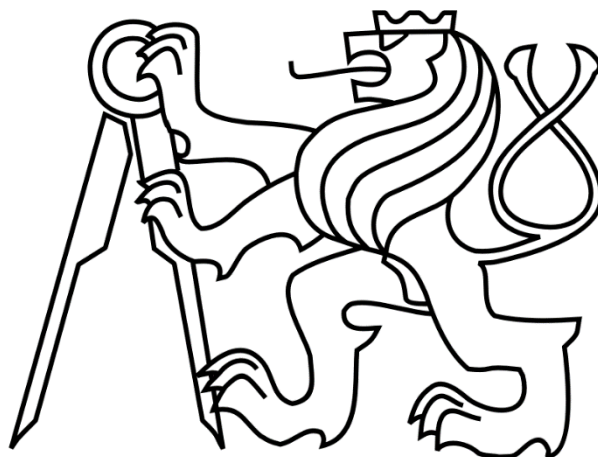


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



# Bakalářská práce

Návrh zařízení na výrobu a kalibraci fotogrammetrických tyčí

2017

Jaromír Hynek



### Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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. 6. 2017

.....

Podpis



## Poděkování

Chtěl bych poděkovat své přítelkyni, rodině a přátelům za podporu a trpělivost. Hlavní poděkování bych pak chtěl věnovat vedoucímu práce Ing. Martinu Marešovi Ph.D., který se přes mé i své pracovní vytížení vždy snažil najít společný čas k řešení problémů, a to nejen v rámci pracovního týdnu. Díky lidskému přístupu a ochotě byla práce příjemným počinem. Dále bych rád poděkoval také kolegům. Pavel Skalník byl vždy k dispozici a nemalou měrou přispěl zejména během porovnávacího měření na souřadnicovém měřicím stroji Werth. Kolega Ing. Jakub Sýkora mi byl k dispozici jako konzultant a vždy byl ochoten se zamýšlet nad otázkami této bakalářské práce. Velké poděkování si zaslouží i můj nadřízený Doc. Ing. Vít Zelený, CSc. za poskytnutí podpory a dobrých časových podmínek během celého studia.

## **Anotace**

Autor:	Jaromír Hynek
Název BP:	Návrh zařízení na výrobu a kalibraci fotogrammetrických tyčí
Rozsah práce:	47 str., 43 obr., 10 tab.
Školní rok vyhotovení:	2017
Škola:	ČVUT – Fakulta strojní
Ústav	U12135 - Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Martin Mareš, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Jakub Sýkora
Zadavatel:	Český metrologický institut
Využití:	Výroba a kalibrace fotogrammetrických tyčí
Klíčová slova:	měření, fotogrammetrie, kalibrace
Anotace:	Cílem je navrhnout zařízení na výrobu a následnou kalibraci fotogrammetrických tyčí. Zařízení má sloužit k přesnému nalepení záměrných terčů na tyč z uhlíkového kompozitu a zjištění vzájemné polohy těchto terčů.

**Annotation:**

Author:	Jaromír Hynek
Title of bachelor dissertation:	Design of apparatus for manufacturing and calibration of photogrammetric measuring artefacts
Extent:	47 p., 43 fig., 10 tab.
Academic year:	2017
University:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	U12135 – Department of Producing Machines
Supervisor:	Ing. Martin Mareš, Ph.D.
Consultant:	Ing. Jakub Sýkora
Submitter of the theme:	Czech Metrology Institute
Application:	Production and calibration of standards for photogrammetry
Key words:	measuring, photogrammetry, calibration
Annotation:	The aim is to design an equipment for the production and subsequent calibration of photogrammetric rods. The device should allow to accurately adhere the targets to the carbon composite rod and determine the relative position of these targets.

# Obsah

1	Úvod .....	9
2	Cíl.....	10
3	Stav řešené problematiky.....	11
3.1	Měření .....	11
3.1.1	Zdroje nepřesnosti výroby.....	11
3.1.2	Způsoby kontroly kvality výroby.....	11
3.2	Principy optického skenování .....	11
3.3	Aktivní triangulace .....	12
3.3.1	Aktivní triangulace 1D .....	12
3.3.2	Aktivní triangulace 2D .....	13
3.3.3	Aktivní triangulace 3D .....	13
3.4	Pasivní triangulace.....	14
3.4.1	Fotogrammetrie .....	15
3.4.2	Kalibrační tyče .....	16
4	Současná výroba a kalibrace fotogrammetrických tyčí.....	18
4.1	Rozvaha použití způsobu výroby a kalibrace fotogrammetrických tyčí .....	19
5	Vlastní zpracování .....	20
5.1	Požadované parametry.....	20
5.1.1	Obecné požadavky na konstrukci.....	20
5.1.2	Požadavky na přesnost .....	20
5.2	Varianty řešení.....	21
5.2.1	Varianta 1 LI-LI.....	21
5.2.2	Varianta LI-krokový motor.....	22

5.2.3	Srovnání a výběr vhodné varianty .....	23
6	Návrh zařízení.....	24
6.1	Popis konstrukce.....	25
6.2	Pohon osy Y1 .....	27
6.3	Konstrukční návrh.....	28
7	Realizace.....	29
7.1	Výroba zařízení .....	29
7.2	Montáž.....	29
8	Výroba etalonu.....	30
8.1	Požadavky na kalibrační tyče .....	30
8.2	Postup aplikace značek.....	30
9	Měření.....	35
9.1	Postup měření .....	35
9.2	Naměřená data .....	38
9.3	Nejistota měření.....	40
9.3.1	Příspěvky nejistoty.....	40
9.3.2	Rozpočet nejistoty .....	40
9.4	Vyhodnocení .....	43
9.4.1	Mezilaboratorní porovnávací zkouška.....	43
9.4.2	Vyhodnocení MPZ.....	44
10	Závěr.....	46
11	Použitá literatura.....	47
	Příloha A - Výkres sestavy navrhovaného zařízení.....	i



# 1 Úvod

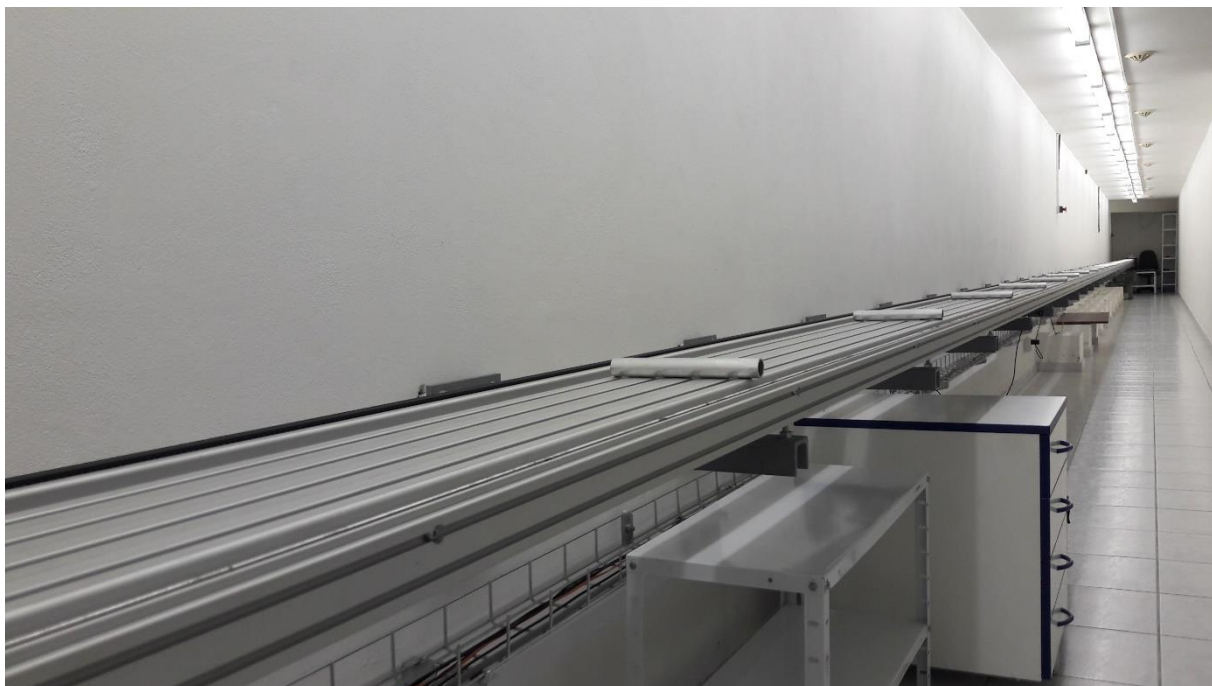
Trendem posledních desetiletí ve strojírenství je zvyšování nároků nejen na kvalitu, ale také na rychlost provedení. Tento rozvoj se tedy promítá i do kontroly kvality, která je nejen nezbytnou součástí přesné strojní výroby, ale také odměřování polohy během pracovního procesu.

Požadavky na rychlost provedení a komplexnost měřených dat jsou příčinou k nárůstu použití optických metod měření, které sice zatím nedosahují přesnosti dotykových měření, ale v rychlosti snímání jsou daleko napřed.

V České republice i zahraničí je evidován zvýšený zájem o použití optických metod měření, což přináší rychlé rozšíření technologie do průmyslu. Z toho vyplývá i narůstající poptávka zákazníků o kalibrace a výrobu etalonů pro fotogrammetrii. Je tedy nutné poskytnout i podporu v podobě zajištění kompletního metrologického servisu pro provoz optických měřidel. Úkolem Českého metrologického institutu (ČMI) je poskytnout zákazníkům návaznost na státní etalon délky. Jako reakce na poptávku zákazníků bylo rozhodnuto o rozšíření nabídky služeb ČMI o kalibraci a výrobu etalonů pro toto odvětví vývojem nového zařízení.

## 2 Cíl

Cílem práce je návrh a výroba zařízení, které má sloužit v ČMI k **výrobě** a **kalibraci** etalonových tyčí používaných při fotogrammetrii. Zařízení bude navrženo a vyrobeno v dílnách ČMI jako nástavba na stávající 32 m dlouhou měřicí trať<sup>1</sup> (Obr. 1). Následně budou na tomto zařízení vyrobeny kalibrační tyče nalepením záměrných terčů a provedeny experimenty měření přesnosti nalepení záměrných terčů. Dále se práce bude zabývat podrobným zmapováním výrobních nepřesností stávající trati, zkoumáním příspěvků chyby měření, vyhodnocením opakovatelnosti měření, a bude vypočtena nejistota, která bude používána při kalibracích jiných etalonových tyčí zákazníků ČMI. Na závěr bude vybraná etalonová tyč změřena na optickém souřadnicovém měřicím stroji Werth. Experiment bude završen vyhodnocením formou mezilaboratorního porovnání mezi souřadnicovým měřicím strojem Werth a vyrobeným zařízením.



Obr. 1: Měřicí trať

---

<sup>1</sup> Trať nyní slouží ke kalibraci laserových dálkoměrů, měřických pásem, čárkových měřítek a jiných měřidel.

## 3 Stav řešené problematiky

### 3.1 Měření

Kontrola kvality výrobku je nedílnou součástí výrobního procesu. Měření rozměrových a geometrických charakteristik je zajištěno širokým druhem měřidel. V poslední době zaznamenáváme progresivní nárůst nových měřicích systémů, které se pro kontrolu kvality úspěšně využívají. Příkladem mohou být právě Optické 3D skenery, počítačová tomografie (CT), nebo laser trackery.

#### 3.1.1 Zdroje nepřesnosti výroby

- chyby geometrie stroje
- vlivy řezné síly
- tepelné deformace
- opotřebení nástroje

#### 3.1.2 Způsoby kontroly kvality výroby

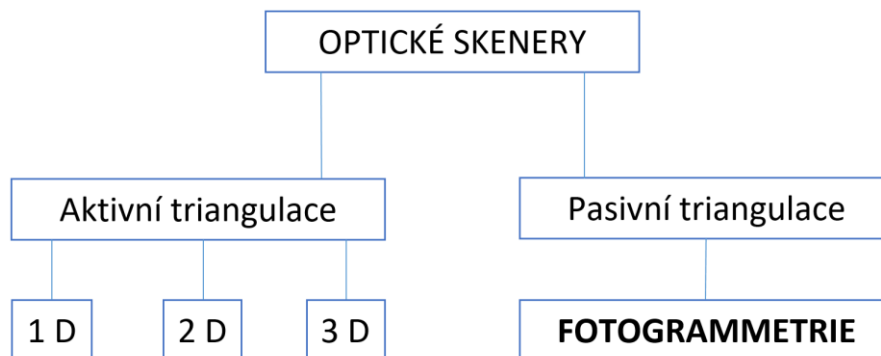
- Konvenční měřidla - posuvná měřítka, mikrometry, kalibry
- Jednouúčelové měřicí stroje - stroje na měření hřídelů, ozubení
- Souřadnicový měřicí stroje - dotykové SMS, optické SMS, 3D skenery

### 3.2 Principy optického skenování

Optické skenery využívají bezkontaktního měření souřadnic bodů na povrchu skenované součásti a jejich následného počítačového zpracování [1]. K optickému snímání povrchu měřených objektů je využit princip triangulace, která využívá trigonometrie a elementární geometrie k určení souřadnic a vzdáleností dělící se na:

- **aktivní** (Obr. 2)
- **pasivní**

Další možné dělení je podle způsobu projekce světelné stopy.



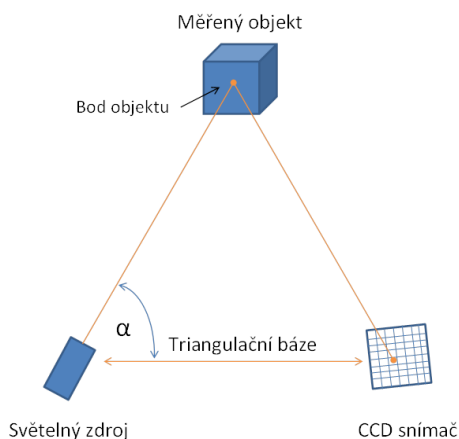
Obr. 2: Rozdělení optických skenerů

### 3.3 Aktivní triangulace

Aktivní triangulace funguje na principu vytvoření světelné stopy pomocí projektoru na měřeném objektu a jejího sejmutí, přičemž zdroj světla, objekt a přijímač tvoří trojúhelník známých rozměrů. Podle rozměru stopy promítané na měřený objekt se aktivní triangulace dále dělí na **1D**, **2D** a **3D**.

#### 3.3.1 Aktivní triangulace 1D

Stopou je bod tvořený pomocí laserového paprsku, jak uvedeno na Obr. 3 Tento princip je využit například v laserových snímačích vzdálenosti firmy Micro-Epsilon (Obr. 4) [2], které se však používají spíše k odměřování vzdáleností jen v jednom směru. Snímače tohoto typu nacházejí uplatnění převážně ve výrobních linkách a automatizovaných pracovištích k určování polohy pohyblivých částí a udávání informace o poloze a rozměrech výrobků.



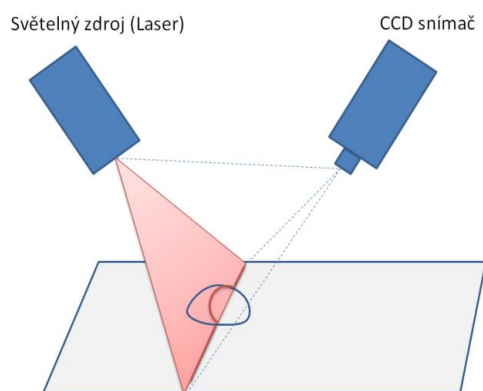
Obr. 3: Princip 1D aktivní triangulace



Obr. 4: Snímač Mikro Epsilon [2]

### 3.3.2 Aktivní triangulace 2D

Stopou je přímka (Obr. 5) tvořená pomocí laserového paprsku rozmítaného pohybujiícím se zrcátkem do přímky. Ta se na základě tvaru snímaného povrchu zakřivuje. Snímáním tohoto zakřivení je získán mrak bodů o známých souřadnicích každého sejmutého bodu. Často je tento druh snímače používán v kombinaci s ručními souřadnicovými měřicími rameny [3] pro kontrolu méně přesných plastových dílů v automobilovém průmyslu, kde není žádoucí přítlačná síla dotykových systémů kvůli deformaci dílu. Snímači aktivní 2D triangulace jsou vybavována například měřicí 3D ramena od firmy FARO s liniovým laser skenerem (Obr. 6) [4] Laserový skener je schopen sejmut téměř 20 000 bodů/s přesností  $\pm 35\mu\text{m}$  [4].



Obr. 5: Princip 2D aktivní triangulace

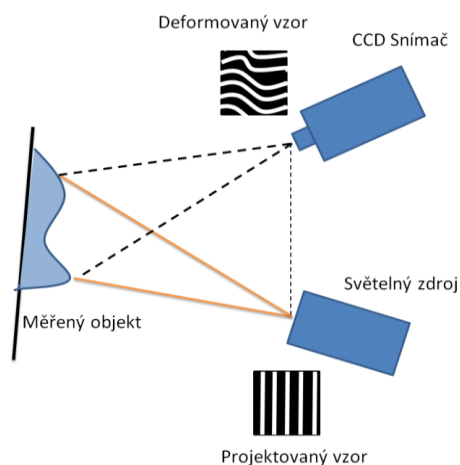


Obr. 6: Liniový Laser skener použitý na systému FARO [4]

### 3.3.3 Aktivní triangulace 3D

Pro měřicí systémy používající aktivní 3D triangulaci je stopou plocha (Obr. 7) tvořená pomocí promítaných vzorů např. pruhů (anglicky *fringe projection*). Oproti 2D aktivní triangulaci je velký nárůst počtu měřených bodů na povrchu součásti při stejném čase. Tato metoda přináší značné zrychlení. V současnosti dosahuje nejlepších výsledků optického 3D skenování firma GOM [5] se skenerem ATOS III Triple Scan (Obr. 8). Jejich přenos se liší v závislosti na rozměrech měřicího objemu a rozlišení kamer. Skener je schopen snímat až v přesnostech jednotek mikrometrů. Díky možnosti instalace na nejrůznější

automatická polohovací zařízení nachází tento systém široké uplatnění v mnoha odvětvích strojírenství. Další podstatnou výhodou je mobilita měřicího systému.



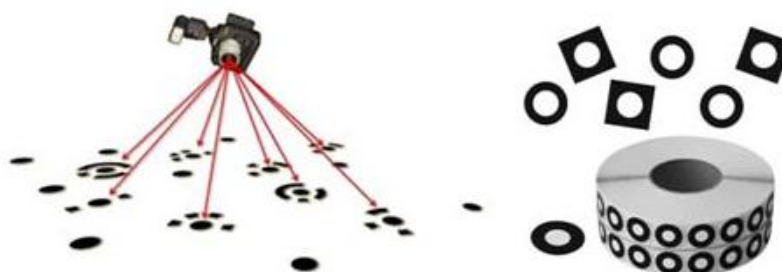
Obr. 7: Princip 3D aktivní triangulace



Obr. 8: Skener ATOS III Triple Scan [5]

### 3.4 Pasivní triangulace

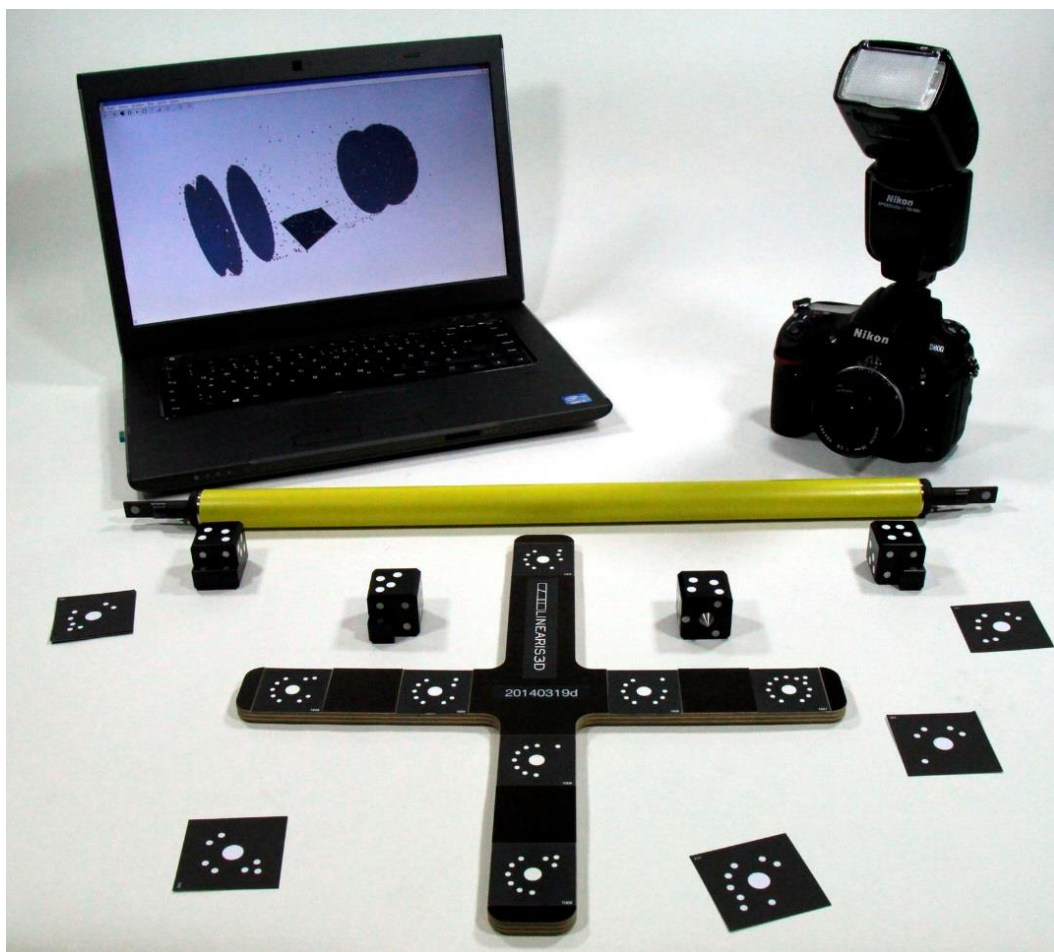
Pasivní triangulace (Obr. 9) funguje na principu pořizování a vyhodnocování snímků měřeného objektu pomocí fotoaparátu s vysokým rozlišením (**fotogrammetrie**). Měřený objekt je opatřen záměrnými terči a je fotografován z různých úhlů a vzdáleností. Záměrné terče slouží ke složení pořizovaných fotografií do 3D obrazce pomocí počítače. Ve scéně měření musí být umístěny kalibrované etalony např. **kalibrační tyč** o známé vzdálenosti záměrných terčů určující správné měřítko.



Obr. 9: Princip pasivní triangulace

### 3.4.1 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie se obecně zabývá rekonstrukcí a měřením tvarů pomocí počítačového zpracování fotografií sledovaného objektu. Jde o mobilní systém (Obr. 10), který na rozdíl od souřadnicových měřicích strojů nevyžaduje pevnou instalaci a umožňuje velmi rychlé snímání měřených bodů. Díky těmto vlastnostem nabízí velice širokou škálu využití bez nároku na pracovní prostředí. Fotogrammetrie je vhodná zejména pro měření a kontrolu rozměrných výrobků, které je obtížné nebo časově náročné měřit pomocí souřadnicových měřicích strojů [6]. Metodu lze vzhledem k nižším nárokům na čistotu provozu také efektivně využít v náročných podmínkách průmyslových výrobních podniků. Bezdotykový systém umožňuje snímání i na povrchu rozměrných těles s vysokou teplotou, a tak nabízí využití ke kontrole tvaru a rozměrů výkovků, odlitků a výlisků mezi jednotlivými operacemi v průběhu výrobního procesu. Nabízí také možnost použití v klima-komorách nebo pro online měření deformací během např. trhacích zkoušek, kde jsou využitím rychlého snímání analyzovaného vzorku sledovány jeho změny.



Obr. 10: Set pro fotogrammetrii

### 3.4.2 Kalibrační tyče

Kalibrační tyče (Obr. 11) vybavené záměrnými terči (Obr. 12) slouží ve fotogrammetrii jako referenční artefakty. Jejich tvary a rozměry mohou být navrhovány dle požadavků na konkrétní aplikaci. Princip pasivní triangulace využívající tyče spočívá v tom, že se artefakty vhodně zvoleným způsobem rozmístí do scény měření součásti tak, aby byly vidět v záběru každé fotografie (Obr. 13). Následně je měřená součást včetně tyčí několikrát z různých úhlů vyfotografována. Fotografie jsou na základě vzájemných poloh kódových značek na tyčích převedeny do 3D modelu pomocí softwaru (SW) pro zpracování obrazu. Prostorová přesnost vzniklého modelu závisí na správném přiřazení délkových rozměrů jednotlivých částí modelu dle příslušejících tyčí. Kalibrační tyče a jejich kvalita tak hrají klíčovou roli pro korektní vytvoření přesného prostorového modelu. Je tedy kladen značný důraz na vysokou přesnost výroby, rozměrovou stálost a kalibraci těchto tyčí s co nejnižší nejistotou. Hlavním úkolem práce tedy bude navrhnout zařízení tak, aby splňovalo především požadavky co nejnižší nejistoty kalibrace.



Obr. 11: Fotogrammetrická kalibrační tyč





*Obr. 12: Detail záměrného terče*



*Obr. 13: Rozmístění fotogrammetrických tyčí ve scéně měření*

## 4 Současná výroba a kalibrace fotogrammetrických tyčí

Nejvýznamnějším výrobcem a prodejcem 3D skenerů na světě je Firma GOM [7]. Ta používá k fotogrametrii etalonové tyče kalibrované v německé firmě Carl Zeiss [8], která nabízí kalibrace fotogrammetrických tyčí pomocí portálového souřadnicového stroje Carl Zeiss Accura (Obr. 14) s optickým snímacím systémem ViScan (Obr. 15). Přesnost tohoto stroje je definována pomocí maximální dovolené chyby (MPE z anglického *maximum permissible error*) viz rovnice ( 1 ).

$$MPE = 2,2 + \frac{L}{300} [\mu m] \quad (1)$$

kde  $L$  je měřená délka udávaná v metrech. MPE je krajní hodnota chyby měření vzhledem ke známé referenční hodnotě veličiny, dovolená specifikacemi nebo předpisy pro dané měření, měřidlo nebo měřicí systém [9]. Pracovní prostor použitého stroje má rozměry (DxŠxV) 2000x420x1500 mm [8].



Obr. 14: Souřadnicový měřicí stroj Carl Zeiss Accura



Obr. 15: Optická sonda Zeiss ViScan

## 4.1 Rozvaha použití způsobu výroby a kalibrace fotogrammetrických tyčí

Následující tabulky (Tab. 1 a Tab. 2) obsahují shrnutí výhod a nevýhod použití souřadnicového měřicího stroje a navrhovaného zařízení.

*Tab. 1: Výhody a nevýhody použití souřadnicového měřicího stroje*

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> <li>• dostatečně velký pracovní prostor pro kalibrace všech rozměrů tyčí</li> <li>• dostatečně nízká MPE</li> <li>• možnost širšího využití (dotyková měření)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lze použít jen pro kalibrace, nalepení terčů nutné řešit na zvláštním zařízení</li> <li>• vysoká pořizovací cena stroje</li> <li>• vysoké provozní náklady stroje</li> <li>• vysoké nároky na kvalifikaci operátora</li> </ul>

*Tab. 2: Výhody a nevýhody použití navrhovaného zařízení*

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> <li>• dostatečně velká pracovní délka v ose X pro kalibrace dlouhých tyčí,</li> <li>• dostatečně nízká MPE</li> <li>• lze použít i pro nalepení záměrných terčů</li> <li>• nízká pořizovací cena stroje</li> <li>• nízké provozní náklady stroje</li> <li>• nízké nároky na kvalifikaci operátora</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nelze používat na dotyková měření</li> </ul>

Z rozvahy způsobu výroby a kalibrace fotogrammetrických tyčí vyplývá, že použití navrhovaného zařízení za daných podmínek převyšuje svými výhodami použití souřadnicového měřicího stroje.

## 5 Vlastní zpracování

### 5.1 Požadované parametry

Zařízení bude navrženo jako nadstavba na stávající univerzální měřicí trať (Obr. 1) s ohledem na úplné zachování všech původních funkcí a vlastností. **Budou zpracovány 2 varianty návrhu**, z nichž proběhne výběr varianty finální konstrukce zařízení. Zařízení musí splňovat jak požadavky na **konstrukci**, tak i na splnění **přesnosti**. Stanovení těchto požadavků předcházela autorův důkladný rozbor pracovního postupu nalepení záměrných terčů a postupu měření. Na základě této analýzy byly sumarizovány vlastnosti, které má zařízení splňovat.

#### 5.1.1 Obecné požadavky na konstrukci

- **kompaktnost** – Přidání nových částí do konstrukce zařízení bude řešena pomocí ustavovacích prvků, zajišťujících snadnou montáž na správnou pozici a jejich upevnění pomocí jednoho aretačního šroubu
- **snadná obsluha** – Posuv v obou osách bude zajištěn pomocí pohonů tak, aby byl odstraněn vliv pohybu operátora v oblasti měření, což by mohlo přinášet negativní vliv změny teploty během měření.
- **rychlé ustavení** – Bude řešeno odstraněním justáže odměřovacích prvků. Seřízení odměřování v hlavních měřicích osách bude provedeno pouze při instalaci nových částí zařízení.

#### 5.1.2 Požadavky na přesnost

- opakovatelnost nalepení záměrného terče do: 50  $\mu\text{m}$
- nejistota kalibrace tyče ( $U_p$ ) do:

$$U_p = (5 + 5 \cdot L) [\mu\text{m}] \quad (2)$$

kde  $L$  je délka kalibrační tyče dosazovaná do rovnice ( 2 ) v metrech.

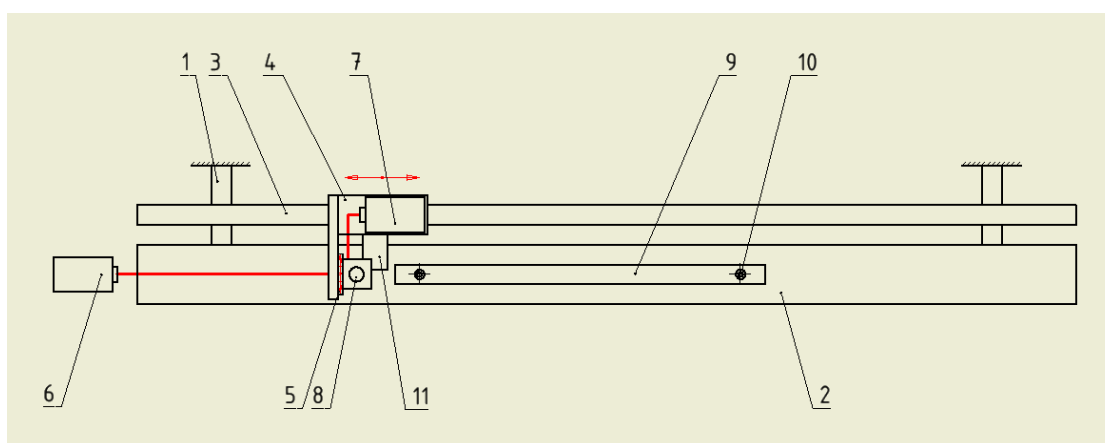
## 5.2 Varianty řešení

Stávající trať je smontována ze stavebnicového systému duralových profilů a kotvena pomocí ocelových nosníků do stěny laboratoře. Je vybavena lineárním vedením a pojezdem v ose  $X$  poháněným krokovým motorem Maxon [10]. Úkolem návrhu bude vybavení trati:

- Pojezdem
- Odměřováním v ose  $Y$
- Nalepovací hlavou

### 5.2.1 Varianta 1 LI-LI

První varianta je vybavena odměřováním obou hlavních os pomocí laserového interferometru (LI). Toto řešení nabízí vysokou přesnost odměřování v obou hlavních osách, nevýhodou je však hmotnost LI, která bude přinášet nárůst dynamických sil při rozjezdu a brždění. Dalšími negativními aspekty řešení je teplota LI v blízkosti měřicího prostoru, nebezpečí přerušení paprsku laserového interferometru osy  $Y$  a obtížné propojení. Z hlediska prostoru, který interferometr zabírá na stolku osy  $X$  může nastat komplikace se zabudováním nalepovací hlavy. Pojezd v obou osách je řešen krokovými motory.

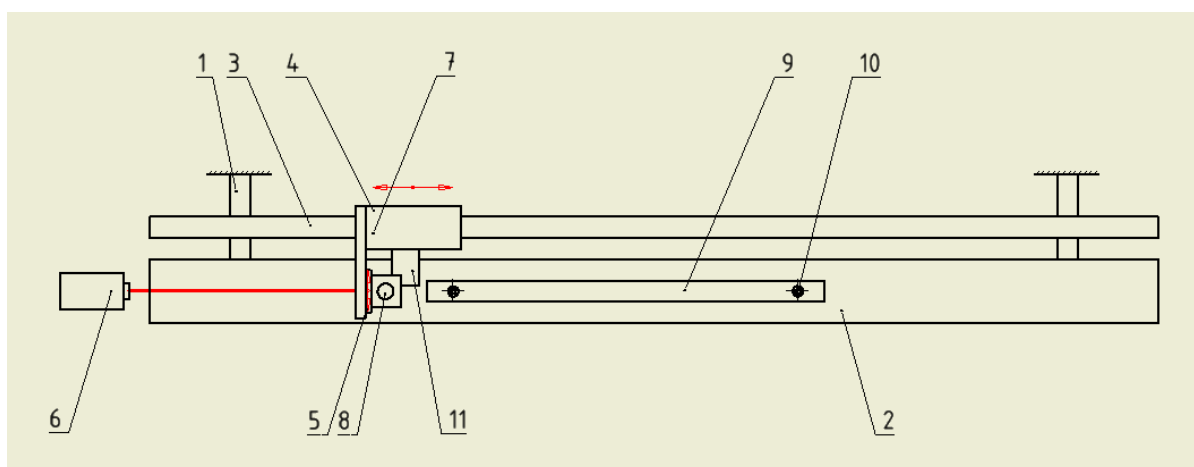


- |                                    |                                    |
|------------------------------------|------------------------------------|
| 1 - rám                            | 7 - laserový interferometr osy $Y$ |
| 2 - lože                           | 8 - CCD kamera                     |
| 3 - pojezd osy $X$                 | 9 - kalibrační tyč                 |
| 4 - stůl osy $X$                   | 10 - záměrný terč                  |
| 5 - pojezd osy $Y$                 | 11 - nalepovací hlava              |
| 6 - laserový interferometr osy $X$ |                                    |

Obr. 16: Schéma varianty 1

## 5.2.2 Varianta LI-krokový motor

Druhá varianta se od první liší především nahrazením odměřování osy Y LI zabudováním krokového motoru vybaveného nepřímým odměřováním. Toto řešení oproti předešlému nabízí výrazné snížení dynamických hmot, částečnou eliminaci problému teploty a lepší prostorové podmínky pro zástavbu nalepovací hlavy do systému. Zcela pak padá možnost přerušení paprsku během obsluhy zařízení. Oproti odměřování osy Y pomocí LI je však snížena dosahovaná přesnost.



- |                  |                                  |
|------------------|----------------------------------|
| 1 - rám          | 6 - laserový interferometr osy X |
| 2 - lože         | 7 - CCD kamera                   |
| 3 - pojezd osy X | 8 - kalibrační tyč               |
| 4 - stolek osy X | 9 - záměrný terč                 |
| 5 - pojezd osy Y | 10 - nalepovací hlava            |

Obr. 17: Schéma varianty 2

### 5.2.3 Srovnání a výběr vhodné varianty

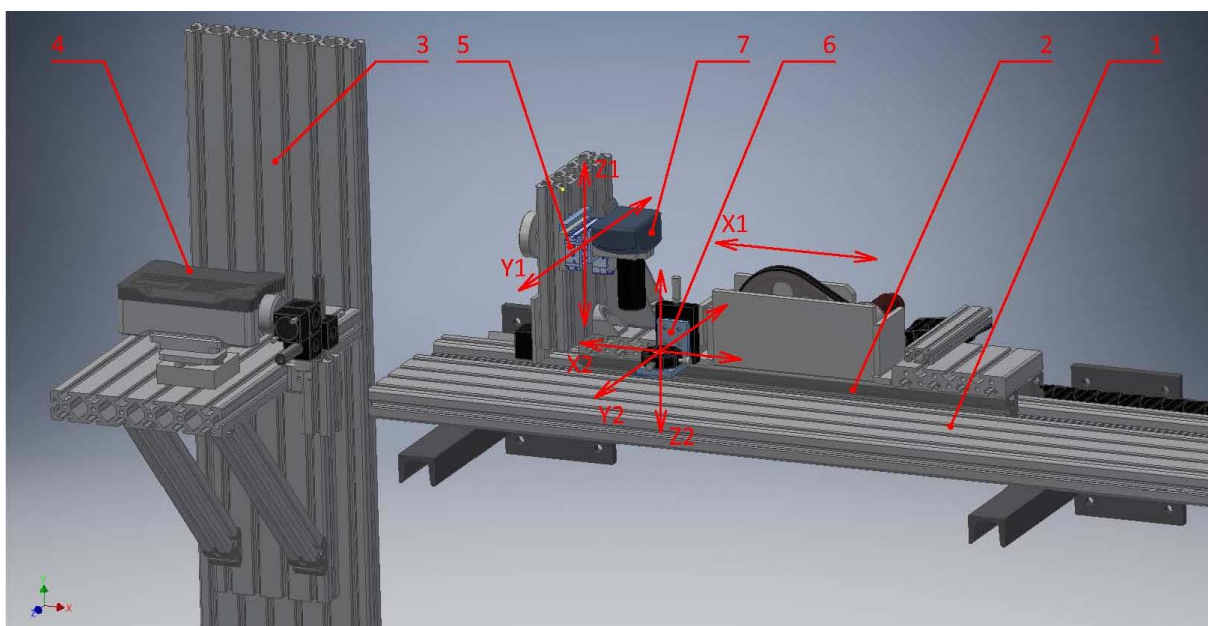
Tab. 3: Porovnání výhod a nevýhod Varianty 1 a 2 konstrukčního řešení zařízení

	<b>Varianta 1 (LI-LI)</b>	<b>Varianta 2 (LI-motor)</b>
<b>Výhody</b>	vyšší přesnost v ose $Y$	nízká hmotnost malé rozměry nízká pořizovací cena nenáročné propojení
<b>Nevýhody</b>	větší hmotnost větší velikost obtížné řešení propojení vysoká pořizovací cena	nižší přesnost v ose $Y$

Z Tab. 3 vyplývá jako vhodnější výběr varianty 2 (LI-krokový motor), která používá nepřímého odměřování krokového motoru lineárního vedení osy  $Y$ . Řešení vybrané varianty bude podrobně popsáno v následující kapitole.

## 6 Návrh zařízení

Před započítím práce na návrhu bylo zapotřebí důkladně rozebrat způsob práce s hotovým zařízením. Z toho vplynuly dvě funkce stroje a následně i rozdělení stroje na dvě funkční části. Těmi jsou **nalepovací hlava** a **odměřovací část**. U obou těchto částí je zapotřebí pohyb ve třech osách, jak je patrné z Obr. 18.



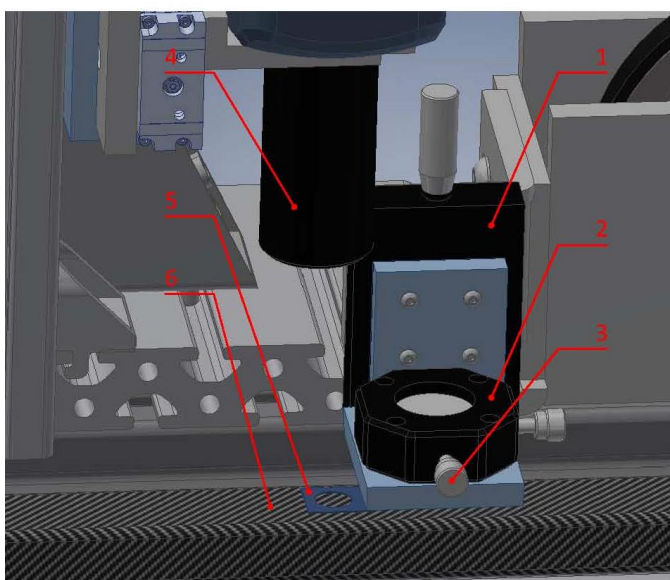
- 1- Stůl
- 2- Pojezdový stolek osy  $X_1$
- 3- Stůl laserového interferometru
- 4- Laserový interferometr
- 5- Lineární vedení osy  $Y_1$
- 6- Nalepovací hlava
- 7- CCD kamera

Obr. 18: Navrhované zařízení s popisem pracovních os



## 6.1 Popis konstrukce

Hlavní nosnou částí konstrukce je stůl upevněný na ocelové nosníky uchycené do stěny laboratoře. Na nosníky je rovnoběžně se stolem připevněno lineární vedení pojezdového stolku osy X1. Nezávisle na trati je ke zdi laboratoře přikotven i výškově stavitelný stůl laserového interferometru Obr. 18. Hlavní funkční části stroje jsou připevněny na pojezdový stolek osy X1, kterým jsou unášeny. Těmi jsou nalepovací hlava a lineární vedení osy Y1 s krokovým motorem. Na lineárním vedení osy Y1 je umístěna i CCD kamera. Detail konstrukčního řešení nalepovací hlavy s vyznačením pracovních os je uveden na Obr. 19.

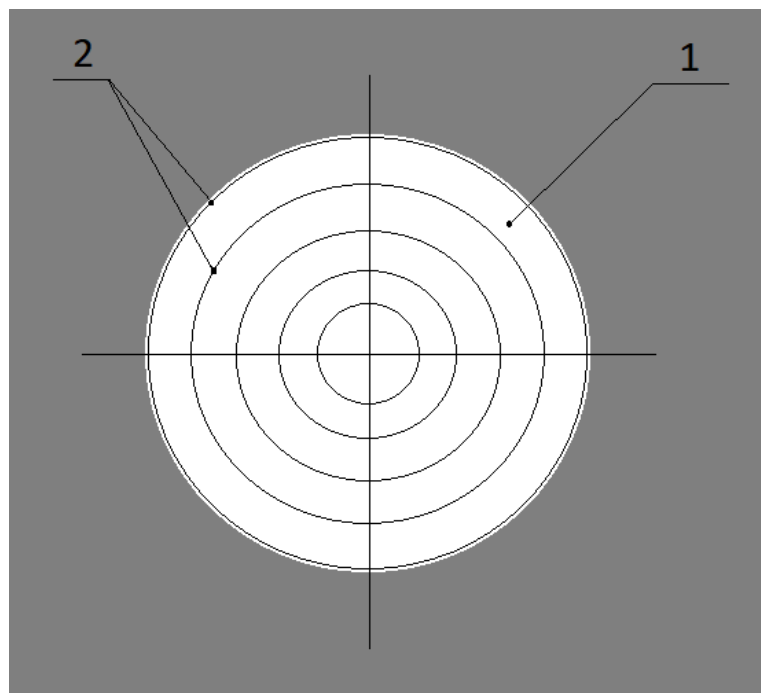


- 1- Lineární vedení osy Z2
- 2- Stavěcí šroub osy X2
- 3- Stavěcí šroub osy Y2
- 4- Objektiv CCD kamery
- 5- Aplikační planžeta
- 6- Fotogrammetrická tyč

Obr. 19: Detail: nalepovací hlava

Na odměřovací části bylo zapotřebí zajistit pohyb v hlavních osách X1 a Y1 (popis a poloha os viz Obr. 18). Obě hlavní odměřovací osy X1 a Y1 jsou vybaveny pohonem. Osa Z1 slouží pouze k nastavení CCD kamery (Obr. 21) do pracovní vzdálenosti. Z tohoto důvodu bylo zvoleno ruční ovládní osy Z1.

Nalepovací hlava (Obr. 19) s aplikační planžetou je opatřena dvěma stavěcími šrouby s jemným stoupáním pro pohyb v osách X2 a Y2, které slouží k ručnímu nastavení středu značky do středu soustředných kružnic zorného pole CCD kamery. Soustředné kružnice jsou na terč zaměřovány tak, aby byla největší z nich (pro konkrétní velikost terče měřené tyče) vepsána co nejblíže okraji terče - Obr. 20.



1 – značka nalepená na tyči

2 – soustředné kružnice

Obr. 20: Schéma značky se soustřednými kružnicemi

Osa Z2 nalepovací hlavy je vybavená šroubem s jemným stoupáním. Slouží pro posun aplikační planžety a nalepení značky na povrch kalibrační tyče. Aplikační planžetu je možné kyvným pohybem přesouvat do polohy pro přípravu značky nebo pracovní polohy k nalepení. Další postup při návrhu zařízení se odvíjel od výběru varianty 2, která využívá kombinace odměřování osy X1 pomocí LI (Obr. 22) a nepřímého odměřování krokového motoru pro osu Y1 (Obr. 23).



• Rozhraní	Firewire
• Barva	Ano
• Upevnění objektivu	Typ C
• Rozlišení	1280 x 1024 (1,3MP)
• Velikost senzoru	1/2'
• Typ senzoru	CMOS

Obr. 21: CCD kamera Pixelink [11]



- Lineární rozlišení 1 nm
- Podmínky prostředí 0 – 40°C,  
650-1150 mbar
- Snímací frekvence  $\leq 50$  kHz
- Max. rychlost lineárního měření 4 m/s
- Rozhraní USB

Obr. 22: Laserový interferometr Renishaw XL 80 [12]

## 6.2 Pohon osy Y1

Po ujasnění základního schématu stroje bylo nutné prozkoumat sortiment prodejců motorizovaných lineárních vedení a vybrat konkrétní výrobek. Jako nejvhodnější bylo zvoleno lineární vedení ZABER X-LSM025A-E03 (Obr. 23) [13]. Toto řešení sice nenabízí dostatečnou přesnost polohování, ale díky vysoké opakovatelnosti najetí na polohu je možné nepřesnost korigovat na základě korekčních dat z kalibrace tohoto vedení. To znamená, že chyby odměřování v konkrétních polohách budou kompenzovány konkrétní velikostí naměřené chyby. Vedení navíc vyniká i malými rozměry.



- Velikost mikrokroku 0,048  $\mu\text{m}$
- Vestavěný kontroler Ano
- Pracovní zdvih 25,4 mm
- Přesnost 8  $\mu\text{m}$
- Opakovatelnost najetí  $< 1$   $\mu\text{m}$

Obr. 23: Lineární vedení Zaber XLSM025A-E03

## 6.3 Konstrukční návrh

Práce na konstrukčním návrhu byla zahájena zpracováním všech nakupovaných a již hotových součástí do formy CAD modelů v SW Autodesk Inventor Professional 2017. Poté následovala konstrukce nových součástí k dokončení celé sestavy. Výkres sestavy viz Příloha A.

## 7 Realizace

### 7.1 Výroba zařízení

Výroba zařízení byla realizována v dílnách ČMI LPM Praha. Během konstrukce chybějících dílů Obr. 24 byl kladen důraz na jednoduchost dílů a možnost výroby za použití konvenčních obráběcích strojů Obr. 25, kterými je dílna ČMI vybavena.



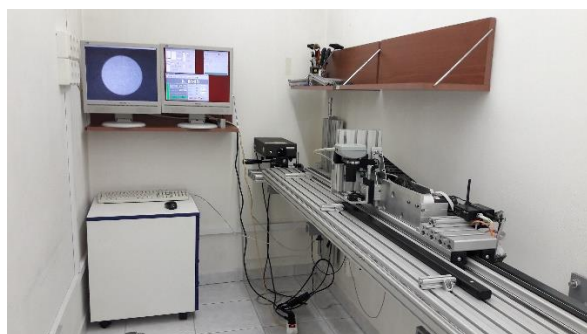
Obr. 24: Vyrobené díly



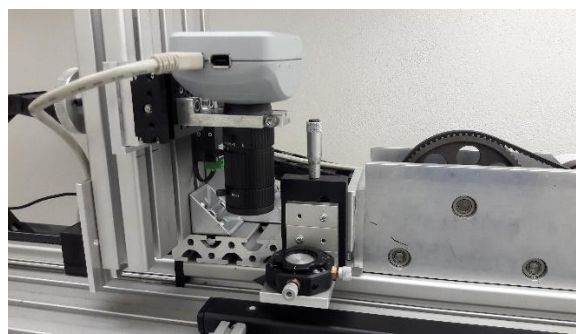
Obr. 25: Strojní vybavení dílny ČMI

### 7.2 Montáž

Jednoduchá konstrukce založená na stavebnicovém systému umožňuje rychlou montáž a ustavení všech odměřovacích prvků. Vzhledem k teplotní stabilitě v laboratoři ČMI bylo možné použití stavebnicového systému z duralových profilů. Po smontování zařízení Obr. 26 byla provedena zkouška funkčnosti všech částí a kontrola kolizí jednotlivých pohyblivých částí Obr. 27.



Obr. 26: Náhled hotového pracoviště



Obr. 27: Detail zařízení

## 8 Výroba etalonu

### 8.1 Požadavky na kalibrační tyče

Návrh etalonu byl odvozen od základních požadavků práce při fotogrametrii a přizpůsobení podmínkám porovnávacího měření na optickém souřadnicovém stroji Werth. Jelikož je fotogrametrie mobilním systémem, je bráno v úvahu i měření v různých podmínkách prostředí. Z tohoto důvodu byl kladen důraz na výběr materiálu kalibrační tyče s nízkým součinitelem teplotní roztažnosti (Tab. 4). Jako polotovar pro výrobu etalonové tyče byla zvolena trubka obdélníkového průřezu z uhlíkového kompozitu s rovnoběžně orientovanými vlákny. Rozměry tyče pak byl přizpůsobeny maximálnímu rozsahu souřadnicového stroje Werth. Z důvodů zachování rozměrové stálosti byla tyč nalakována kvůli uzavření povrchu proti vstupu vzdušné vlhkosti do materiálu. Konce tyče jsou zaslepeny pomocí plastových záslepek.

Tab. 4: Rozměry a materiálové vlastnosti etalonu

Rozměry tyče $D \times \check{S} \times V$ [mm]	700x30x15
Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [ $K^{-1}$ ]	3

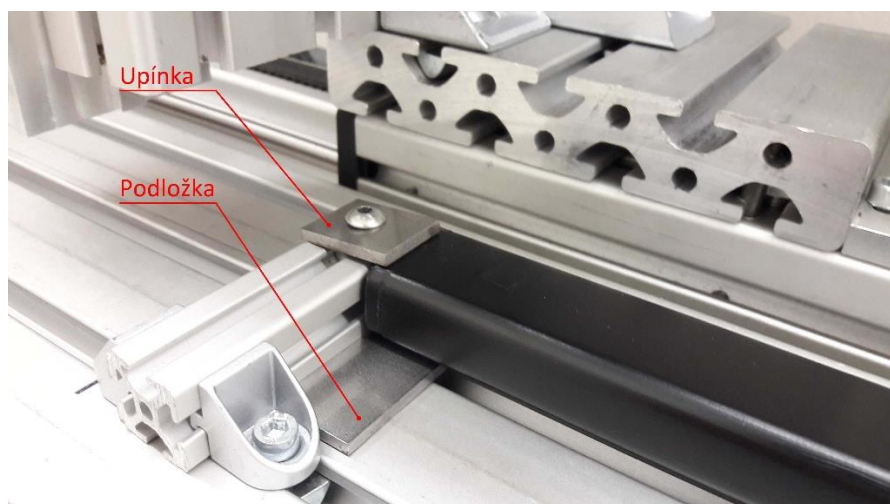
### 8.2 Postup aplikace značek

#### 1) Zapnutí stroje

Prvním krokem je spuštění programů Laserového interferometru, CCD kamery a ovládání pojezdů os X1 a Y1. Program laserového interferometru a CCD kamery byly dodány jako příslušenství při pořízení. Program ovládání osy X1 byl vytvořen při konstrukci stávající trati. Ovládání osy Y1 je zajištěno jednoduchým skriptem v programu Microsoft Excel.

## 2) Upnutí tyče

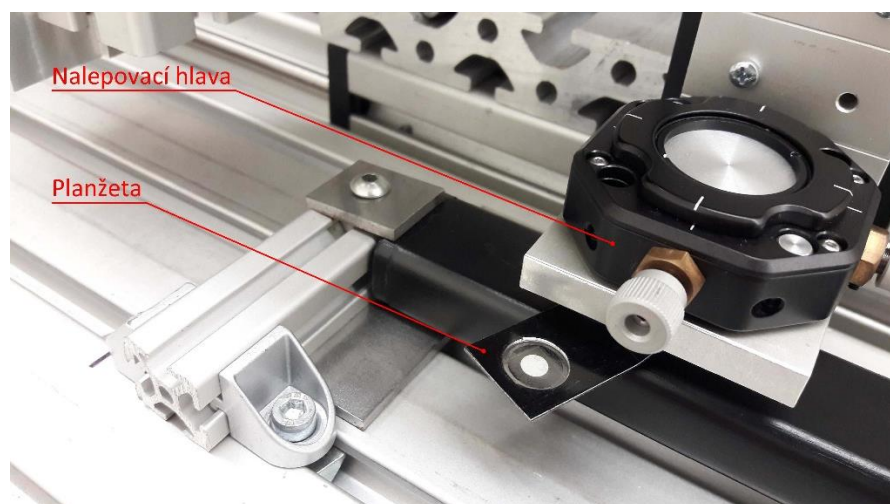
Tyč je uložena na stůl a upnuta pomocí upínek opatřenými upínacími šrouby M3. Vypodložení je zajištěno ocelovými pásky pod konci tyče, aby nedocházelo k její deformaci (viz Obr. 28).



Obr. 28: Detail upnutí tyče

## 3) Příprava značky č. 1

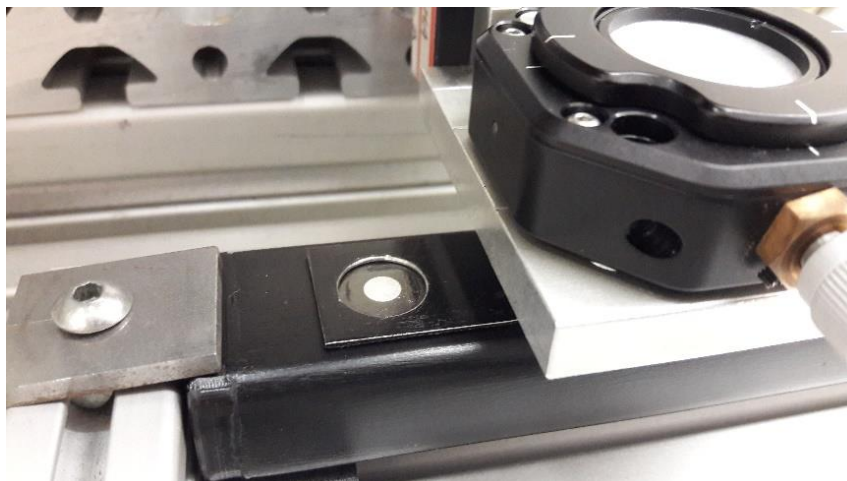
Na aplikační planžetu nalepovací hlavy je připevněna značka č.1 (Obr. 29) pomocí transparentní oboustranné lepicí pásky. Nalepovací hlava je odstavena mimo pracovní polohu.



Obr. 29: Příprava značky na planžetu

## 4) Nastavení značky č. 1 do přibližné polohy

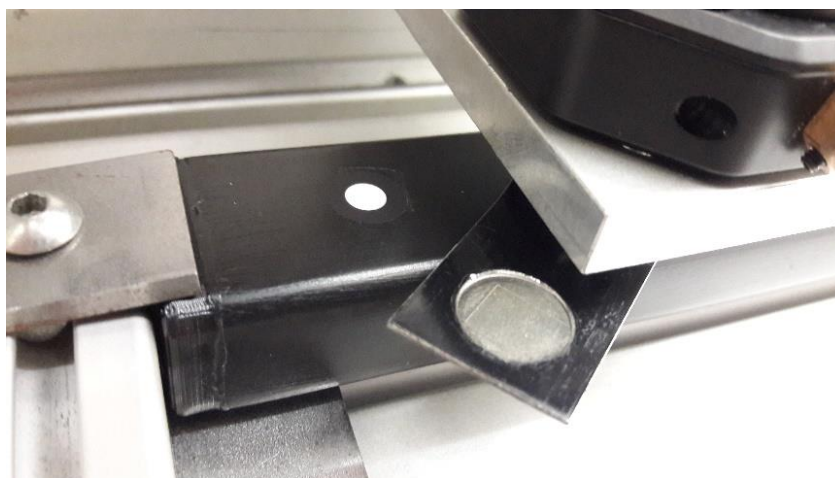
Planžeta je přesunuta přibližně do pracovní polohy tak, aby bylo možné sledovat značku CCD kamerou (Obr. 30). Pomocí osy Z2 nalepovací hlavy je planžeta spuštěna přibližně 0,3mm nad povrch kalibrační tyče. Pohybem stavěcích šroubů os X2 a Y2 nalepovací hlavy je střed značky ustaven do středu soustředných kružnic CCD kamery.



Obr. 30: Pozice aplikační planžety

## 5) Nalepení značky č.1 do požadované polohy

Pohybem hlavních měřicích os X1 a Y1 je značka nastavena do požadované polohy na kalibrační tyči. Pohybem v ose Z2 je značka nalepena na kalibrační tyč. Po nalepení značky je planžeta odstavena z pracovní polohy. (Obr. 31).

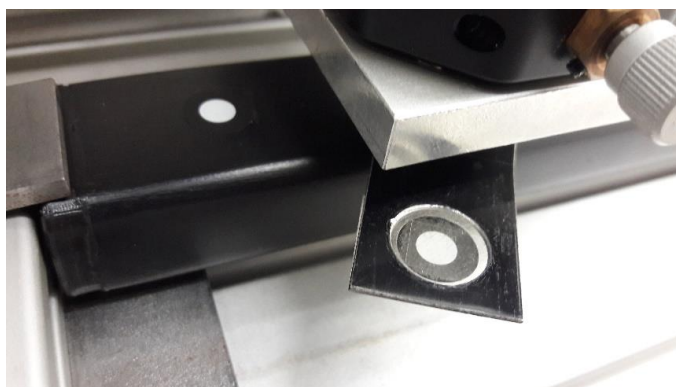


Obr. 31: Stav po nalepení značky



6) Příprava značky č. 2

Na aplikační planžetu, která se stále nachází mimo pracovní polohu, je připevněna značka č.2 (Obr. 32) pomocí transparentní oboustranné lepicí pásky.



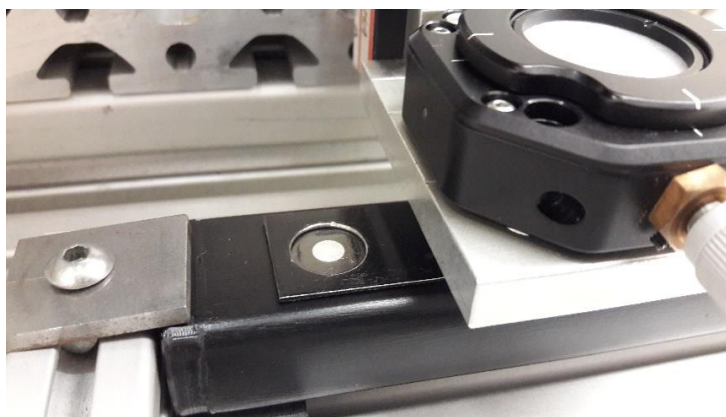
*Obr. 32: Příprava značky na planžetu*

7) Načtení referenčních souřadnic

Pojezdy v osách  $X1$  a  $Y1$  je nastavena CCD kamera tak, aby byl střed soustředných kružnic na středu značky č. 1 (nulový bod). Poté je vynulován laserový interferometr odměřování osy  $X1$  a odměřování lineárního vedení osy  $Y1$ . Odměřování těchto os už zůstává aktivní. Od těchto nulových souřadnic se bude odvíjet poloha značky č. 2. Planžeta je stále mimo pracovní pozici.

## 8) Nastavení značky č. 2 do přibližné polohy

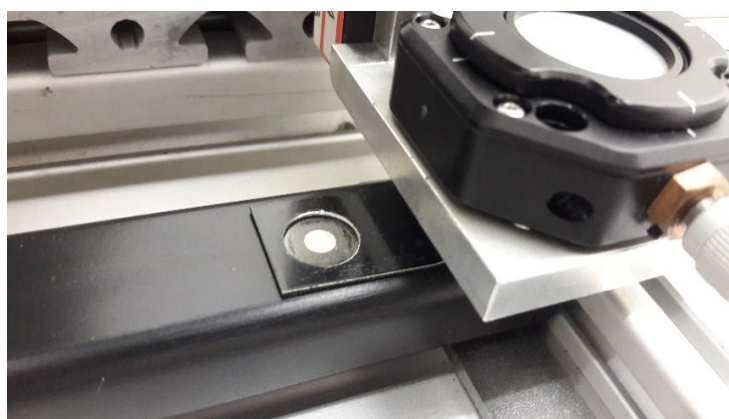
Planžeta je přesunuta přibližně do pracovní pozice tak, aby bylo možné sledovat značku CCD kamerou. Pomocí osy Z2 nalepovací hlavy je planžeta spuštěna přibližně 0,3mm nad povrch kalibrační tyče, respektive nad povrch již nalepené značky č.1 (Obr. 33). Pohybem aplikační planžety v osách X2 a Y2 je střed značky č. 2 ustaven do středu soustředných kružnic CCD kamery. V ideálním případě má značka č. 1 nalepená na tyči a značka č.2 na aplikační planžetě shodné souřadnice v osách X1 a Y1.



Obr. 33: Pozice planžety v zorném poli CCD kamery

## 9) Nalepení značky č.2 do požadované polohy

Pohybem hlavní osy X1 je značka přesunuta do požadované polohy (Obr. 34). Pohybem v ose Z2 je značky nalepena na kalibrační tyč.



Obr. 34: Poloha pro nalepení značky

Tímto postupem bylo vyrobeno 5 kalibračních tyčí za účelem rozboru opakovatelnosti nalepení značek, který je podrobněji popsán v kapitole 9.2.

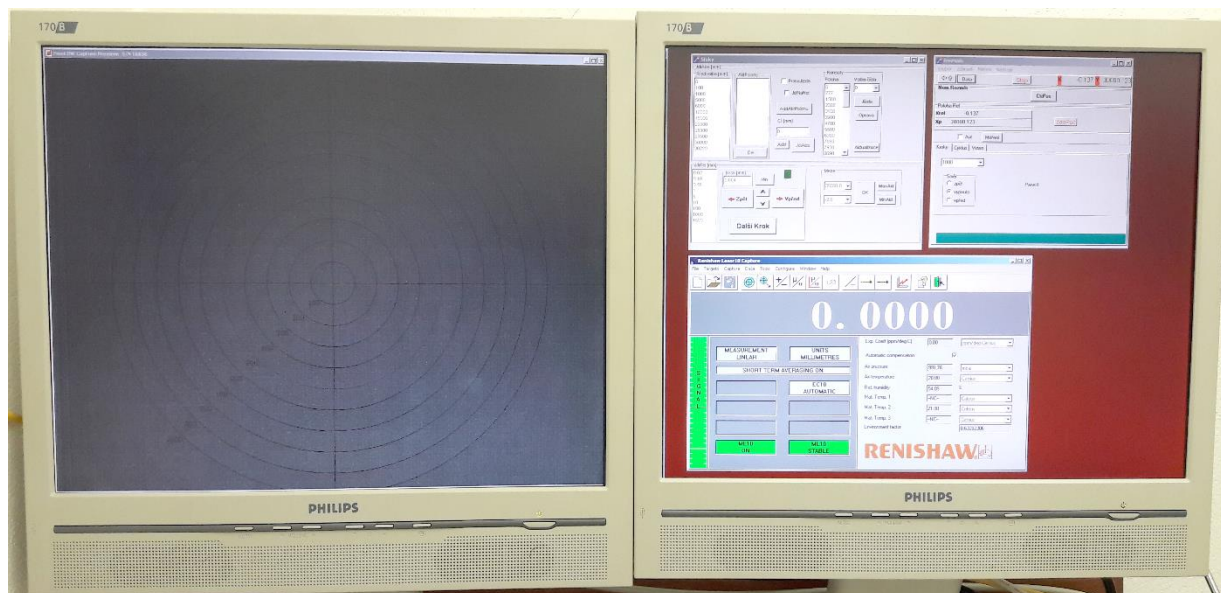
## 9 Měření

Před realizací finálního porovnání přesností kalibrace na navrženém zařízení a stroji Wert bylo provedeno několik zkušebních experimentálních měření. Z počátku byla tyč upínána na koncích pomocí upínek se šrouby M3. Prvními srovnávacími měřeními na souřadnicovém stroji Werth bylo zjištěno, že je tyč upínkami deformována. Horní vlákno tyče, nakterém jsou umístěny kalibrační značky se natáhlo o 20  $\mu\text{m}$ . Z tohoto důvodu bylo upuštěno od upínání tyče pomocí upínek a nadále je tyč pouze volně položena na protiskluzových pryžových podložkách.

### 9.1 Postup měření

#### 1) Zapnutí stroje

Spuštění programů pro ovládání LI, CCD kamery a ovládání pojezdů os X1 a Y1 je znázorněno na Obr. 35 vpravo. Levá část obrázku Obr. 35 zobrazuje pohled CCD kamery. Při měření již není zapotřebí nalepovací hlava, a tak je ze stroje odmontována.



Obr. 35: Stav po zapnutí stroje

## 2) Uložení tyče

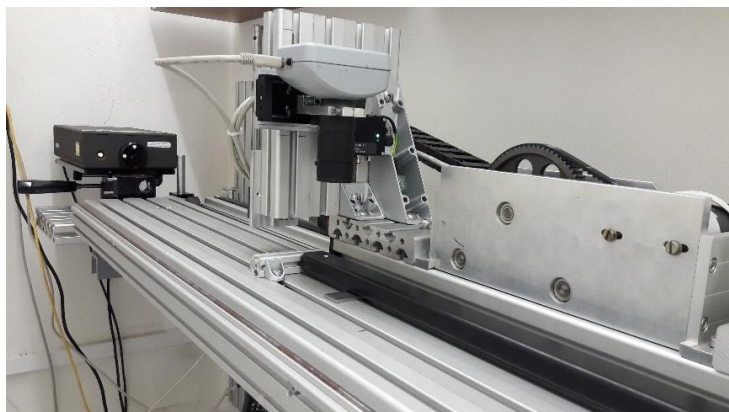
Vypodložení obou stran měřené kalibrační tyče a hrubé vyrovnaní jedné strany tyče pomocí přípravku (Obr. 36). Na přípravku je nastavena potřebná vzdálenost a zafixována pomocí šroubu M3. Přípravek se vloží do drážky stolu a kalibrační tyč je na něj doražena. Tím je vyrovnan jeden konec tyče. Poté následuje vyrovnaní druhého konce tyče stejným způsobem.



Obr. 36: Vyrovňovací přípravek

## 3) Zaměření značky č. 1

Pozice CCD kamery při zaměřování středu značky je uvedena na Obr. 37. Pohybem hlavních měřicích os  $X_1$  a  $Y_1$  je CCD kamera nastavena na střed značky č.1. Soustředná kružnice CCD kamery s největším poloměrem je nastavena tak aby kopírovala obrys značky č.1 jak patrně z Obr. 20 a Obr. 38.



Obr. 37: Pozice kamery při měření



Obr. 38: Ustavení do středu značky

4) Načtení referenčních souřadnic

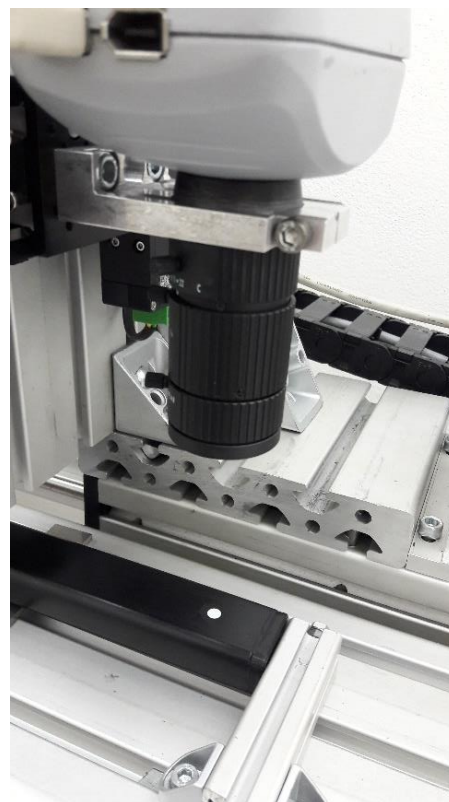
Odměrování os X1 a Y1 jsou vynulována viz Obr. 39.



Obr. 39: Vynulovaný stav

5) Zaměření značky č. 2

Pohybem hlavních měřících os X1 a Y1 je CCD kamera nastavena na střed značky č.2 (viz Obr. 40).



Obr. 40: Najetí na měřenou značku

## 6) Odečet hodnot

Zaznamenání hodnot polohy značky č. 2 (vůči poloze značky č. 1) z odměřování os  $X1$  a  $Y1$  je patrné z Obr. 41. Hodnota odměřená na ose  $Y1$  se používá ke kompenzaci nedokonalosti vyrovnání v ose  $X1$ , která byla vyrovnána pouze pomocí přípravku. Jde tedy o jednoduchý výpočet přepony trojúhelníku, kde vzdálenosti odečtené na osách  $X1$  a  $Y1$  jsou odvěsnami tohoto trojúhelníku. Pokud je kalibrační tyč ustavena bezchybně (osa kalibrační tyče je rovnoběžná s osou  $X1$ ), měření v ose  $Y1$  odpadá.



Obr. 41: Odečet hodnot

## 9.2 Naměřená data

Postupem, který je podrobně popsán v odstavci 0 bylo vyrobeno 5 kalibračních tyčí s nominální vzdáleností 700 mm a postupem popsaným v odstavci 9.1 byly tyto tyče změřeny. Výsledky měření jsou uvedeny v Tab. 5.

Tab. 5: Naměřená data – délky kalibračních tyčí

Tyč	1	2	3	4	5
Délka tyče L [mm]	699,993	699,998	700,001	699,997	699,995

Rozdílem nejhorší naměřené hodnoty (2. sloupec v Tab. 5 zvýrazněný červenou barvou) a nominální hodnoty byla stanovena opakovatelnost nalepení terčů, viz rovnice ( 3 ).

$$O = L_N - L = 700,000 - 699,993 = 0,007 < 0,050 \text{ [mm]} \quad ( 3 )$$

kde  $O$  je opakovatelnost,  $L_N$  je nominální délka a  $L$  je naměřená délka.

Již z výsledku uvedeného v ( 3 ) lze usuzovat, že stanovený požadavek na opakovatelnost nalepení je se značnou rezervou splněn.

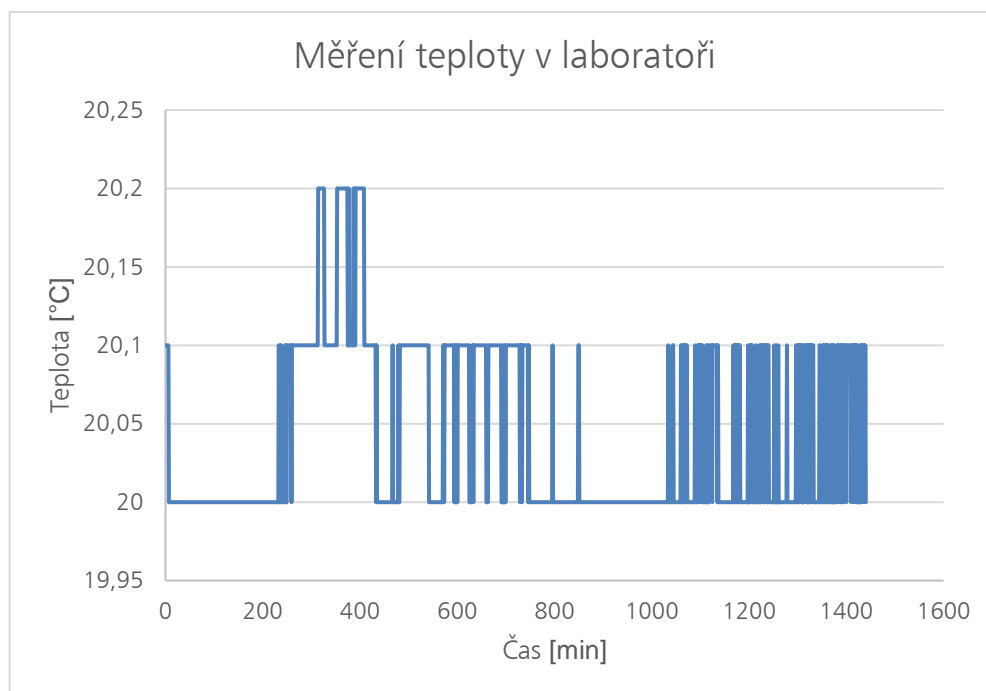
Vybraná kalibrační tyč (zvýrazněný sloupec v Tab. 5) s nalepenými značkami byla z důvodu zmapování opakovatelnosti podrobena opakovanému měření. Měření (popsáno podrobně v odstavci 9.1) bylo desetkrát opakováno. Naměřená data v ose X1 (po kompenzaci pomocí naměřených hodnot na ose Y1) jsou shrnuta v Tab. 6.

Tab. 6: Naměřená data – vybraná kalibrační tyč

Měření	Hodnota [mm]
1	699,997
2	699,995
3	699,997
4	699,996
5	699,996
6	699,996
7	699,995
8	699,995
9	699,995
10	699,997

## 9.3 Nejistota měření

### 9.3.1 Příspěvky nejistoty



Obr. 42: Průběh teploty okolí v laboratoři během měření

### 9.3.2 Rozpočet nejistoty

Nejistota kalibrace se skládá z tzv. absolutní nejistoty  $U_{abs}$  (Tab. 7 a rovnice ( 5 )) a nejistoty relativní  $U_{rel}$  (Tab. 8 a rovnice ( 6 )). **Absolutní složka** nejistoty obsahuje všechny známé vlivy nejistoty, které nejsou závislé na měřené délce. V případě měření na navrženém zařízení jde o:

- absolutní chybu laserového interferometru, která je známa z jeho kalibračního listu,
- chybu zaměření značky fotogrammetrické tyče
- vliv chyby přímosti lineárního vedení osy X1.

**Relativní složka** pak slučuje všechny vlivy, které jsou funkcí měřené délky. Jsou jimi:

- relativní složky laserového interferometru z kalibračního listu,
- vlivy nehomogenity prostředí,
- vliv teplotní roztažnosti
- chyba seřízení laserového interferometru.



Koeficient citlivosti popisuje míru vlivu vstupní veličiny na nejistotu konkrétních složek. **Výsledná standardní nejistota** je pak odmocninou součtu kvadrátů jednotlivých složek. Uvedená rozšířená nejistota měření  $U_{\text{celková}}$  (viz rovnice ( 7 )) je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu  $k$ , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření  $k = 2$ .

Nejistota LI z kalibračního listu je dána následující rovnicí.

$$U_{LI} = (0,005 + 0,2 \cdot L + 0,05 \cdot \alpha \cdot L) \quad (4)$$

kde  $U_{LI}$  je nejistota LI z kalibračního listu,  $L$  je délka kalibrační tyče dosazovaná do rovnice ( 4 ) v metrech a  $\alpha$  je součinitel teplotní roztažnosti.

Tab. 7: Absolutní část nejistoty kalibrace

	standardní nejistota	rozdělení		příspěvek k nejistotě [μm]
<b>Interferometr-dle KL</b>				
vlnová délka	0,005 μm	Gaussovo	1,0	<b>0,005</b>
zaměření terče	2,0 μm	Gaussovo	1,0	<b>2,0</b>
natočení stolku	1,0 μm	Gaussovo	1,0	<b>1,0</b>
součet pro k=1				

Celková absolutní složka nejistoty pro  $k=1$  je dána sumarizací příspěvků k nejistotě z Tab. 7 (poslední sloupec) viz následující rovnice.

$$u_{abs} = \sqrt{0,005^2 + 2^2 + 1^2} = 2,24\mu m \quad (5)$$

Tab. 8: Relativní část nejistoty kalibrace

Vliv na nejistotu kalibrace	standardní nejistota	rozdělení	koeficient citlivosti	příspěvek k nejistotě [μm/m]
<b>Interferometr-dle KL</b>				
vlnová délka	0,20 μm	Gaussovo	1,0	<b>0,20</b>
roztažnost tyče α	0,15 μm	Gaussovo	1,0	<b>0,15</b>
<b>Nehomogenita prostředí</b>				
Interferometr				
tlak	2,0 kPa	Gaussovo	-0,01 μm/kPa	<b>-0,02</b>
vlhkost	10,0 %	Gaussovo	0,003 μm/%	<b>0,03</b>
teplota	1,0 °C	Gaussovo	0,3 μm/°C	<b>0,33</b>
roztažnost α	1,0 °C	Gaussovo	1,0 μm/°C	<b>1,00</b>
vyrovnání interferometru	1,0 mm		6,E-10 μm	<b>6,E-04</b>
součet pro k=1				

Celková relativní složka nejistoty pro  $k=1$  je dána sumarizací příspěvků k nejistotě z Tab. 8 (poslední sloupec) viz následující rovnice.

$$u_{rel} = \sqrt{0,2^2 + 0,15^2 + 0,02^2 + 0,03^2 + 0,33^2 + 1^2 + 0,0006^2} = 1,08\mu\text{m} \quad (6)$$

Výsledná nejistota kalibrace je dána vztahem:

$$U_{celková} = k \cdot (u_{abs} + u_{rel} \cdot L) \quad (7)$$

Kde  $L$  je délka kalibrační tyče uvedená v metrech. Po dosazení z rovnic (5) a (6) do rovnice (7) výsledná standardní nejistota vychází:

$$U_{celková} = 2 \cdot (2,24 + 1,08 \cdot L) \quad (8)$$

$$U_{celková} = (4,5 + 2,2 \cdot L) [\mu\text{m}] \quad (9)$$

Porovnáním celkové nejistoty z rovnice ( 9 ) a předběžné nejistoty z rovnice ( 2 ) po dosažení délky kalibrační tyče (700mm) lze vyvodit následující závěr:

$$U_{celková} < U_p \quad ( 10 )$$

$$6,1 < 8,5 \quad ( 11 )$$

Požadavek na přesnost specifikovaný v odstavci 5.1 je splněn.

## 9.4 Vyhodnocení

### 9.4.1 Mezilaboratorní porovnávací zkouška

Pro vyhodnocení měření byl zvolen postup pro mezilaboratorní porovnávací zkoušku (MPZ) s referenční hodnotou (tzv. pilotovanou mezilaboratorní porovnávací zkouškou). Jde o metodu, kde je porovnáváno měření prověřované laboratoře s měřením referenční pilotní laboratoře o vyšší metrologické úrovni. Pilotní laboratoř tak poskytuje referenční hodnotu, se kterou je porovnávána hodnota naměřená prověřovanou laboratoří. Referenční hodnota je z důvodu vyloučení možnosti ovlivnění výsledků poskytnuta až po měření prověřované laboratoře. Referenční data v tomto porovnání byla získána měřením kalibrační tyče na optickém souřadnicovém měřicím stroji Werth Video Check HA 800. MPZ je založeno na vyhodnocení tzv. normalizované chyby  $E_N$  ( $E_N$  - kritérium hodnocení), která je dána vztahem:

$$E_N = \frac{|X_{lab} - X_{ref}|}{\sqrt{U_{lab}^2 - U_{ref}^2}} \leq 1 \quad ( 12 )$$

kde:

$E_N$ .....normalizovaná chyba

$X_{lab}$ .....naměřená hodnota prověřované laboratoře

$X_{ref}$ .....referenční hodnota

$u_{lab}$ .....nejistota měření prověřované laboratoře

$u_{ref}$ ..... nejistota měření referenční laboratoře

Pro nejistoty měření musí platit, že nejistota referenční laboratoře musí být výrazně nižší (cca 10x), než nejistota prověřované laboratoře. Jako výsledek porovnání slouží k posouzení hodnota normalizované chyby  $E_N$ .

$E_N < 1$  ..... laboratoř v MPZ uspěla

$E_N > 1$  .....laboratoř v MPZ neuspěla

Na základě výsledku kritéria hodnocení  $E_N$  může prověřovaná laboratoř upravovat svoji nejistotu měření.

#### 9.4.2 Vyhodnocení MPZ

Finálním měřením na navrženém zařízení bylo získáno 10 hodnot. Pro účely porovnání byly tyto hodnoty upraveny aritmetickým průměrem na jednu (699,996mm). Naměřená data včetně nejistot měření na obou zařízeních jsou uvedena v Tab. 9.

Tab. 9: Naměřená data Werth vs. navržené zařízení

	Nejistota $U_{celková}$ [ $\mu\text{m}$ ]	Nejistota $u$ pro délku 700 mm [ $\mu\text{m}$ ]	Naměřená hodnota [mm]
Navržené zařízení	$U_{celková} = (4,5 + 2,2 * L)$	6,1	699,996
Werth	$U_{celková} = (0,5 + 1,1 * L)$	1,3	699,993

Tab. 10 shrnuje výsledky mezilaboratorního porovnání mezi navrženým zařízením a optickým souřadnicovým měřicím strojem Werth.

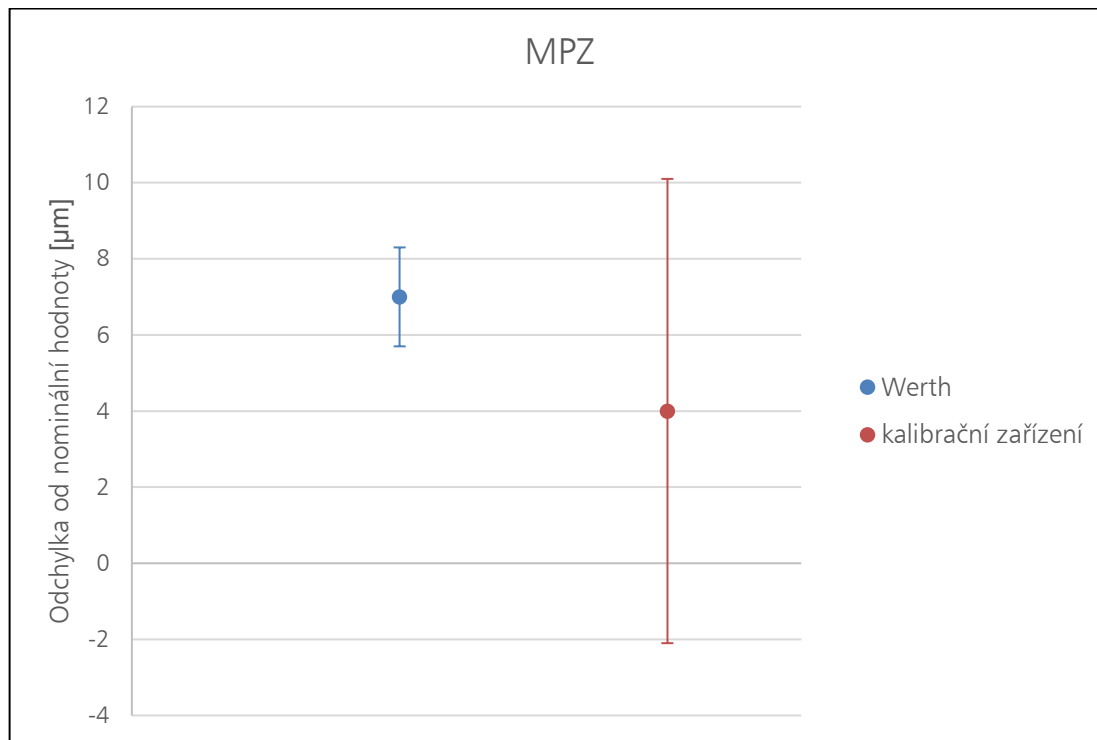
Tab. 10: Vstupní hodnoty MPZ

$X_{lab}$ [mm]	$u_{lab}$ [mm]	$X_{ref}$ [mm]	$u_{ref}$ [mm]	$E_N$ [mm]
699,9960	0,0061	699,9931	0,0013	0,4654

Z Naměřených dat byla zpracována normalizovaná chyba  $E_N$  (viz zvýrazněný sloupec v Tab. 10). Vzhledem k faktu, že výsledná hodnota  $E_N$  bezpečně splňuje podmínky rovnice ( 12 ), lze nejistotu snížit.

Odchylna měření na stroji Werth od nominální hodnoty délky kalibrační teče (700mm) je rovna:  $700 - 699,993 = 0,007\text{mm}$ . Odchylna měření na navrženém zařízení od nominální hodnoty je rovna:  $700 - 699,996 = 0,004\text{mm}$ . Porovnání odchylek od nominálních hodnot (body v grafu) s vyznačením

nejistot měření (rozptyl; chybové úsečky kolem vyznačených bodů v grafu) na obou zařízeních je uvedeno na Obr. 43.



Obr. 43: Grafické znázornění MPZ

## 10 Závěr

Bakalářská práce začíná úvodem, v němž jsou zmíněny trendy kontroly kvality ve strojírenství a motivace celé práce zabývající se fotogrammetrií.

Na úvod navazuje definice cílů práce. Cílem práce je návrh a výroba zařízení k výrobě a zároveň i kalibraci etalonových tyčí používaných při fotogrammetrii a to v takové přesnosti, která bude vyhovovat vysokým nárokům zákazníků ČMI.

V kapitole 3 je popsána důležitost kontroly kvality ve strojírenství, pojmenovány zdroje nepřesností výroby a uvedeny způsoby jejich měření. V dalších částech kapitoly je rozebráno rozdělení a principy optického skenování. V závěr kapitoly se autor věnuje principu a užití fotogrammetrie a významu kalibračních tyčí.

Kapitola 4 je věnována zmapování dnešní situace řešeného problému ve světě. Dále jsou v kapitole rozebrány důvody návrhu a výhody zařízení, které je předmětem bakalářské práce.

V následující kapitole jsou stanoveny požadavky na konstrukci zařízení. V kapitole je předložen předběžný návrh dvou variant zařízení. Na základě srovnání vlastností obou variant byla vybrána finální varianta řešení.

Náplní kapitoly 6 je rozbor funkcí zařízení a podrobný popis jeho dílčích částí. Následně proběhl návrh zařízení a tvorba 3D modelu nových, nakupovaných i již hotových součástí stávající měřicí trati.

Kapitola 7 se zabývá výrobou nových součástí a jejich montáží na stávající měřicí trať v laboratoři technické délky ČMI. Byla provedena funkční zkouška stroje bez shledání jakýchkoli závad či kolizí.

Kapitolu 8 (výroba etalonu) tvoří rozbor důvodů pro výběr polotovaru kalibrační tyče a podrobný popis postupu práce nalepení záměrných terčů pomocí již vyrobeného zařízení.

Úvod kapitoly 9 se zabývá podrobným popisem postupu měření kalibračních tyčí na navrženém stroji. Dále se věnuje rozboru opakovatelnosti nalepení záměrných terčů, rozpočtu nejistoty a mezilaboratorní porovnávací zkoušce. Z této zkoušky vyplývá, že předem stanovené cíle na přesnost měření byly se značnou rezervou splněny. Také opakovatelnost nalepení záměrných terčů je řádově nižší, než byl předem stanovený požadavek, čímž lze cíle bakalářské práce považovat za zcela splněné.

## 11 Použitá literatura

1. ZELENÝ, V. et al. *Závěrečná ZPRÁVA Č. 8015-TR-Z0001-16 k úkolu TR č. 1680151*. Praha: Český metrologický institut, 2016.
2. *Micro Epsilon* [online]. [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/laser-sensor/>
3. ZATOČILOVÁ, A. *Měření a vyhodnocování přímosti osy rotačních výkovků pomocí fotogrammetrie a analýzy obrazu*. 2014 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/36586>
4. *FARO* [online]. [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: <http://www.faro.com/products/metrology/faro-scanarm/overview>
5. *MCAE SYSTEMS, s.r.o.* [online]. 2016 [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/atos>
6. HAIG, C. C. HEIPKE a M. WIGGENHAGEN. *Lens inclination due to instable fixing detected and verified with VDI/VDE 2634 PART 1 C*. 2006 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: [http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/part5/paper/1220\\_Dresden06.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/part5/paper/1220_Dresden06.pdf)
7. *GOM* [online]. [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://www.gom.com/metrology-systems/atos/atos-triple-scan.html>
8. *Zeiss Česká republika* [online]. 2016 [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/bridge-type-cmms/accura.html>
9. ÚŘAD PRO TECHNICKOU MORMALIZACI, M. A. S. Z. *Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)*. Praha: Úřad pro technickou mormalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
10. DC motor homepage | maxon motor Australia. *Australian motor news index - Zero cogging Low friction DC motor* [online]. [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: <http://www.maxonmotor.com.au/maxon/view/news/Zero-cogging-low-friction-DC-motor>
11. *PixelINK Industrial Cameras* [online]. 6. 7. 2017 [cit. 2017]. Dostupné z: <http://pixelink.com/product/pl%E2%80%90aptina-mt9t001/>

12. *XL-80 laser system* [online]. 6. 7. 2017. Dostupné také z: <http://www.renishaw.com/en/xl-80-laser-system--8268>
  
13. *ZABER* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: [http://www.zaber.com/products/product\\_group.php?group=X-LSM](http://www.zaber.com/products/product_group.php?group=X-LSM)





# Seznam příloh

*Příloha A - Výkres sestavy navrhovaného zařízení*