru.

Z obrázku plyne, že úhel ω lze vyjádřit vztahem (35).

$$\omega = 90 + \frac{\varphi}{2} = 107,75^\circ \quad (35)$$

Osa laserového svazku svírá se zrcadlicí plochou úhel γ , který je dán vztahem (36).

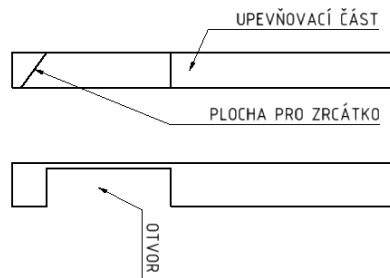
$$\gamma = \frac{180 - \omega}{2} = 36,125^\circ \quad (36)$$

Z obrázku 63, je patrné, že hodnota úhlu γ závisí na hodnotě úhlu α . Velikost úhlu φ ve středu měřicího rozsahu snímače je výrobcem udáván $\varphi = \alpha = 35,5^\circ$. Tato hodnota se

v AMR mění. Například pro tento typ snímače je pro nejbližší bod rozsahu $\alpha = 33,5^\circ$ a pro nejvzdálenější bod je hodnota $\alpha = 37,1^\circ$.

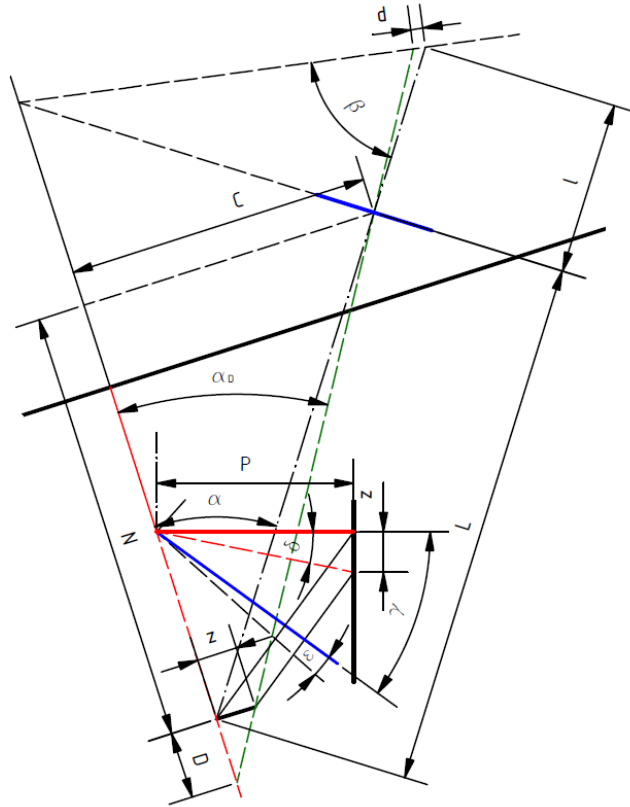
6.1 Tolerance úhlu roviny zrcátka

Konstrukčním řešením nástavce, je tyčinka obdélníkového průřezu opatřená upevňovací částí a otvorem pro osvětlovací a zobrazovací svazek laserového paprsku. Na konci nástavce je plocha pro umístění zrcátka (Obrázek 71).



Obrázek 71: Konstrukční provedení nástavce.

Plocha pro uchycení zrcátka na nástavci musí být vyrobena tak, aby odražený osvětlovací svazek dopadal v ideálním případě kolmo na vnitřní stěnu otvoru. Vzhledem k tomu, že nic nelze vyrobit přesně, bude nutné vhodně zvolit toleranci úhlu nakloněné plochy. Tuto toleranci získáme z tzv. citlivostní analýzy. Tu provedeme tak, že si zvolíme naši chybu $D = 0,002[mm]$ vůči referenční poloze. Z této hodnoty dle vztahu (37) vypočítáme hodnotu d , která odpovídá uvedené hodnotě snímačem (Obrázek 72).



Obrázek 72: Odraz osvětlovacího svazku od plochy zrcátka kolmo na vnitřní stěnu díry.

Vztah pro výpočet vzdálenosti od referenční polohy snímače (37)

$$D = \frac{d \cdot L \cdot \sin(\beta)}{l \cdot \sin(\alpha) + d \cdot \sin(\alpha + \beta)} \quad (37)$$

Z obrázku 74, lze odvodit vztahy:

$$\operatorname{tg}(\alpha_D) = \frac{C}{N + D} = \frac{z}{D} \quad (38)$$

$$z = D \cdot \operatorname{tg}(\alpha_D) = D \cdot \left(\frac{C}{N + D} \right) \quad (39)$$

$$z = P \cdot \operatorname{tg}(\delta) \quad (40)$$

Kombinací (39) a (40), získáme vztah pro výpočet D (41)

$$D = \frac{P \cdot \operatorname{tg}(\delta) \cdot N}{C - (P \cdot \tan(\delta))} \quad (41)$$

Substitucí (41) do (37) získáme rovnici (42)

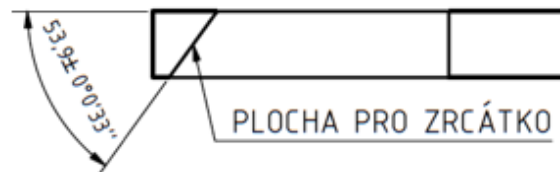
$$D = \frac{P \cdot \operatorname{tg}(\delta) \cdot N}{C - (P \cdot \operatorname{tg}(\delta))} = \frac{d \cdot L \cdot \sin(\beta)}{l \cdot \sin(\alpha) + d \cdot \sin(\alpha + \beta)} \quad (42)$$

Úhel odchýlení svazku od jeho ideální polohy lze pak vyjádřit dle vztahu (43)

$$\delta = \operatorname{artg} \left(\frac{DC}{P \cdot (N + D)} \right) \quad (43)$$

Výsledná tolerance plochy zrcátka pro zvolenou chybu 0,002 mm je dána vztahem (44)

$$\varepsilon = \pm \frac{\delta}{2} = 0,0092^\circ = 0^\circ 0' 33'' \quad (44)$$



Obrázek 73: Zakótování úhlu na výrobním výkrese plochy pro uchycení zrcátka.

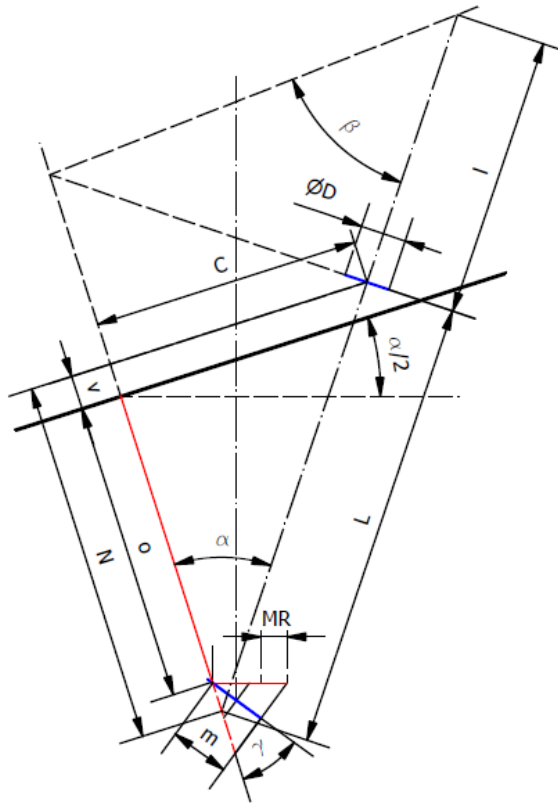
6.2 Konstrukce k uchycení nástavce a snímače

Koncepce návrhu uchycení nástavce bude vycházet z parametrů, které jsme získali při analýze vnitřního a vnějšího systému snímače. Tyto parametry jsou pro přehlednost uvedeny, viz Tabulka 7.

Tabulka 7: Vstupní parametry pro návrh nástavce.

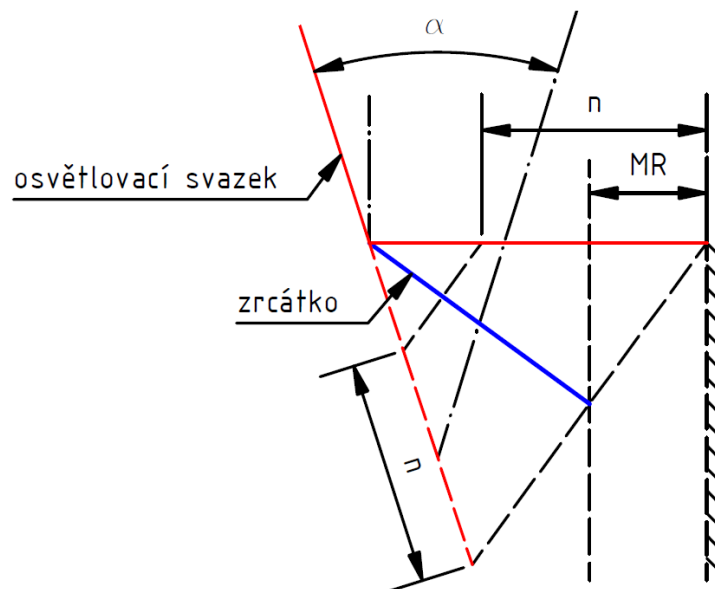
Parametr	Hodnota	Jednotky
C	17,9	[mm]
N	24,3	[mm]
L	30,2	[mm]
l	18,8	[mm]
m	4,0	[mm]
MR	1,72	[mm]
α	36,5	[°]
β	49,9	[°]
γ	36,1	[°]

Geometrické schéma modifikovaného snímače se zrcátkem popisuje (Obrázek 74).



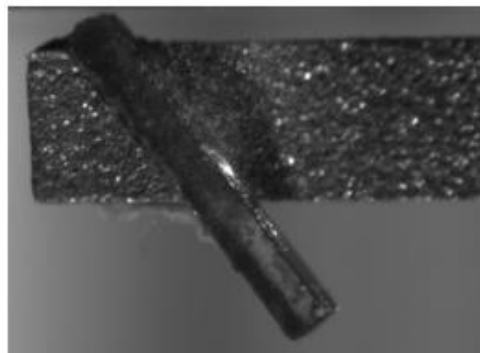
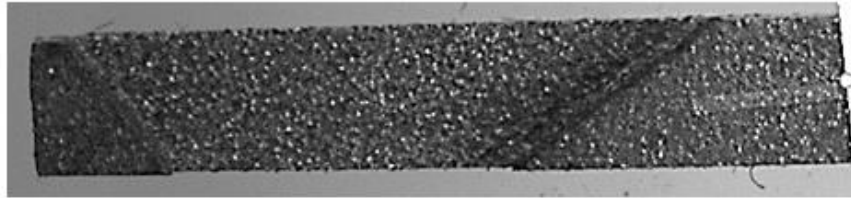
Obrázek 74: Schéma snímače včetně zrcadlicí plochy.

Poloha nástavce vycházela z rozměru zrcátka m (Obrázek 75) K našemu nastavci bylo k dispozici zrcátko, jehož rozměr $m = 4,35$ [mm]. Od tohoto rozměru jsme definovali měřicí rozsah MR již modifikovaného snímače.



Obrázek 75: Schéma polohy zrcadlicí plochy – pracovní poloha snímače.

Výchozí materiál pro výrobu nástavce jsme zvolili hliníkovou tyčinku obdélníkového průřezu $A \times B$ a délky l . Plochu pro uchycení zrcátka a průchozí otvor pro osvětlovací a zobrazovací svazek jsme vyrobili mikroobráběcím způsobem, metodou elektrojiskrového hloubění (EDM). Typové označení hloubičky v mechanické dílně ČVUT FS je Sodick AP1L, je to 4 osý CNC stroj. Takto vyrobený nástavec (Obrázek 76), bude uchycen na tělo celého zařízení.



Obrázek 76: Nahoře obroběný nástavec, dole je nástavec osazený zrcátkem.

7 Konceptní záměr modifikovaného snímače

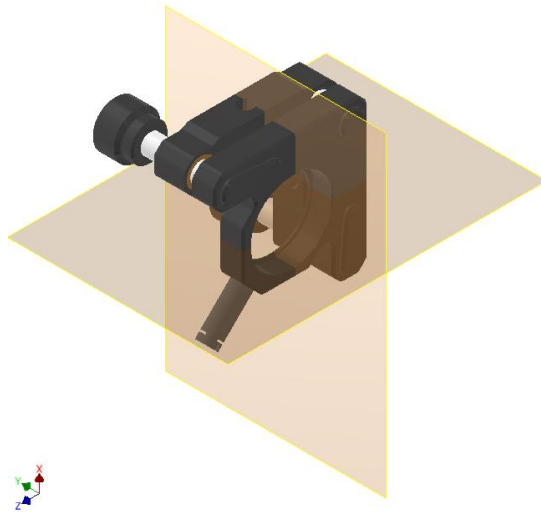
Prototyp modifikovaného triangulačního snímače se bude skládat ze dvou hlavních částí:

Optomechanický stolek

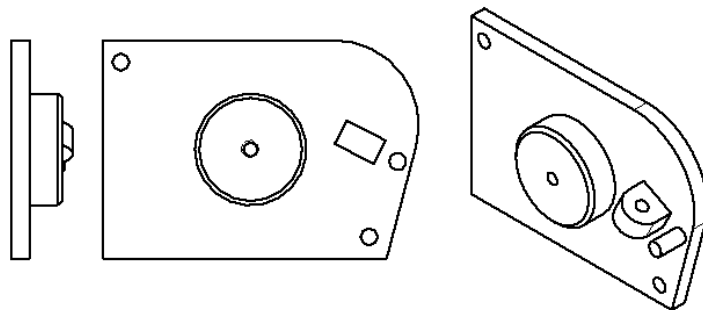
Pouzdro snímače pro uchycení nástavce se zrcadlicí plochou

7.1 Optomechanický stolek

Za účelem možnosti seřizování polohy snímače, jsme navrhli justážní optomechanický stolek. Jedná se o justážní stolek, kterým lze nastavit snímač do jeho pracovní poloh, viz (Obrázek 75). V této poloze dopadá osvětlovací paprsek kolmo na stěnu měřeného objektu. Tento mechanismus disponuje třemi stupni volnosti, kterými je možné úhlově polohovat snímač v jeho pracovních rovinách. Polohování snímače v rovině $Y - Z$ a $Y - X$ (Obrázek 77) je zajištěno polohovacím prvkem KM100 (Kinematic Mirror Mount for $\varnothing 1''$ Optics) firmy THORLABS, jehož pracovní rozsah je $\pm 4[^\circ]$ a poloha v rovině $Z - X$ je realizovaná pomocí navržené nastavby (Obrázek 78) s pracovním rozsahem $\pm 4[^\circ]$.

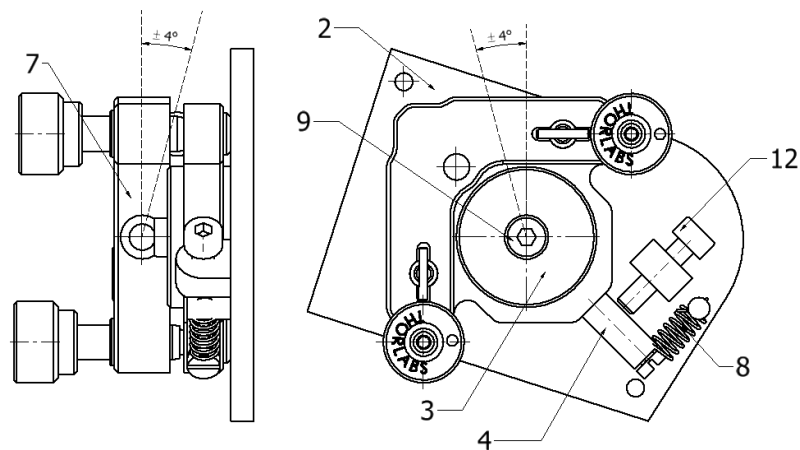


Obrázek 77: KM100 – optomechanický člen pro justáž v rovinách Y – Z a Y – Z



Obrázek 78: Zajištění pohybu v rovině X – Z.

Model sestavy stolečku (Obrázek 79) a výrobní výkresy jednotlivých komponent stolečku jsou v příloze této práce. Destička (2) je vyrobena na 3D tiskárně z materiálu PLA (Poly Lactid Acid).

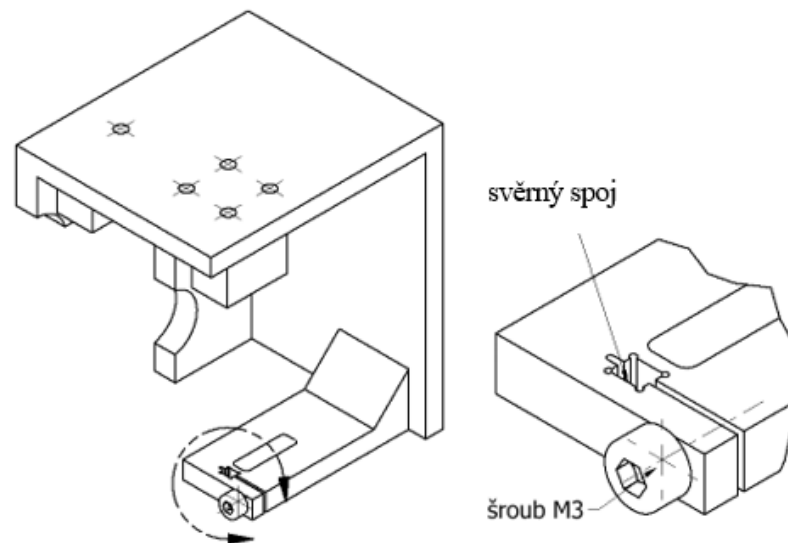


Obrázek 79: Možnosti polohování stolečkem pracovních rovinách snímače. 1) KM100. 2) držák snímače, 3) vymezení vůle, 4) polohování a 5) ramínko.

Polohování snímače v rovině X–Z je zajištěno šroubem M4 se stoupáním 0,7 mm. Ten se opírá o rameno a vymezení vůle je zajištěno tlačnou pružinou o tuhosti $k = 40 \text{ N/mm}$. Jedno otočení šroubem na rameni $l_r = 21,6 \text{ mm}$ odpovídá natočení snímače o $1,85^\circ$.

7.2 Pouzdro snímače

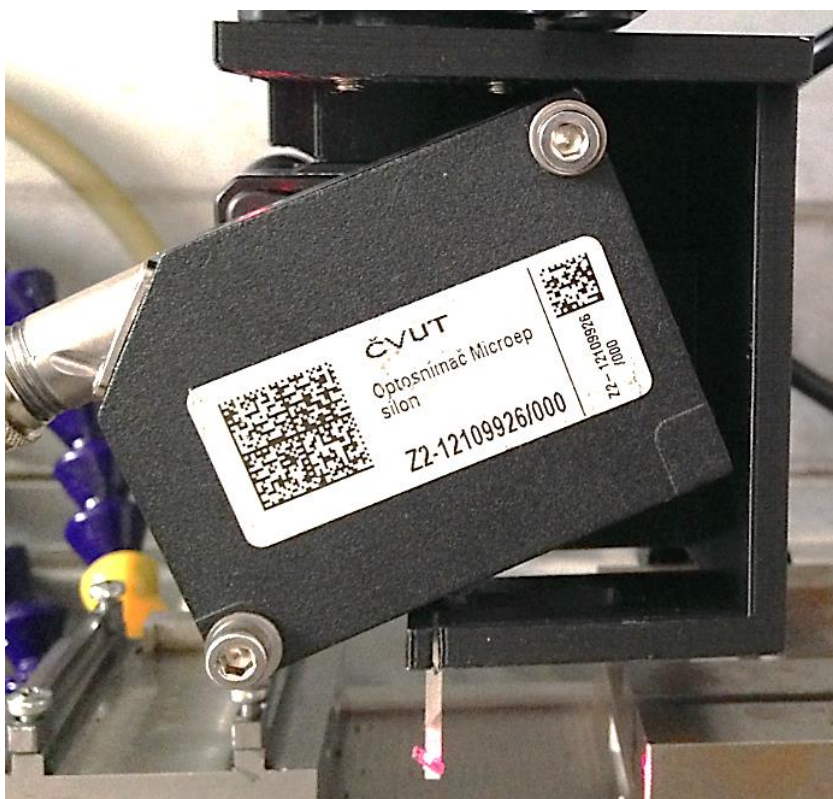
Mechanický stoleček bude zakomponován jako nástavba do pouzdra, viz model (Obrázek 80). Pro návrh konstrukce, ve kterém bude zakomponován stoleček, jsme využili montážních otvorů a ploch polohovacího členu KM100. Součástí konstrukce je také lineární vedení nástavce zrcadla aretované svěrným spojením. Pro uchycení pouzdra na pinolu CNC stroje slouží montážní otvory, na které lze montovat vhodné příruby nebo adaptéry. Výrobní výkres a sestava zařízení je v příloze této diplomové práce.



Obrázek 80: Prototyp pouzdra pro uchycení stolečku a nástavce se zrcadlicí plochou.

8 Experiment s modifikovaným snímačem

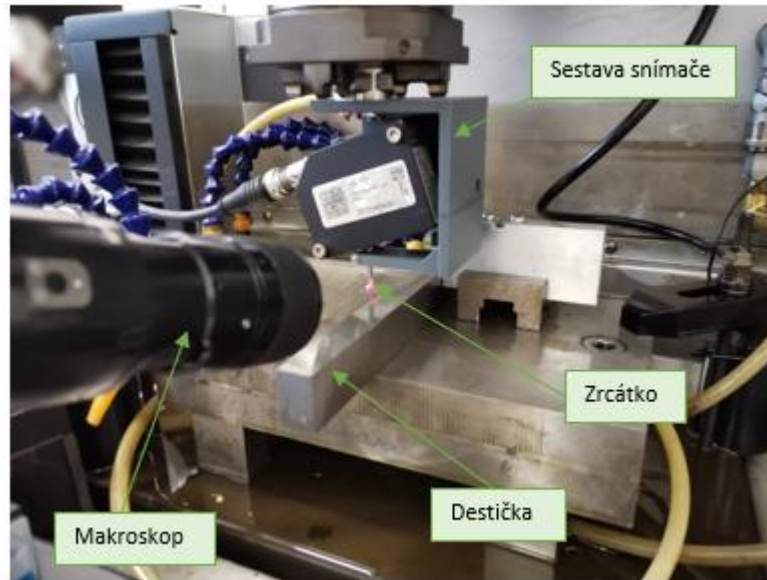
Celé zařízení je navrženo tak, aby se dalo pomocí montážních otvorů a vhodných přírub umístit na pinolu buď souřadnicového měřicího stroje nebo CNC obráběcího stroje a zajistit, jak odečítání polohy snímače, tak jemné polohování v horizontální či vertikální směru. V našem případě jsme pro zkušební měření uchytili snímač na pinolu CNC EMD stroje Sodick AP1L (Obrázek 81), který je součástí mechanické dílny ČVUT Fakulty strojní. Při manipulaci s tímto zařízením je nutno mít na zřetel, že se jedná o optický systém. Tudíž manipulace musí být v souladu s touto skutečností. Nástavec a zrcátko jsou malých rozměrů a při nedbalém zacházení může snáze dojít k jejich poškození. Proto volba rychlosti posuvu či přítlačné síly (zpětná vazba stroje), je důležitou fází před vlastním měřením.



Obrázek 81: Prototyp modifikovaného snímače před testovacím měření – nastavení do pracovní polohy.

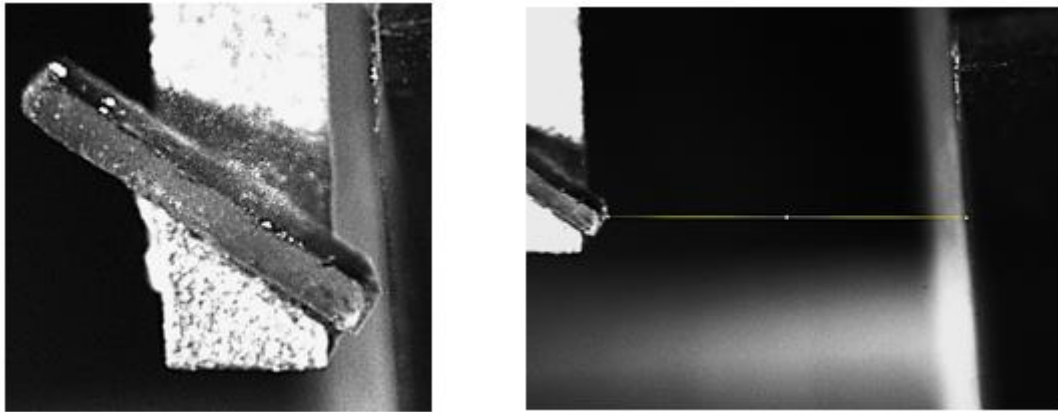
8.1 Nastavení počáteční polohy snímače

Před vlastním měřením bylo nutné nastavit zrcátko do jeho počáteční polohy x_0 a z_0 . Na magnetickou desku pracovního prostoru CNC stroje jsme do cesty zrcátka umístili ocelovou destičku, která simulovala vnitřní stěnu měřeného objektu. Jemným posuvem jsme zrcátko dostali do velmi blízké vzdálenosti od povrchu měřeného objektu. Tam, kde už končila rozlišovací schopnost našeho zraku, bylo nutné použít mikroskop (Obrázek 82).



Obrázek 82: Snímání polohy zrcátka pomocí makroskopu.

Pomocí makroskopu jsme si přiblížili obraz a byli tak schopni opakovat jemný posuv až do těsné blízkosti zrcátka od stěny. Tímto jsme si definovali, jak počáteční polohu zrcátka, tak i nulovou polohu souřadnicového stroje. Zpětným posuvem v x-ovém směru (záporná hodnota) od stěny zvětšovali vzdálenost zrcátka od měřené stěny. Ze získaných snímků zrcátka v nulové pozici a v pozici -8 mm, které jsme použili ke kalibraci snímků, bylo možno dopočítat skutečnou vzdálenost mezi stěnou a zrcátkem v jeho počáteční poloze odpovídající souřadnici stroje $x = 0$ mm. K analýze snímků jsme využili softwarové prostředí ImageJ (Obrázek 83), kde je možné odečítat vzdálenost v jednotkách pixelů (obrázek 83). Z analýzy obou snímků jsme získali vzdálenost zrcátka od stěny $x_0 = 0,09$ mm a definovali tak „offset“ pozici.

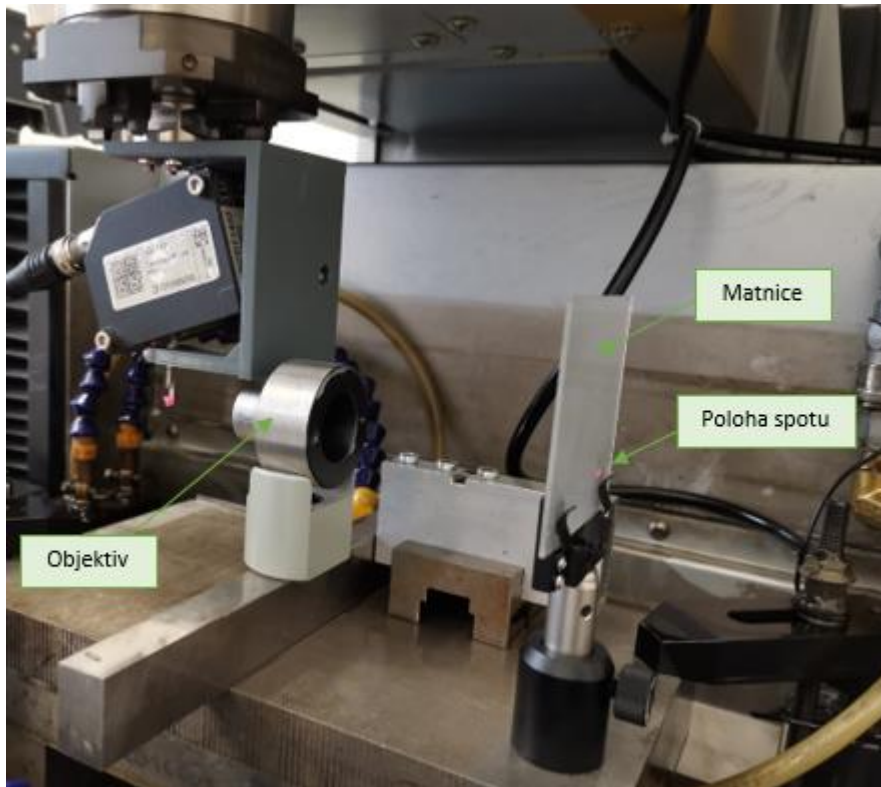


Obrázek 83: Určení mezní vzdálenosti zrcátka od stěny destičky. Vlevo pozice $x = 0$ mm, vpravo $x = 8$ mm.

K určení počáteční polohy a souřadnice v ose Z, jsme využili toho, že nástavec je vyroben z vodivého materiálu. Pro kontakt, jsme zvolili drátek, jehož konce byly osazeny krokosvorkami. Jednu svorku jsme připevnili k nástavci snímače a druhou svorku jsme připojili na kostru stroje. Takto jsme mohli využít zpětnovazební kontrolu mezi strojem a nástavcem. Dotykem spodní hrany nástavce, s horní plochou kovové destičky, jsme tak stroji definovali jeho počáteční polohu v ose Z. Souřadnice počáteční polohy zrcátka vůči destičce jsou $x_0 = -0,09$ a $z_0 = -4$

8.2 Pracovní poloha osvětlovacího laseru

Posledním krokem před vlastním měřením, bylo nastavení pracovní polohy snímače, respektive polohy svazku. K tomuto nastavení jsme využili justážních prvků snímače. Pomocí objektivu a matnice jsme tak mohli snáze nalézt pracovní polohu osvětlovacího svazku (Obrázek 87). Posuvem v ose X, jsme pozorovali pozici zobrazeného spotu na matnici. Postupným justováním, jsme docílili výchozí polohy osvětlovacího svazku.



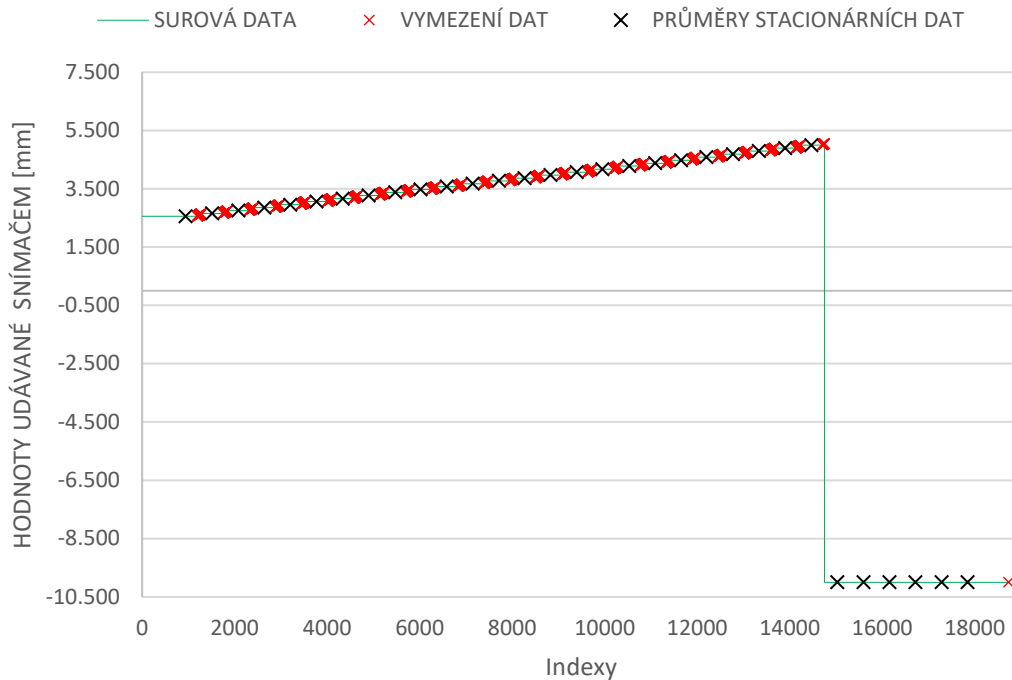
Obrázek 84: Justáž osvětlovacího svazku do jeho pracovní polohy.

8.3 Měření snímačem ve směru osy – X

Pohyb stroje byl naprogramován po jednotlivých krocích, abychom mohli identifikovat jednotlivé měřené pozice stroje v kontinuálním časovém záznamu dat ze snímače.

Krokováním, kde délka kroku v kladném směru osy X $k = 0,1mm$, celkový počet kroků $n = 31$ a doba snímání $t = 1s$ jsme získali surová data polohy udávaná snímačem (Obrázek 85).

GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ NAMĚŘENÝCH DAT



Obrázek 85: Záznam dat v jednotlivých skocích.

Zeleně jsou v grafu vyznačena naměřená data, která byla vygenerovaná měřicí aparaturou. Červeně jsou data měřená za pohybu stroje. V těchto místech změnil snímač svou polohu v čase o zvolený krok a tím vznikl dynamický zásah, jehož důsledkem je záznam neustálých dat. Z kontinuálních dat snímače lze hodnoty jednotlivých vzdáleností po kroku 0,1 mm vybrat jako stacionární data (hodnoty snímače), které se od sebe neliší více než je nejistota snímače, která je udávána výrobcem 5 až 9 mikronů. Černý křížek je průměr ze stacionárních dat (Obrázek 86).



Obrázek 86: Grafické znázornění výběru stacionárních dat.

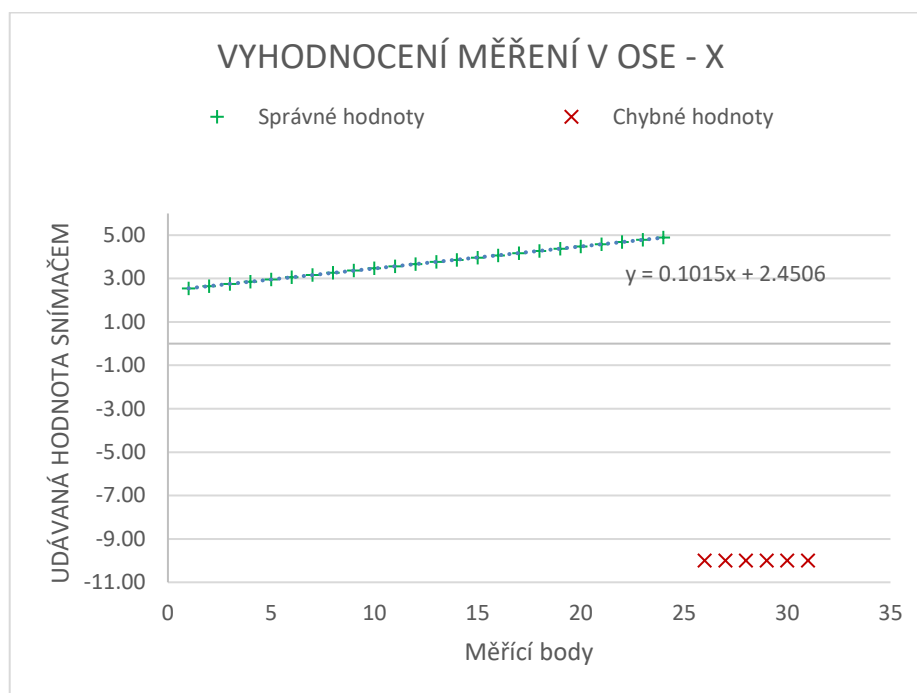
Provedli jsme analýzu naměřených dat, viz (Obrázek 86) a výsledky této analýzy jsou zobrazeny v tabulce č. 8.

Tabulka 8: Výsledky naměřených dat.

Index	Data snímače	Smodch. stacionárních DAT	Vypočtený krok mezi měřícími body	Lin.fit	Rozdíl Data snímače a Lin. Fit
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	2.555	0.00022	0.095	2.552	-0.003
2	2.650	0.00018	0.099	2.654	0.004
3	2.749	0.00015	0.105	2.755	0.006
4	2.854	0.00015	0.101	2.857	0.003
5	2.954	0.00019	0.108	2.958	0.004
6	3.062	0.00021	0.100	3.060	-0.002
7	3.162	0.00023	0.108	3.161	-0.001
8	3.270	0.00016	0.104	3.263	-0.007
9	3.374	0.00027	0.100	3.364	-0.010
10	3.475	0.00021	0.098	3.466	-0.009
11	3.573	0.00026	0.097	3.567	-0.005
12	3.669	0.00022	0.099	3.669	-0.001
13	3.768	0.00017	0.096	3.770	0.002
14	3.864	0.00017	0.102	3.872	0.008
15	3.965	0.00017	0.101	3.973	0.008
16	4.066	0.00019	0.103	4.075	0.009
17	4.169	0.00018	0.108	4.176	0.007
18	4.277	0.00020	0.095	4.278	0.001
19	4.372	0.00023	0.104	4.379	0.007
20	4.476	0.00024	0.108	4.481	0.005
21	4.584	0.00016	0.101	4.582	-0.002
22	4.685	0.00022	0.105	4.684	-0.002
23	4.790	0.00019	0.104	4.785	-0.005
24	4.894	0.00026	0.101	4.887	-0.007
25	4.995	0.00018	14.995	4.988	-0.007
26	-10	0.0000	0.000	5.090	15.090
27	-10	0.0000	0.000	5.191	15.191
28	-10	0.0000	0.000	5.293	15.293
29	-10	0.0000	0.000	5.394	15.394
30	-10	0.0000	0.000	5.496	15.496
31	-10	0.0000	0.000	5.597	15.597

8.4 Vyhodnocení dat

Vynesením dat snímače do grafu (Obrázek 87), jsme získali závislost mezi polohou snímače a jednotlivými kroky odpovídajícím měřeným pozicím. Z grafu je patrné, že data jsou rozdělena do dvou skupin. První skupina má lineární trend. Druhá skupina dat je označena červenými křížky a nevykazuje návaznost na první skupinu dat. Tato situace zobrazuje chybné hodnoty, které vznikly v důsledku překročení měřicího rozsahu snímače a do dalšího vyhodnocování nebudou zahrnuty. Zeleným křížkem jsou označeny hodnoty v rámci pracovního rozsahu, Na základě těchto dat byla zjištěna velikost pracovního rozsahu snímače, která je v rozmezí z od jeho výchozí polohy 2,555 mm do jeho krajní polohy 4,995 mm. V tomto případě je výchozí poloha 2,555 mm zvolena na základě rozměrů použitého zrcátka.



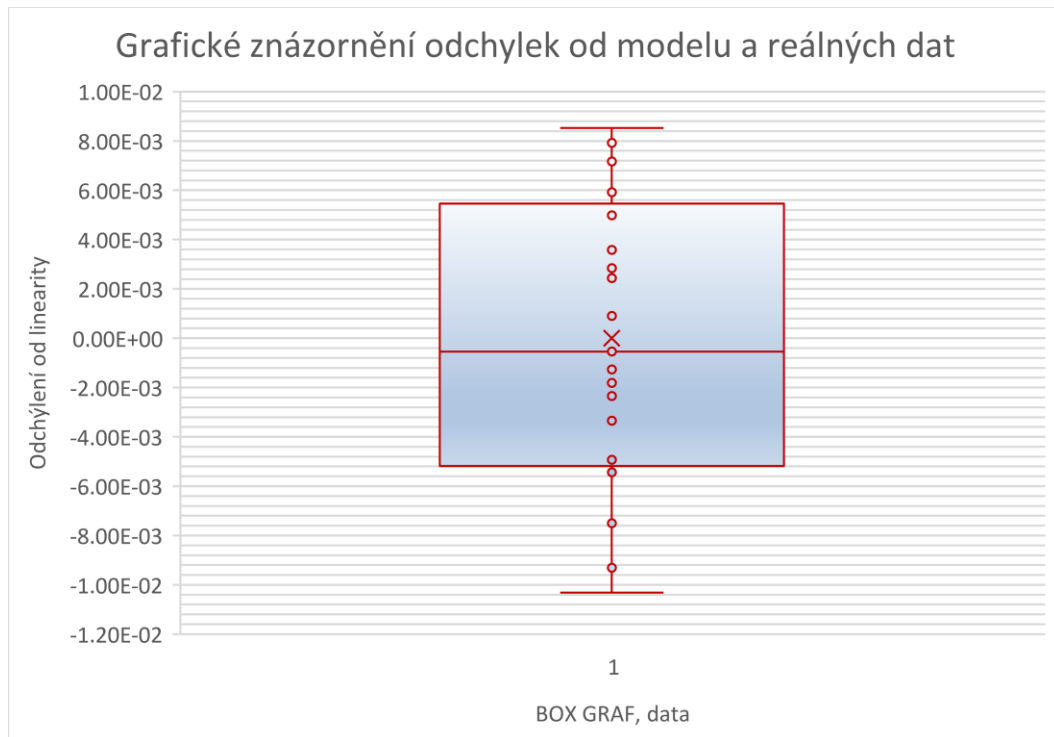
Obrázek 87: Vynesení průměrných hodnot z jednotlivých kroků.

Na základě našeho určeného měřicího rozsahu od 2,555 mm do 4,995 mm, jsme provedli vyhodnocení dat. Tato data vykazují lineární charakter, který je popsán modelovou rovnicí přímky (45).

$$y = 0,01015x + 2,4506 \quad (45)$$

Použitím vztahu (45), jsme získali hodnoty *Lin.Fit*, viz Tabulka 8. Následně jsme provedli, porovnání rozdílu mezi modelem a reálnými daty udávaných snímačem. Toto vyhodnocení, je uvedeno, viz (Tabulka 8) ve sloupci *Rozdíl Data snímače a Lin.Fit*.

Grafické znázornění rozdílu data snímače a *Lin.Fit* popisuje Obrázek 88.

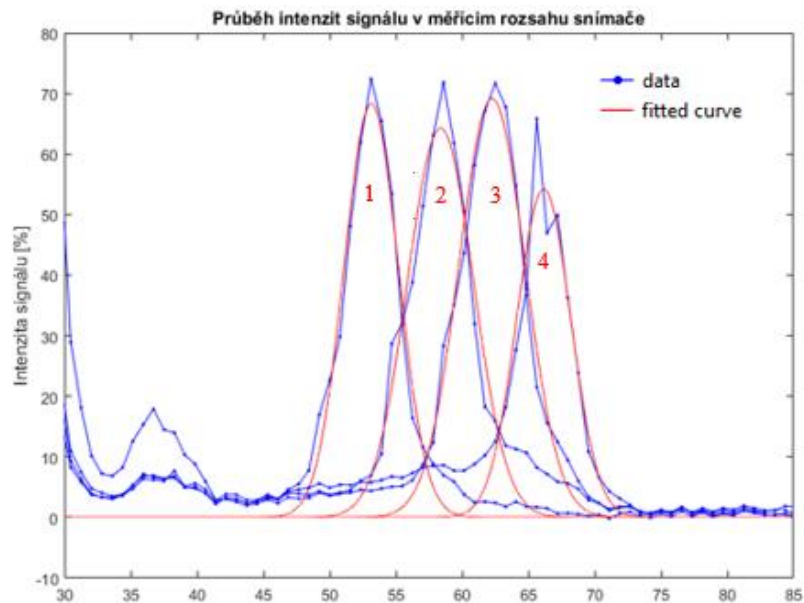


Obrázek 88: Vynesení hodnot odchylek mezi reálnými daty a modelem.

Statistický soubor odchylek je vymezený intervalem, viz (Obrázek 88) jehož hodnoty jsou určeny z rozdílu reálných dat a modelu, viz (Tabulka 8). V tomto případě je spodní hranice $-1,03e-02$ mm a horní hranice $8,52e-03$ mm. Dolní kvartil v grafu je ohraničen hodnotou $-5,18e-03$ mm a horní kvartil pak hodnotou $5,46e-02$ mm. Mezi těmito kvartily je křížkem označen aritmetický průměr, jehož hodnota je $6,8e-06$ mm a souvislou vodorovnou čarou pak označen medián $-5,39e-04$ mm]

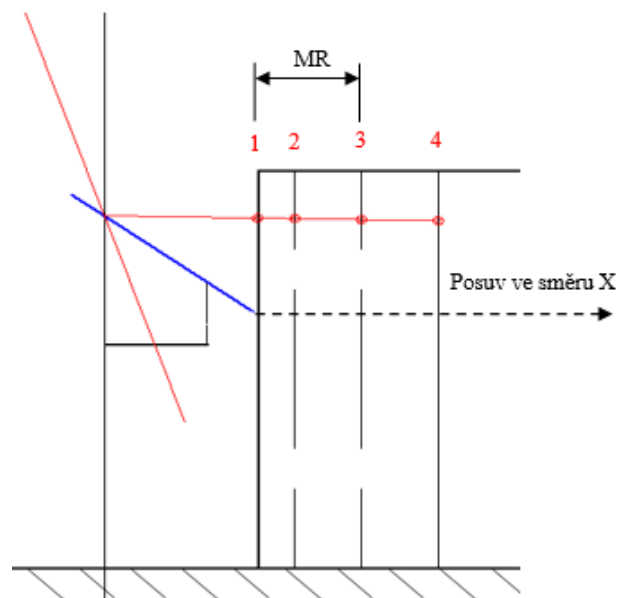
Z výsledků statistického rozboru odchylek plyne, že celková rozšířená nejistota měření $U_C = 0,0118$ mm, je součinem standardní nejistoty a koeficientu k , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení dat odpovídá koeficientu rozšíření $k = 2$.

Krajní polohy a střední poloha měřicího rozsahu s ohledem na intenzitu signálu udávanou diodovým polem CCD detektoru popisuje (Obrázek 89). Z obrázku je zjevné, že polohy 1 až 3 jsou body, které spadají v rámec pracovního rozsahu. Naproti tomu bod 4 je již mimo měřicí rozsah, který je dán charakterem intenzity signálu a tvarem signálové křivky.



Obrázek 89: Intenzita signálu v rámci a mimo pracovní rozsah snímače.

Geometrické znázornění poloh snímače vůči měřenému objektu znázorňuje (Obrázek 90). Indexy 1 až 4 jsou polohy snímače, kterým přísluší hodnoty intenzit signálu, viz (Obrázek 89)



Obrázek 90: Oblast měřicího rozsahu snímače a jeho polohy.

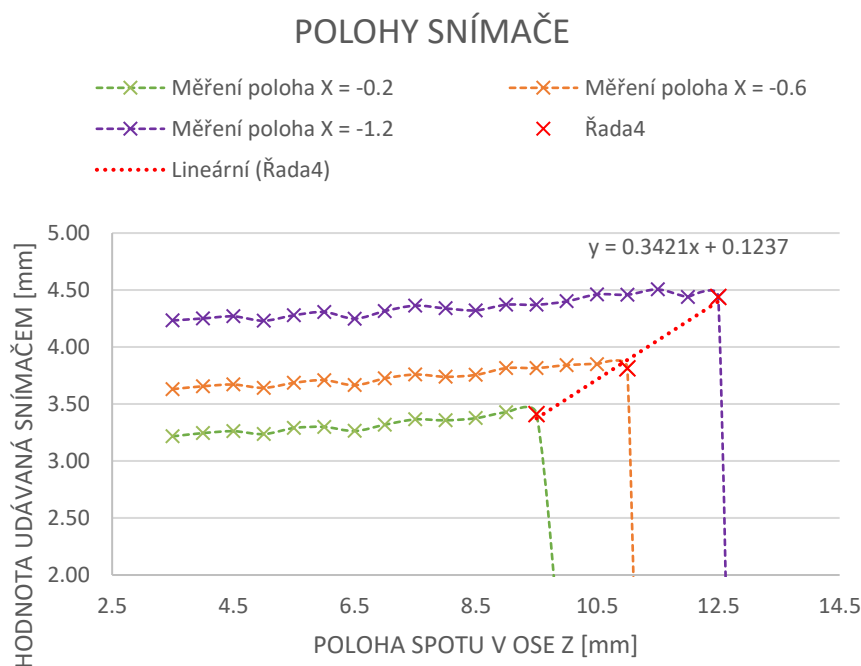
8.5 Měření snímačem ve směru osy – Z

Jednou z klíčových vlastností snímače bude, také hloubkové měření uvnitř díry, a to podél osy Z, která je rovnoběžná s osou rotace díry. Snímač s nástavcem je nutné do díry umístit tak, aby oba laserové svazky – osvětlovací a zobrazovací se nacházely uvnitř prostoru měřené díry, viz (Obrázek 70). Další nutnou podmínkou, je to, aby při posuvu ve směru osy Z a v dané vzdálenosti od stěny (osa X), nedocházelo k zastínění laserového svazku. Podobně jako u předchozího měření, jsme snímač uchytili do pinoly CNC stroje, čímž jsme zajistili jeho precizní a zároveň jemné polohování s možností odečtu souřadnic v dané poloze snímače. Měření jsme provedli ve třech měřících pozicích pro souřadnici stroje $x = -0,2; -0,6; -1,2 \text{ mm}$. Pro posuv v záporném směru osy Z jsme volili krok po 0,5mm a doba snímání byla 1 s. K vyhodnocení dat odečtených ze snímače jsme zvolili stejnou metodiku, která je popsána v kapitole 8.4.

Nejprve jsme provedli měření ve vzdálenosti od stěny $x_1 = -0,2 \text{ mm}$, kde počáteční poloha zrcátka v ose Z, byla v souřadnici $z_0 = -2 \text{ mm}$. Tuto výchozí polohu jsme zachovali i v případě měření $x_2 = -0,6 \text{ mm}$ a $x_3 = -1,2 \text{ mm}$.

8.5.1 Vyhodnocení dat

Výsledky z měření popsaném v kapitole 8.5 jsou zaneseny graficky, viz (Obrázek 91)



Obrázek 91: *Krajní polohy snímače v ose Z v závislosti na poloze snímače v ose X.*

Na obrázku 91 jsou vidět průběhy měření ve třech různých polohách zrcátka od stěny měřené destičky. Zelenou barvou jsou zvýrazněny data, kdy vzdálenost snímače byla -0,2 mm od destičky. Data, která jsou zvýrazněny oranžovou barvou popisují záznam snímače vzdáleného od destičky -0,6 mm. Fialovou barvou jsou zvýrazněna data, kdy byl

snímač ve vzdálenosti -1,2 mm od destičky. Červeným křížkem jsou zvýrazněna místa, kdy snímač ještě měří správně.

Tyto body zároveň vykazují lineární charakter, kterým lze dále definovat pracovní rozsah v ose Z, viz následující rovnice přímky (46).

$$y = 0,3421x + 0,1237 \quad (46)$$

Data získaná z měření jsou zaneseny, viz Tabulka 9, Tabulka 10 a Tabulka 11.

Tabulka 9: Naměřená dat $x = -0,2$ mm.

Posuv osa (-) Z [mm]	Průměry stacionárních DAT [mm]
3.5	3.217
4	3.245
4.5	3.262
5	3.236
5.5	3.289
6	3.299
6.5	3.263
7	3.319
7.5	3.365
8	3.357
8.5	3.376
9	3.427
10.0	-10.000

Tabulka 10: Naměřená data $x = -0,6$ mm.

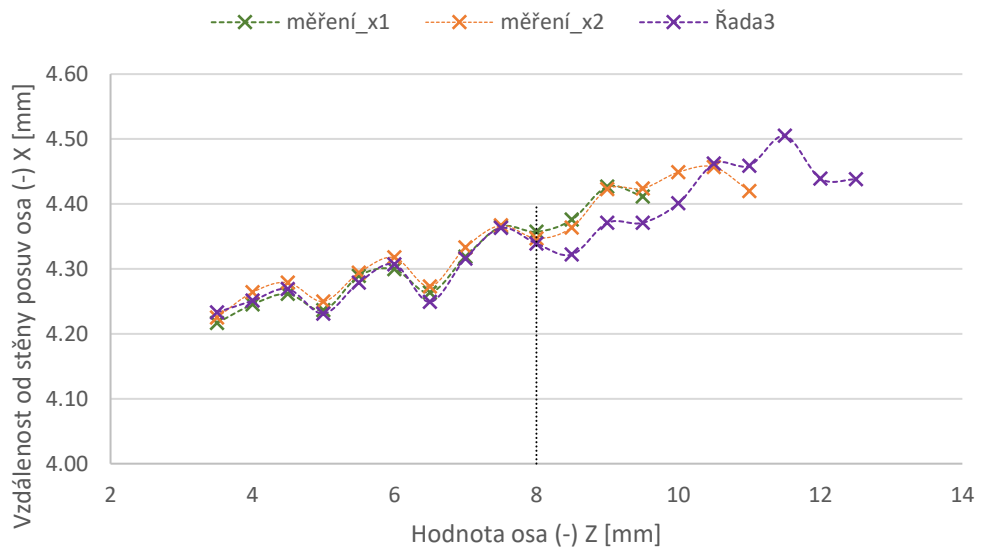
Posuv osa (-) Z [mm]	Průměry stacionárních DAT [mm]
3.5	3.631
4	3.656
4.5	3.671
5	3.642
5.5	3.686
6	3.710
6.5	3.665
7	3.725
7.5	3.759
8	3.739
8.5	3.756
9	3.815
9.5	3.816
10	3.841
11.5	-10.000

Tabulka 11: Naměřená data, $x = -1,2$ mm

Posuv osa (-) Z [mm]	Průměry stacionárních DAT [mm]
3.5	4.233
4	4.251
4.5	4.269
5	4.231
5.5	4.279
6	4.307
6.5	4.249
7	4.316
7.5	4.363
8	4.339
8.5	4.322
9	4.371
9.5	4.371
10	4.401
10.5	4.462
11	4.459
11.5	4.505
12	4.439
12.5	4.438
13	-10.000

Linearitu snímače udává výrobce 5 až 9 mikrometrů. To jsme schopni z naměřených dat rovněž vyhodnotit. Z obrázku 91, lze vidět, že profil zaznamenaných hodnot v různých pozicích snímače je stejný. Provedli jsme posunutí křivek (o známý krok) do společného počátečního bodu a tím jsme získali jejich překryv (Obrázek 92). Z těchto dat lze vyhodnotit jejich aritmetické průměry a systematické odchylky, viz (Tabulka 12)

Grafické znázornění odchylky v měřicích bodech



Obrázek 92: Posunutí hodnot do společného výchozího bodu.

Nově získaná data jsou vynesena, viz (Tabulka 12).

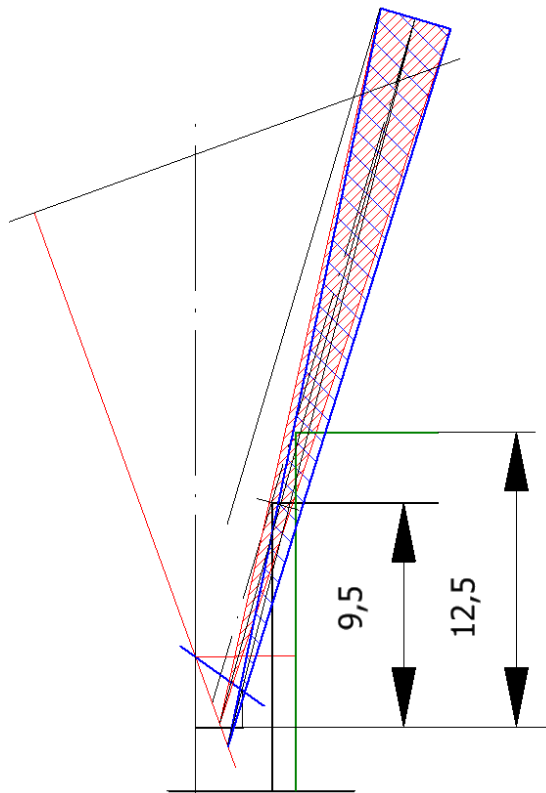
Tabulka 12: Vyhodnocení nově získaných dat.

Poloha v ose (-) Z [mm]	Měřicí body			Průměr z n_měření [mm]	Smodch dle EA – 4/02 M:2013 [mm]
	1	2	3		
3,5	4,233	4,239	4,233	4,235	0,0047
4	4,261	4,264	4,251	4,259	0,0056
4,5	4,278	4,279	4,269	4,275	0,0050
5	4,253	4,250	4,231	4,244	0,0056
5,5	4,306	4,294	4,279	4,293	0,0044
6	4,316	4,318	4,307	4,313	0,0053
6,5	4,280	4,273	4,249	4,267	0,0070
7	4,335	4,333	4,316	4,328	0,0052
7,5	4,381	4,367	4,363	4,370	0,0011
8	4,373	4,347	4,339	4,353	0,0052
8,5	4,392	4,364	4,322	4,359	0,0163
9	4,443	4,423	4,371	4,412	0,0180
9,5	4,428	4,424	4,371	4,408	0,0160
10,0	-	4,449	4,401	4,425	0,0196
10,5	-	4,457	4,462	4,459	0,0021
11,0	-	4,420	4,459	4,439	0,0160
11,5	-	-	4,505	4,505	-
12,0	-	-	4,439	4,439	-
12,5	-	-	4,438	4,438	-
13,0	-	-	-	-	-

V tabulce 12 jsou vyhodnocená data s jejich opakovací směrodatnou odchylkou. Je zjevné, že až do pozice snímače $z = -8$ mm, viz (Obrázek 92) je průměrná směrodatná odchylka $U_A = 0,005$ mm což je v rámci nejistoty, kterou deklaruje výrobce. Směrodatná odchylka byla určena v souladu s dokumentem EA – 4/02 M:2013.

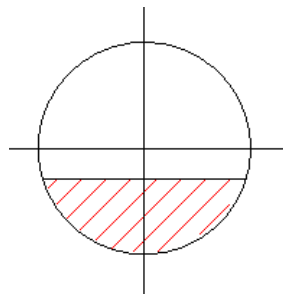
8.5.2 Krajní polohy v geometrii snímače

Z vyhodnocených dat, již máme představu o tom, kdy a v jaké pozici snímače dochází ke kompletnímu zastínění vstupní apertury snímače, viz data (Tabulka 9 až Tabulka 11). Vynesením souřadnic do geometrie snímače, získáme informaci o tom, kolik procent vstupní apertury je zacloněno od hrany vstupující do jejího aperturního úhlu. Dokážeme tak určit kolik (procent) rozptýleného svazku se dostane na detektor. Na obrázku je popsána situace, kdy zrcátko je vzdáleno od stěny destičky v záporném směru osy X ($x = -0,2 \text{ mm}$) a poloha v ose Z ($z = -9,5 \text{ mm}$). Do šrafovaného pole, které je zobrazeno jako kužel (Obrázek 93) vniká hrana od měřené stěny. V tomto místě ještě snímač detekuje vzdálenost polohy od stěny měřené destičky.



Obrázek 93: Pozice snímače se zastíněným svazkem.

Provedeme-li řez rovinou kolmou na osu rotace reflektovaného svazku v místě jeho zastínění můžeme získat profil svazku, jehož část bude zastíněná od hrany destičky viz (Obrázek 93).



Obrázek 94: Zobrazení v řezu rovinou kolmou na optickou osu.

Vyjádřením plochy kruhové úseče dle vztahu (47), lze pak určit kolik procent plochy reflektovaného svazku je zastíněno hranou destičky.

$$S = \frac{1}{2} \cdot r^2 \left(\frac{\pi \cdot \lambda}{180^\circ} - \sin(\alpha) \right) \quad (47)$$

Kde:

r je poloměr svazku v místě řezu [mm]

λ je úhel kruhové úseče [°]

9 Vyhodnocení výsledků

Experimentální část této práce je rozdělena do několika kapitol. V úvodu byly analyzovány vnitřní systémy snímače, jako jsou poloha aperturní clony, její velikost a dále poloha a velikost detektoru. Z analýzy dat při experimentu se zastíňováním osvětlovacího a zobrazovacího svazku, viz kapitola 5. se podařilo definovat velikost aperturní clony $D = 3,08 \text{ mm}$ a její polohu uvnitř snímače. Dále jsme z analýzy dat získali vzájemnou polohu aperturní clony a CCD detektoru.

Parametry vnitřního uspořádání systému snímače popisuje Tabulka 13. S těmito parametry se matematický model snímače liší od reálného měření chybou $0,00179 \text{ mm}$.

Tabulka 13: Uspořádání uvnitř systému snímače ILD 1402-5.

Parametry	Symbol	Hodnota	Jednotka
Průměr AC	D	3,08	[mm]
Horizontální poloha AC od osy laseru	C	17,95	[mm]
Vertikální poloha AC od osy laseru	v	2,26	[mm]
Velikost CCD	w	6,39	[mm]
Úhel CCD vůči optické ose AC	β	48,82	[°]
Vzdálenost CCD od AC	l	18,8	[mm]
Úhel mezi osou svazku a osou AC	α	36,45	[°]

Analýza nejistot závislých na geometrii snímače je popsána v kapitole 6, ze které byly získány hodnoty pro určení geometrických tolerancí konstrukčního řešení pro výrobu nástavce. Výrobní tolerance úhlu plochy pro umístění zrcátka je $53,9 \pm 0^{\circ}0'33''$.

Kapitola 8 popisuje experiment s prototypem snímače. Provedli jsme měření se snímačem ve směru osy X od stěny měřeného vzorku. Na základě vyhodnocení dat byla zjištěna velikost pracovního rozsahu modifikovaného snímače, která je v rozmezí od jeho výchozí polohy $2,555 \text{ mm}$ do jeho krajní polohy $4,995 \text{ mm}$ s nejistotou opakovaní měření $U_A = 0,0058 \mu\text{m}$. Tím jsme ověřili, že hodnota nejistoty z měření je v souladu s deklarovanou nejistotou udávanou výrobcem 5 až 9 mikrometrů.

Dále jsme provedli měření podél osy Z. Tento experiment je popsán v kapitole 8.5. Cílem tohoto experimentu bylo určit pracovní mez snímače v momentě, kdy hrana destičky začíná zastíňovat zobrazovací svazek. Tato hodnota je závislá na pozici snímače od měřené destičky. Měření jsme provedli ve třech pozicích snímače od měřené destičky ve vzdálenosti

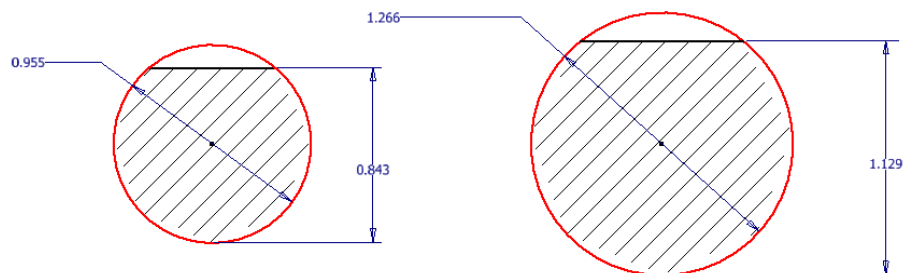
-0,2 mm, -0,6 mm a -1,2 mm. Krajní polohy snímače při měření podél stěny destičky jsou uvedeny, viz Tabulka 14

Tabulka 14: Mezní polohy podél osy Z.

Pozice	x [mm]	z [mm]	Hodnota udávaná snímačem [mm]
1.	-0,2	-9,5	3,412
2.	-0,6	-11	3,812
3.	-1,2	-12,5	4,438

Opakovaná nejistota měření (směrodatná odchylka) je $U_A = 0,005 \mu\text{m}$. Tím jsme si rovněž ověřili a potvrdili, že nejistota opakování při měření podél stěny destičky se je identická jako při měření v ose X.

V krajních polohách podél osy Z, viz Tabulka 14 ještě snímač detekoval signál, a to i přes to, že reflektovaný svazek byl v těchto pozicích téměř z 94 % zastíněn (Obrázek 95). Na obrázku níže jsou profily řezu reflektovaným svazkem. Červená křivka ohraničuje profil svazku a šrafovaná oblast je stínění od hrany destičky, viz kapitola 8.5.2



Obrázek 95: Řez reflektovaným svazkem. Vlevo pozice $x=-0,2\text{mm}$ a $z=-9,5\text{ mm}$. Vpravo $x=-1,2\text{ mm}$ a $z=-12,5\text{ mm}$.

To je vcelku překvapující závěr, který by bylo vhodné prověřit dalšími experimenty, které již, ale nebudou předmětem této práce.

10 Závěr

Cílem této práce bylo modifikovat standardní laserový snímač vzdálenosti, tak aby s takto modifikovaným zařízením bylo možno charakterizovat rozměry v prostoru uvnitř válcových děr, a to bezkontaktní metodou.

Úvodní část práce obsahuje širší rešerši metod týkajících se bezdotykového měření v oblasti průmyslové metrologie. Vzhledem k tomu, že motivací je modifikace triangulačního laserového snímače, byly detailněji popsány a analyzovány metody využívající k měření triangulaci. Jsou zde popsány principy a matematické modely snímače.

Návrh a konstrukce vychází ze stávajícího zařízení s typovým označením ILD 1402-5 a ze zadání dle patentové přihlášky číslo PV2019-412. V kapitolách týkajících se analýzy snímače, jsou popsány experimenty (např. zastiňování) měření, díky kterým se podařilo úspěšně zanalyzovat vnější a vnitřní systémy snímače ILD 1402-5. Z analýz těchto experimentů a jejich dat, bylo s úspěchem definováno vnitřní uspořádání snímače, jako například velikost a poloha aperturní clony. Tato měření vycházela z potřeby znalosti vnitřního uspořádání použitého snímače před samotným návrhem konstrukce modifikovaného snímače. Stejně tak byla provedena analýza nejistot závislých na geometrii snímače, ze které byly získány hodnoty pro určení geometrických tolerancí konstrukčního řešení.

Stanoveným cílem nad rámec zadání je výroba prototypu tohoto zařízení. K jeho výrobě byly mimo jiné použity již běžné metody „*Rapid Prototyping RP*“. V případě výroby komponent s požadavky na jejich vysokou přesnost bylo použito mikro obrábění, a to metoda elektrojiskrového hloubení (EDM).

V závěrečné části práce jsou popsány experimenty měření s prototypem zařízení. Na základě těchto experimentů bylo možno definovat měřicí rozsahy snímače v horizontálním i vertikálním směru a jeho nejistoty měření.

Závěrem je možné konstatovat, že všechny cíle diplomové práce byly splněny. Nad rámec zadání práce bylo zařízení i vyrobeno a následně experimentálně testováno. Metody použité během experimentu prokázaly, že výsledná nejistota měření modifikovaného zařízení se s rezervou shoduje se stávajícím laserovým snímačem ILD 1402-5, jehož deklarovaná nejistota je 5 až 9 mikrometrů.

Seznam použité literatury

- [1] FONSECA, Joao Antonio Santos Dias, Antonio BAPTISTA, Ma Joao MARTINS a Joao Paulo N. TORRES. Distance Measurement Systems Using Lasers and Their Applications. Applied Physics Research [online]. 2017, 9(4) [cit. 2020-08-11]. DOI: 10.5539/apr.v9n4p33. ISSN 1916-9647. Dostupné z: <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/apr/article/view/69572>
- [2] SÝKORA, Jakub. OPTICKÉ 3D SKENERY. *Metrologie: metrologie v praxi*. 2016(2).
- [3] VOJÁČEK, Antonín. Princip laserových snímačů vzdálenosti s triangulačním principem měření. HW.cz: vše o elektrotechnice a automatizaci[online]. Praha 4, 1997 [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/princip-funkce-laserovych-snimacu-vzdalenosti-s-triangulacnim-principem-mereni.html>
- [4] *Laserové snímače vzdálenosti a polohy* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: https://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/laser-sensor/optoNCDT_1420_basic/
- [5] *Laser displacement sensors (triangulation)* [online]. MICRO-EPSILON Headquarters, 2020 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/download/products/cat--optoNCDT--en.pdf>
- [6] Ing. M. Hušek, Porovnání laserových a ultrazvukových dálkoměrů, QTEST, (2009 - 2017)
- [7] Wolfram Strothmann. *Multi-wavelength laser line profile sensing for agricultural applications*. UNIVERSITAT OSNABRUCK, 2016. Doctoral Dissertation. UNIVERSITAT OSNABRUCK. Vedoucí práce Prof. Dr. Arno Ruckelshausen.
- [8] *Novinka - Profilové skenery s modrou laserovou diodou* [online]. 2020 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/novinka-laserove-profilove-skenery-s-modrou-laserovou-diodou.html>
- [9] Song Zhang. *Optics and Lasers in Engineering: High-speed 3D shape measurement with structured light methods: A review*. School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, USA: Elsevier, 2018, , 1-13.
- [10] GOM: Optical Measurement Techniques [online], 2015 Dostupné z: <http://www.gom.com>
- [11] MUSSABAYEV, R.R., M.N. KALIMOLDAYEV, Ye.N. AMIRGALIYEV, A.T. TAIROVA a T.R. MUSSABAYEV. Calculation of 3D Coordinates of a Point on the Basis of a Stereoscopic System. Open Engineering [online]. 2018, 8(1), 109-117 [cit. 2020-08-11]. DOI: 10.1515/eng-2018-0016. ISSN 2391-5439. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/eng.2018.8.issue-1/eng-2018-0016/eng-2018-0016.xml>Eugen Trapet. STANDARDS AND REFERENCE ARTEFACTS FOR OPTICAL INSPECTION SYSTEMS [online]. In: . ENAC, 2014 [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: www.trapet.de
- [12] Kusworo Adi a Catur Edi Widodo. DISTANCE MEASUREMENT WITH A STEREO CAMERA. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE)*. 2017, , 1-4. DOI: 10.26562/IJIRAE.2017.NVAE10087. ISSN 2349-2163.

- [13] WEN, Xiao-qin a Jun-yuan LIANG. *Application of Kalman filtering algorithm in laser triangulation measurement*. In: *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)* [online]. IEEE, 2017, 2017, s. 5523-5527 [cit. 2020-08-11]. DOI: 10.23919/ChiCC.2017.8028233. ISBN 978-988-15639-3-4. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8028233/>
- [14] METHOD OF DISTORTING PLANE IMAGES BY MEANS OF LENSES OR MIRRORS. UNITED STATES PATENT OFFICE, 1903, s. 1-12.
- [15] P. Muller, J. Hiller, J.L. Andreasen, H.N. Hansen a L. De Chiffre. Estimation of measurement uncertainties in X-ray computed tomography metrology using the substitution method. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. ELSEVIER, 2014.
- [16] PRIMA Bilavčík, s.r.o. *Rentgenová tomografie v průmyslové měřicí technice*. 2011.
- [17] CT Scanner Facility: Background to CT, 2015 [cit. 2020-02-16]. Dostupné z: <http://blogs.sun.ac.za/ctscanner/introduction/>
- [18] Amalia HORVATIĆ NOVAK, Biserka RUNJE a Danijel BUTKOVIĆ. INFLUENCE OF GEOMETRICAL MAGNIFICATION ON COMPUTED TOMOGRAPHY DIMENSIONAL MEASUREMENTS. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT MANUFACTURING AND AUTOMATION. DOI: 10.2507/27th. ISSN 1726-9679.
- [19] KREJZEK, Ladislav. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE: Využití počítačové tomografie v rámci kontroly kvality ve strojírenském průmyslu. Praha, 2016.
- [20] XT H 225 for all-purpose X-ray and CT inspection: Computed Tomography [online]. [cit. 2020-02-16]. Dostupné z: <https://www.nikonmetrology.com/en-gb/product/xt-h-225>
- [21] XT H 225 for all-purpose X-ray and CT inspection: GE Inspection: Industrial Process Control with Computed Tomography (CT) [online]. [cit. 2020-02-16]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/GEInspectionTech/ge-inspection-industrial-process-control-with-computed-tomography-ct>
- [22] ZEISS Launch Xradia 610 & 620 Versa with Improved Source and Optics Technology: ZEISS Xradia 610 & 620 Versa X-ray [online]. [cit. 2020-02-16]. Dostupné z: <https://metrology.news/zeiss-launch-xradia-610-620-versa-with-improved-source-and-optics-technology/>
- [23] Literatura_KAPACITNI SNIMACE
- [24] SÝKORA, Jakub. OPTICKÉ 3D SKENERY. *Metrologie: metrologie v praxi*. 2016(2).
- [25] MEDŘICKÝ Radomír a Petr KELLER. Obsluha měřicích zařízení bezkontaktní metody: Vývojové a reverzní inženýrství [online]. Technická univerzita v Liberci, 2015 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2520>
- [26] MEDŘICKÝ, Radomír a Petr KELLER. 3D skenery pro použití v průmyslu: Měřicí technika pro zajištění kvality výroby [online]. AUTOMA, 2015 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/3d-skenery-pro-pouziti-v-prumyslu-2015_12_54325_7351/
- [27] Přesná průmyslová 3D metrologie [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <https://www.atos-core.com/cz/features.php>
- [28] Paul W. Marino Gages, PWM, [online], 2015, Dostupné z: <http://www.pmargage.com>

- [29] RADOMIR MENDRICKY. ANALYSIS OF MEASUREMENT ACCURACY OF CONTACTLESS 3D OPTICAL SCANNERS. MM SCIENCE JOURNAL. Technical University of Liberec, Liberec, Czech Republic, 2015. DOI: DOI: 10.17973/MMSJ.2015_10_201541.
- [30] Multisenzorová souřadnicová měřicí technika: Měření rozměrů, tvaru, polohy a drsnosti - opticky, dotykově a rentgenovou tomografií. PRIMA Bilavčík, 2008.
- [31] WERTH: Optimus 300 [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <https://www.werth.hu/en/termekek/werth-en/shopfloor-and-gage-lab/optimus-300/>
- [32] KOZÁKOVÁ, Věra. Inovace vzdělávacího modulu v nových trendech ve strojírenství: Kontrola měření [online]. Střední průmyslová škola strojnická, Olomouc, 2005 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <https://adoc.tips/tema-3-meni-souasti-3d.html>
- [33] Objektivy pro strojové vidění: Objektivy a optická soustava. Analýza obrazu [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <http://www.analyza-obrazu.cz/objektivy/>
- [34] Vít ZELENÝ, Ivana LINKEOVÁ, Jakub SÝKORA a Pavel SKALNÍK. VYHLÁŠENÍ SOUŘADNICOVÉHO MĚŘÍČÍHO STROJE ZEISS XENOS JAKO STÁTNÍHO ETALONU GEOMETRICKÝCH ROZMĚRŮ 3D OBJEKTŮ. METROLOGIE. Praha, 2019, 2019(4).
- [35] YONXING YU, ZHANG HENG, WANG ZONGCHAO a CHANG YIZHE. Deep-Hole Inner Diameter Measuring System Based on Non-contact Capacitance Sensor. Tianjin University and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. DOI: DOI 10.1007/s12209-010-1452-9.
- [36] STOKES B P, N H WINDHAM a B PIERRE. Variable-Capacitance Position Transducing. US Patent 5 099 386, 1992.
- [37] HUAXIANG, Wang. The Fundamental and Applications of Capacitance Sensor. Tianjin University Press, Tianjin, 1997.
- [38] Ma Yu-zhen, Yu Yong-Xin a Wang Xin-hua. Diameter measuring technique based on capacitive probe for deep hole or oblique hole monitoring. School of Computer Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China, 2013. DOI: doi.org/10.1016/j.measurement.2013.08.035.
- [39] LASER PROBES, RF609, RF609Rt Series: User's manual [online]. RIFTEK, 2015 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: www.riftek.com
- [40] OPTOELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS FOR GEOMETRIC QUANTITIES MEASUREMENT: PRODUCT CATALOG [online]. Minsk, Republic of Belarus Tel/Fax: RIFTEK, 2019 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: www.riftek.com
- [41] OPTOELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS FOR GEOMETRIC QUANTITIES MEASUREMENT [online]. [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://docplayer.net/74775826-Optoelectronic-instruments-and-systems-for-geometric-quantities-measurement.html>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Triangulační trojúhelník a difúzní odraz od povrchu měřeného objektu [1].	14
Obrázek 2: Konstrukční provedení komerčního laserového snímače a jeho aplikace. [4].	14
Obrázek 3: Laserový triangulační snímač řady IDL 1420 [5].	15
Obrázek 4: Schéma triangulace pro výpočet polohy bodu C.	16
Obrázek 5: Princip 2D plošného skenování [7].	17
Obrázek 6: Oblast snímání definovaná měřícím rozsahem [7].	17
Obrázek 7: Chyba měření při triangulaci vlivem zastínění svazku ostrou hranou [7].	18
Obrázek 8: Aplikace laserového profilového (liniového) skeneru [8].	18
Obrázek 9: Princip a ukázka – projekce strukturovaným světlem [9].	19
Obrázek 10: Použití automatizované inspekce pomocí 3D skeneru ATOS [10].	20
Obrázek 11: 3D pohled na geometrické znázornění polohy bodu P vůči poloze pixelů na CCD senzoru [11].	20
Obrázek 12: Vlevo, je pohled v rovině x, z a vpravo na obrázku boční pohled v rovině z, y [11].	20
Obrázek 13: Sada záměrných značek a kalibrovaný kompozitní etalon [12].	23
Obrázek 14: Princip Stereo – epipolární geometrie s paralelními optickými osami kamer [13].	23
Obrázek 15: Schéma a princip triangulačního snímače posuvu.	24
Obrázek 16: Vynesení průběhu funkce (23) do grafu.	26
Obrázek 17: Princip počítačové tomografie, použití jehlanového svazku [3].	28
Obrázek 18: Závislost zvětšení vůči poloze předmětu: a, malé zvětšení, b, velké zvětšení. [2]	29
Obrázek 19: Voxel a projekce bodů z různých pohledů. [5]	30
Obrázek 20: Ze sady d snímků je získán 3D obrazec (PET láhev s víčkem) [2].	30
Obrázek 21: Parametry ovlivňující počítačovou tomografii [1].	31
Obrázek 22: Provedení CT jednotek od různých dodavatelů: a) NIKON, b) General Electric Company a c) Carl Zeiss [21][22][23].	32
Obrázek 23: Princip a schéma optického 3D skeneru, definice objemu [26].	34
Obrázek 24: Omezení snímání předmětu optickým 3D skenerem [28].	34
Obrázek 25: Kalibrační artefakty dle VDI/VDE [28].	35
Obrázek 26: Příklad kalibračního etalonu, dle VDI/VDE 2634 části 2 a 3 [25].	35
Obrázek 27: Model normálu [30].	36

Obrázek 28: Fitování vnitřního rozměru válcové díry (GOM Inspect Professional software) [30].	36
Obrázek 29: Měření v obraze a měření na obraze [31].	37
Obrázek 30: Princip konstrukce měřicího mikroskopu: a) měřicí mikroskop, b) profilprojektor [31].	38
Obrázek 31: Měřicí projektor (Werth OPTIMUS 300) s integrovaným optoelektronickým senzorem [32].	39
Obrázek 32: Princip konstrukce: a) stroj s křížovým stolem a b) stroj se stolem konstrukce "L" [31].	39
Obrázek 33: Členění senzorů dle jejich funkce [31].	40
Obrázek 34: Senzor zpracování obrazu s osvětlením procházejícím a dopadajícím světlem [33].	40
Obrázek 35: Zobrazení standardním objektivem (horní část) a zobrazení telecentrickým objektivem (spodní část) [34].	41
Obrázek 36: Princip zpracování obrysového obrazu [31].	41
Obrázek 37: Kružnice přiřazená metodou LSM [35].	42
Obrázek 38: Princip kapacitního snímače [36].	43
Obrázek 39: Schéma a princip měřicí sondy. Sonda umístěna uvnitř kruhového otvoru [36].	44
Obrázek 40: Schéma aplikace při měření průměru díry [39].	45
Obrázek 41: Ukázka výsledků z měření [39].	45
Obrázek 42: Princip triangulační laserové sondy. Měření vnitřních rozměrů děr [24].	46
Obrázek 43: Použití triangulační laserové sondy: a) měření vnitřního průměru, b) měření dvou různých vnitřních průměrů a c) měření kónické díry [41].	46
Obrázek 44: 3D model vnitřní stěny měřené součásti [42].	47
Obrázek 45: Schéma měřicí sondy RF609-19 [40].	47
Obrázek 46: Schéma měřicí sondy RF09-619 Rt (rotační sonda) [40].	47
Obrázek 47: Laserový triangulační snímač ILD 1402-5 a rovina svazků svírajících úhel φ .	48
Obrázek 48: Znázornění roviny obou svazků.	48
Obrázek 49: Snímače pracují na principu Scheimpflugova zobrazení.	49
Obrázek 50: Počátek a konec aktivního měřicího rozsahu. SMR začátek měřicího rozsahu a EMR konec měřicího rozsahu snímače.	49
Obrázek 51: Přípravek pro zastiňování laserového svazku a optiky snímače (ocelová planžeta).	51
Obrázek 52: Schéma experimentu.	52

Obrázek 53: Realizace experimentu s detailním pohledem na stínítko: 1) optoNCDT 1402-5, 2) polohovací stoleček osa Z, 3) polohovací stoleček osa X, 4) stínítko (detail).	52
Obrázek 54: Získaná data z měření snímačem ve třech bodech AMR, při zastiňování laseru a optiky.....	53
Obrázek 55: Průběh měření při a bez zastiňování snímače.	54
Obrázek 56: Výsledné hodnoty rozdílů naměřených dat.....	55
Obrázek 57: Výběr hodnot, ležících v intervalu zvolené chyby.....	55
Obrázek 58: Označení mezních bodů.	56
Obrázek 59: Postup vynesení získaných bodů do geometrie snímače v konkrétním měřicím bodě.	58
Obrázek 60: Proložení přímek přes body v optickém poli snímače.....	59
Obrázek 61: Limitní oblasti volného prostoru.....	59
Obrázek 62: Naměřená data. Závislost vertikálního posuvu snímače a polohy spotu na diodovém poli CCD.....	60
Obrázek 63: Zobrazení signálu na diodovém poli CCD detektoru.	61
Obrázek 64: Změna poloviční šířky pásma v závislosti na vertikální poloze snímače.	62
Obrázek 65: Geometrické vyjádření referenční polohy snímače.	63
Obrázek 66: Hodnota úhlu α při změně horizontální polohy snímače.	64
Obrázek 67: Porovnání naměřených dat s modelem.....	65
Obrázek 68: Rozložení dat v intervalu směrodatné odchylky.	65
Obrázek 69: Distribuční rozdělení dat v HISTOGRAMU.	66
Obrázek 70: Odklon laserového svazku od původního směru, tak aby dopadal kolmo na vnitřní stěnu otvoru.....	67
Obrázek 71: Konstrukční provedení nástavce.	68
Obrázek 72: Odraz osvětlovacího svazku od plochy zrcátka kolmo na vnitřní stěnu díry. ...	69
Obrázek 73: Zakótování úhlu na výrobním výkrese plochy pro uchycení zrcátka.	70
Obrázek 74: Schéma snímače včetně zrcadlicí plochy.	71
Obrázek 75: Schéma polohy zrcadlicí plochy – pracovní poloha snímače.....	71
Obrázek 76: Nahoře obrobený nástavec, dole je nástavec osazený zrcátkem.	72
Obrázek 77: KM100 – optomechanický člen pro justáž v rovinách $Y - Z$ a $Y - Z$	73
Obrázek 78: Zajištění pohybu v rovině $X - Z$	73
Obrázek 79: Možnosti polohování stolečkem pracovních rovinách snímače. 1) KM100. 2) držák snímače, 3) vymezení vůle, 4) polohování a 5) ramínko.....	73
Obrázek 80: Prototyp pouzdra pro uchycení stolečku a nástavce se zrcadlicí plochou.	74

Obrázek 81: Prototyp modifikovaného snímače před testovacím měření – nastavení do pracovní polohy.	75
Obrázek 82: Snímání polohy zrcátka pomocí makroskopu.	76
Obrázek 83: Určení mezní vzdálenosti zrcátka od stěny destičky. Vlevo pozice $x = 0$ mm, vpravo $x = 8$ mm.	77
Obrázek 84: Justáž osvětlovacího svazku do jeho pracovní polohy.	78
Obrázek 85: Záznam dat v jednotlivých skocích.	79
Obrázek 86: Grafické znázornění výběru stacionárních dat.	79
Obrázek 87: Vynesení průměrných hodnot z jednotlivých kroků.	81
Obrázek 88: Vynesení hodnot odchylek mezi reálnými daty a modelem.	82
Obrázek 89: Intenzita signálu v rámci a mimo pracovní rozsah snímače.	83
Obrázek 90: Oblast měřicího rozsahu snímače a jeho polohy.	83
Obrázek 91: Krajní polohy snímače v ose Z v závislosti na poloze snímače v ose X.	84
Obrázek 92: Posunutí hodnot do společného výchozího bodu.	87
Obrázek 93: Pozice snímače se zastíněným svazkem.	89
Obrázek 94: Zobrazení v řezu rovinou kolmou na optickou osu.	89
Obrázek 95: Řez reflektovaným svazkem. Vlevo pozice $x=-0,2$ mm a $z=-9,5$ mm. Vpravo $x=-1,2$ mm a $z=-12,5$ mm.	92

Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry podle třídy modelu snímače.....	15
Tabulka 2: Porovnání komerčních optických 3D skenerů.....	37
Tabulka 3: Technické parametry snímače optoNCDT ILD 1402-5.	50
Tabulka 4: Výsledné hodnoty mezních bodů z naměřených dat.....	57
Tabulka 5: Krajiní polohy snímače a odchylky vůči jeho referenční poloze.....	64
Tabulka 6: Vnitřní parametry systému snímače.....	66
Tabulka 7: Vstupní parametry pro návrh nástavce.....	70
Tabulka 8: Výsledky naměřených dat.	80
Tabulka 9: Naměřená data $x = -0,2$ mm.	85
Tabulka 10: Naměřená data $x = -0,6$ mm.	85
Tabulka 11: Naměřená data, $x = -1,2$ mm.....	86
Tabulka 12: Vyhodnocení nově získaných dat.....	88
Tabulka 13: Uspořádání uvnitř systému snímače ILD 1402-5.....	91
Tabulka 14: Mezní polohy podél osy Z.....	92

Přílohy

Položka	Název	Číslo výkresu	Počet [ks]
1	POUZDRO	EX-01-01-20	1
2	DESKA	EX-02-01-20	1
3	PŘÍTLAČNÁ DESKA	EX-03-01-20	1
4	RAMÍNKO	EX-04-01-20	1
5	NÁSTAVEC	EX-05-01-20	1
6	SESTAVA	KS-09-81-00	1
7	KUSOVNÍK	ILD-MOD-01-01-20	1

Přílohou této práce je také CD nosič, na kterém jsou uložena naměřená a vyhodnocená data.