



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## VARIANTY TECHNIKY AKTIVNÍ TRIANGULACE

VARIANTS OF THE ACTIVE TRIANGULATION TECHNIQUE

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Vojtěch Sýkora**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Ilona Janáková, Ph.D.**

**BRNO 2023**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Bc. Vojtěch Sýkora

**ID:** 195435

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2022/23

**NÁZEV TÉMATU:**

## Varianty techniky aktivní triangulace

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je teoretické zpracování různých variant techniky aktivní triangulace jako formy 3D optického vidění využívajícího zdroj osvětlení (např. laser nebo strukturované světlo) a kameru. Práce by se měla zaměřit především na různé varianty této techniky měření – varianty podle druhu použitého zdroje světla, způsobu skenování měřeného objektu, uspořádání jednotlivých prvků či podle využitých dalších opticko-mechanických prvků. Předpokládá se testování varianty s teleobjektivem a se zrcadlem.

1. Seznamte se s danou problematikou. Zpracujte literární rešerši metody aktivní triangulace a jejich variant.

2. Zaměřte se především na variantu měření s teleobjektivem a variantu využívající zrcadlo/zrcadla.

3. Pro jednotlivé vybrané varianty:

a) navrhnete vhodné HW prostředky (kamera, optika, zdroj světla a další) a jejich opticko-mechanické uspořádání.

b) navrhnete vhodný způsob kalibrace, postup měření a vyhodnocení dat.

c) celý měřicí systém realizujte a experimentálně ověřte.

d) definujte omezující podmínky, zhodnoťte.

4. Dosažené výsledky zhodnoťte.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

YAO, Linshen a Haibo LIU. Design and Analysis of High-Accuracy Telecentric Surface Reconstruction System Based on Line Laser. Applied Sciences [online]. 2021, 11(2) [cit. 2022-08-23]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app11020488

**Termín zadání:** 6.2.2023

**Termín odevzdání:** 17.5.2023

**Vedoucí práce:** Ing. Ilona Janáková, Ph.D.

**doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá metodou aktivní triangulace, a to konkrétně měřicími systémy, který obsahují zrcadlo. V práci je vysvětlen princip aktivní triangulace a také principy některých dalších optických měřících technik. Poté je zde popsán návrh měřícího systému, jeho kalibrace, a nakonec samotného měření. Testována je také možnost použití telecentrického objektivu pro měřicí systémy na principu aktivní triangulace. Všechny programy jsou napsány pomocí MATLAB.

## **Klíčová slova**

Aktivní triangulace, počítačové vidění, zrcadlo, optický měřicí systém, kamera, laser, telecentrický objektiv, MATLAB

## **Abstract**

This thesis is about method called active triangulation, specifically about measure systems which using mirror in it. In thesis is explain principle of active triangulation and principles of other optic measuring technic. Then there is described design of measuring system, its calibration and finally the measurement itself. The possibility of using a telecentric lens for measuring systems based on the principle of active triangulation is also tested. All programs are written using MATLAB.

## **Keywords**

Active triangulation, computer vision, mirror, optical measure system, camera, laser, telecentric lens, MATLAB

## **Bibliografická citace**

SÝKORA, Vojtěch. Varianty techniky aktivní triangulace. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151685>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Ilona Janáková.

## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *Vojtěch Sýkora*

**VUT ID studenta:** *195435*

**Typ práce:** *Diplomová práce*

**Akademický rok:** *2022/23*

**Téma závěrečné práce:** *Varianty techniky aktivní triangulace*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 15. května 2023

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Za odborné vedení mé diplomové práce, velkou míru trpělivosti a ochoty, lidský přístup a také za cenné a velmi podnětné rady při zpracovávání práce děkuji vedoucí práce Ing. Iloně Janákové, Ph.D.

V Brně dne: 15. května 2023

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>1. 3D VIDĚNÍ .....</b>	<b>11</b>
1.1 INTERFEROMETRIE .....	11
1.2 MĚŘENÍ DOBY LETU .....	12
1.3 TRIANGULACE.....	15
1.3.1 Pasivní triangulace.....	15
1.3.2 Aktivní triangulace.....	17
1.3.3 Fokusovací technika.....	17
<b>2. AKTIVNÍ TRIANGULACE .....</b>	<b>19</b>
2.1 KALIBRACE 2D VARIANTY SYSTÉMU .....	23
2.2 VARIANTA S TELECENTRICKÝM OBJEKTIVEM.....	27
2.3 3D VARIANTA AKTIVNÍ TRIANGULACE .....	33
2.3.1 Techniky s kontinuálně se měnícími strukturovanými světelnými vzory.....	36
2.3.2 Techniky s 1D kódovacími schématy (indexování pruhů) .....	37
2.3.3 Techniky s 2D kódovacími schématy (indexování mřížky).....	40
2.3.4 Techniky se sekvenční projekcí .....	42
<b>3. PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>46</b>
3.1 NÁVRH MĚŘICÍHO SYSTÉMU .....	46
3.1.1 Varianta s umístěním zrcadla na platformě.....	47
3.1.2 Varianta s pevnou pozicí zrcadla.....	48
3.1.3 Varianta bez přeostrévání.....	49
3.1.4 Varianta s telecentrickým objektivem .....	50
3.2 MĚŘENÍ .....	53
3.2.1 Varianta s umístěním zrcadla na platformě.....	53
3.2.2 Varianta s pevnou pozicí zrcadla.....	60
3.2.1 Varianta bez přeostrévání.....	64
3.2.2 Varianta s telecentrickým objektivem .....	69
<b>4. ZÁVĚR.....</b>	<b>77</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>79</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>82</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Konstruktivní a destruktivní interference [1] .....	11
1.2	Rozložení základního Michelsonova interferometru [2] .....	12
1.3	Princip měření doby letu [5] .....	13
1.4	Základní princip pasivní triangulace [7] .....	15
1.5	Základní princip epipolární geometrie [8] .....	16
1.6	Epipolární přímky [8] .....	17
2.1	Princip triangulačního trojúhelníku pro aktivní triangulaci [9].....	19
2.2	Naznačené nevýhody aktivní triangulace [9].....	21
2.3	2D varianta aktivní triangulace urychlující dobu měření [9] .....	22
2.4	Znázorněná metoda vektorového součinu [13] .....	24
2.5	Aktivní triangulace s lineárním posuvem [13].....	25
2.6	Princip dvojpoměru kolineárních bodů v aktivní triangulaci [13] .....	26
2.7	Princip metody využívající středové promítání [13].....	27
2.8	Rozdíl mezi telecentrickým a konvenčním objektivem [14].....	28
2.9	Rozdíl mezi telecentrickými objektivy s clonou $f/6$ (nahore) a $f/16$ (dole) [15] .....	28
2.10	Scéna zachycená konvenčním a telecentrickým objektivem [14] .....	30
2.11	Princip objektově telecentrického objektivu [17].....	31
2.12	Znázornění průchodu paprsků obrazově telecentrickým objektivem [17] .....	32
2.13	Znázornění principu dvojitě telecentrického objektivu [17].....	32
2.14	Znázornění principu dvojitě telecentrického objektivu [18].....	33
2.15	Princip měření pomocí 3D varianty aktivní triangulace [19].....	34
2.16	Dělení technik 3D varianty aktivní triangulace [20].....	35
2.17	Aktivní triangulace s projekcí duhového světelného vzoru [20].....	36
2.18	Aktivní triangulace s projekcí nepřetržitě se měnícího barevného vzoru [20].....	37
2.19	Aktivní triangulace s barevnou indexací pruhů [20].....	38
2.20	Aktivní triangulace s indexací pruhů vzorem [20].....	38
2.21	Aktivní triangulace s indexací pruhů úrovní šedi [20].....	39
2.22	Aktivní triangulace s indexací pomocí posloupnosti de Bruijn [20].....	39
2.23	Aktivní triangulace s indexací pomocí pseudonáhodných binárních matic [20].....	40
2.24	Příklad vytváření pseudonáhodných zakódovaných podoblastí [20] .....	41
2.25	Aktivní triangulace s projekcí vzoru barevné mřížky [20].....	41
2.26	Aktivní triangulace s projekcí vzoru barevných teček [20] .....	42
2.27	Aktivní triangulace s projekcí binárních vzorů [20] .....	43
2.28	Aktivní triangulace s projekcí vzorů s pruhy v odstínech šedi [20].....	44
2.29	Příklad vzoru aktivní triangulace metodou fázového posuvu [19].....	44
2.30	Způsob nasvícení a vliv směru nasvícení při technice fotometrické stereo [20].....	45
3.1	Upravený šachovnicový vzor pro kalibraci.....	47
3.2	Navržený měřicí systém se zrcadlem na platformě.....	48
3.3	Navržený měřicí systém se zrcadlem na platformě.....	49
3.4	Navržený měřicí systém bez potřeby přeastřování .....	50
3.5	Platforma s krokovým motorem [25].....	51
3.6	Kontrolér pro platformu s krokovým motorem [25] .....	51
3.7	Navržený měřicí systém s teleobjektivem.....	53
3.8	Znázornění zkreslení objektivu (nahore bez kalibrace, dole po kalibraci).....	54
3.9	Příklad ořezu snímku na příslušné záběry.....	55
3.10	Nalezené kalibrační body v kalibračním vzoru.....	57



3.11	Výsledek měření pro přímý pohled.....	59
3.12	Výsledek měření pro pohled na odraz.....	59
3.13	Objekty pro test měření.....	61
3.14	Výsledek měření variantou s pevnou pozicí zrcadla se schodovitým objekt pro přímý záběr.....	62
3.15	Výsledek měření variantou s pevnou pozicí zrcadla se schodovitým objekt pro záběr zrcadla.....	62
3.16	Výsledek měření variantou s pevnou pozicí zrcadla s kovovým objektem pro přímý záběr .....	63
3.17	Výsledek měření variantou s pevnou pozicí zrcadla s kovovým objektem pro záběr zrcadla .....	64
3.18	Použité kalibrační body (x) a jejich reálná pozice (o) pro variantu bez přestřování .....	65
3.19	Příklad nalezené laserové čáry .....	66
3.20	Výsledek měření variantou bez přestřování s plastovým schodovitým objekt pro přímý záběr ...	67
3.21	Výsledek měření variantou bez přestřování s plastovým schodovitým objekt pro záběr zrcadla ..	67
3.22	Výsledek měření variantou bez přestřování s kovový objekt pro přímý záběr .....	68
3.23	Výsledek měření variantou bez přestřování s kovovým objektem pro záběr zrcadla .....	69
3.24	Příklad snímku použitého ke kalibraci.....	70
3.25	Použité kalibrační body (x) a jejich reálná pozice (o) pro variantu s telecentrickým objektem.....	72
3.26	Příklad nalezených průsečíků.....	73
3.27	Snímek kalibračního vzoru pro měřicí účely .....	74
3.28	Výsledek měření kalibračního vzoru .....	74
3.29	Výsledky měření s teleobjektivem pro schodovitý objekt .....	75
3.30	Výsledky měření s teleobjektivem pro kovový objekt.....	76

# ÚVOD

V průmyslu se optické měřicí systémy využívají stále častěji. Možnosti jejich použití jsou velice široké. Používají se například pro rozeznávání objektů, měření požadovaných parametrů objektů či pro inspekci kvality. Využívají se také v robotice, a to například pro navigaci. Oblasti jejich využití jsou však mnohem širší. Stále častěji se tyto systémy objevují i v mobilních telefonech nebo se s nimi můžeme setkat v automobilech.

Hlavní výhodou optických měřicích systémů oproti ostatním je, že jsou bezkontaktní. Nedochozí tak k ovlivňování měřeného objektu. Mohou být také rychlé a přesné.

Pořízením snímku získáme pouze 2D informaci o reálném 3D prostoru, což někdy může být dostatečné, ale někdy ne. To, o co přicházíme, je ve většině případů informace o hloubce. Proto existují měřicí metody, které jsou schopny tuto informaci získat. V této práci jsou některé tyto metody podrobněji popsány, zvláště pak metoda s názvem aktivní triangulace.

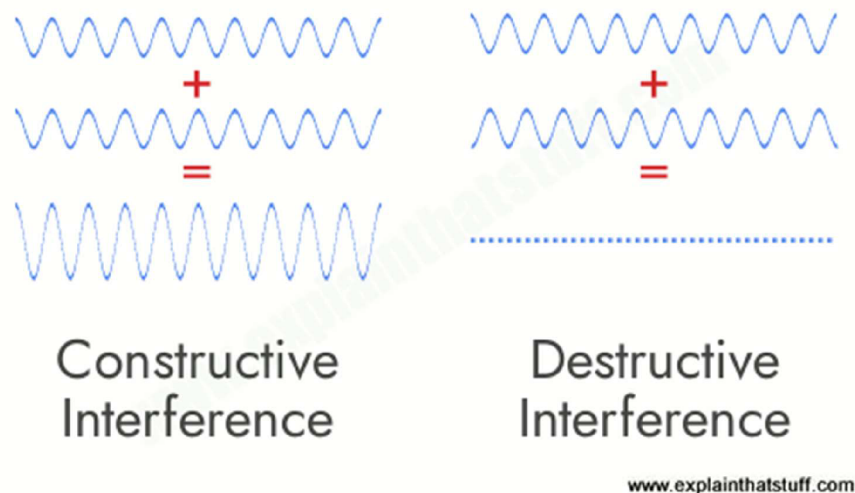
Práce se zabývá konkrétními variantami aktivní triangulace, které mají v měřicím systému zakomponováno zrcadlo, které potencionálně rozšiřuje možnosti měřicího systému. V odraze je možné vidět části měřeného objektu, které přímým pohledem kamery být vidět nemusí. Dále je také testován telecentrický objektiv pro účely měření pomocí aktivní triangulace.

Tato práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části jsou napřed popsány v kapitole 1.3D vidění různé metody, které optické měřicí systémy využívají. Dále je popsán telecentrický objektiv, který je v rámci praktické části použit. Následně je v kapitole 2 popsána aktivní triangulace o něco podrobněji. V rámci teoretické části jsou také popsány různé postupy kalibrace měřicích systémů na principu 2D varianty aktivní triangulace. V praktické části je již popsáno konkrétně jak byly použité měřicí systémy navrženy, zkalibrovány a jak probíhá měření. V rámci kapitoly 3.2 Měření jsou také zobrazeny výsledky měření jednotlivým testovaným variant měřicích systémů na principu aktivní triangulace.

## 1.3D VIDĚNÍ

### 1.1 Interferometrie

Z názvu může být patrné, že tato měřicí metoda využívá interference. Ta nastává, když se setkají vlny, přenášející určitou energii, a dochází k jejich splynutí. Pokud se setkají ve stejné fázi, jedná se o konstruktivní interferenci a výsledné vlnění má amplitudu rovnou součtu amplitud vlnění, které splývají. Naopak, pokud se setkají vlnění s opačnou fází, jedná se o destruktivní interferenci a vlnění se navzájem vyruší. Názorně je vše vidět na obrázku 1.1. Může také nastat jakákoli situace mezi těmito krajními polohami a výsledná amplituda bude mezi těmito extrémy.



[www.explainthatstuff.com](http://www.explainthatstuff.com)

Obrázek 1.1 Konstruktivní a destruktivní interference [1]

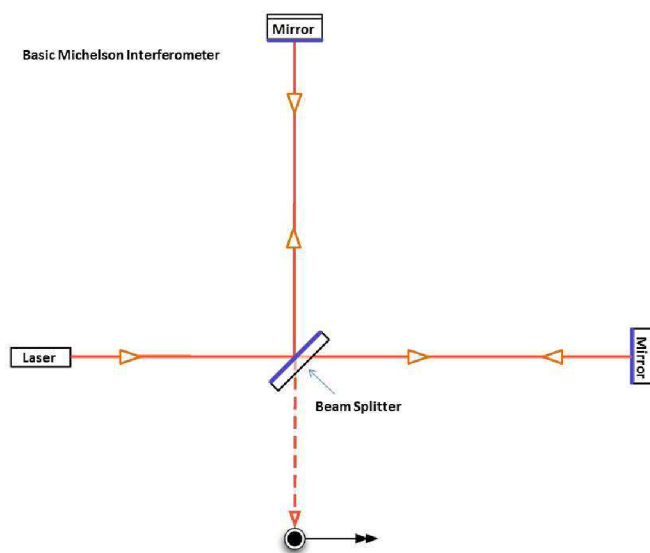
Pokud se jedná o sinusovou vlnu a přenášená energie je v podobě světla, při dopadu vznikají typické interferenční proužky. Právě tyto proužky zobrazují měřenou informaci. [1]

Interferometrie je využívána v mnoha vědeckých i inženýrských oborech. Princip spočívá ve skládání dvou a více světelných zdrojů a následném vyhodnocení vzniklého signálu. Měřicí zařízení, která fungují na tomto principu, se nazývají interferometry. Pomocí interferometrie je možné měřit i velice malé vzdálenosti, které by jinak nebyly možné získat. Je proto využívána i pro měření gravitačních vln.

Interferometrie byla vymyšlena a používána pro zkoumání rychlosti světla v různých médiích (voda, vzduch, ...). Předpokládalo se, že pro šíření světla je zapotřebí éteru, který existuje jen pro tento účel. Později Albert Michelson a Edward

Morley pomocí své vlastní konfigurace dokázali, že světlo se šíří i ve vakuu. Jejich konfigurace je právě základem měřicího přístroje pro měření gravitačních vln. [2]

Tato konfigurace je znázorněna na obrázku 1.2. Skládá se ze zdroje světla, jednoho polopropustného zrcadla, dvou klasických zrcadel a detektoru. Světlo ze zdroje se rozdělí na polopropustném zrcadle, které je potaženo velmi tenkou stříbrem. Jeden paprsek směřuje skrz polopropustné zrcadlo do referenčního, které je v pevné vzdálenosti. Druhý se od polopropustného zrcadla odrazí a směřuje do zrcadla, které je spojené s měřenou veličinou. Musí tak urazit jinou vzdálenost, než je referenční a má tak rozdílnou fázi. Od obou zrcadel se paprsky odrazí a opět se spojí na polopropustném zrcadle a pokračují do detektoru. Následně může být signál vyhodnocen na základě znalosti vlnové délky zdroje a znalosti vzdálenosti referenčního zrcadla. Výsledek získáme zkoumáním a měřením interferenčních proužků. Různé konfigurace jsou používány na měření velmi malých rozměrů (až na úroveň jednoho nanometru), tak i velkých rozměrů. [1][2]



Obrázek 1.2 Rozložení základního Michelsonova interferometru [2]

## 1.2 Měření doby letu

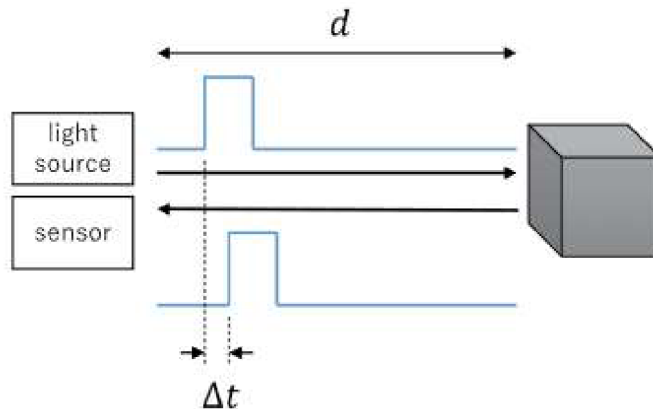
Senzory založené na principu měření doby letu, neboli time of fly (ToF), mohou využívat převážně světelné nebo ultrazvukové vlny. Obecně preferovanější jsou senzory využívající pro měření světlo. Tyto senzory, oproti sensorům využívající ultrazvuk, jsou schopny větších měřících rozsahů s lepší přesností a zároveň zachovávat kompaktní rozměry, nízkou váhu a malou spotřebu energie. [3]

Princip této techniky je velice jednoduchý. Je založen na měření doby letu vlny

od zdroje k měřenému objektu a zpět, kde ji detekuje senzor. Z čehož vyplývá, že měřená vzdálenost  $d$  se následně vypočítá jako:

$$d = \frac{c_0 \times t}{2}, \quad (1.1)$$

kde  $c_0$  je rychlost světla a  $t$  je doba letu. Tento princip je znázorněn na obrázku 1.3. [4]



Obrázek 1.3 Princip měření doby letu [5]

Jako zdroje vlnění jsou využívány různé typy vln. Nejčastěji jde o světelné signály, a to buď laser nebo LED. Typ zdroje ovlivňuje do značné míry výsledky měření, proto je třeba jej dobře vybírat pro danou úlohu.

Technika měření doby letu má své výhody, ale i své nevýhody. Výhodou například je, že ji lze použít i při minimálním okolním osvětlení. Měření doby letu je považováno za aktivní techniku. Aktivní technika znamená, že je zde používán zdroj světla pro měření, takže další zdroje světla pro nasvícení měřeného objektu nejsou potřeba. [4]

Použití zdroje světla je ale současně největší nevýhodou této techniky měření. Okolní světlo, například ze slunce, může interferovat se světlem, které je použito k měření a pozměnit tak signál, který budeme detekovat na výstupu. V takovém případě je například možné využít infračervený zdroj světla a vliv okolního světla tak omezit. Kromě okolního světla záleží také na povrchu měřeného objektu. Musí co nejlépe odrazet světlo zpět do senzoru. Například, pokud je povrch lesklý, může odrazet světlo ve špatném směru nebo pokud se světlo odráží na hraně, může vytvářet více odrazů. [3][4]

Jelikož je tato metoda měření založená na jednoduché matematice, a i jednoduchém algoritmu, je považována za techniku rychlou a výpočetně nenáročnou. Protikladem je například měření pomocí dvojice kamer, kde je zapotřebí složitá kalibrace, a i ostatní výpočty jsou složité, a tedy náročné na výpočetní techniku.

Metody využívající měření doby letu lze používat na velký rozsah vzdáleností, a to zhruba od půl metru až po 5 metrů. V některých případech lze jimi měřit i mnohem větší vzdálenosti. Což v porovnání s měřením pomocí strukturovaného světla, které je schopno měřit do 2-3 metrů, je velký rozdíl.

Měření doby letu v porovnání s měřením pomocí strukturovaného světla ovšem zaostává v přesnosti. Přesnost je odhadována 1 % z měřené vzdálenosti, tedy při měření 5 metrů, je přesnost zhruba na 5 centimetrech. U strukturovaného světla se lze bavit o přesnosti až 1 milimetr. Horších výsledků je dosahováno měřením pomocí dvou kamer, kde je přesnost jen okolo 5-10 %.

Využití senzorů založených na principu měření doby letu je rozsáhlé. V posledních pár letech se ve velkém využívají pro počítání lidí, například v supermarketech. Výhodou je, že se nevyžaduje žádná interakce zákazníků a také anonymita oproti počítání osob z kamerových záznamů. Jsou také hojně využívány v průmyslu, například na autonomních výrobních linkách, kde jsou instalovány hlavně díky své rychlosti zpracování informace. Také tyto senzory můžeme nalézt v některých telefonech, kde jsou převážně využívány k vylepšení kvality fotek. Díky nim může telefon lépe rozeznat, co je na fotografii považováno za pozadí a co za popředí. Často je využíván také v autech v kombinaci s dalšími senzory, pro navigaci robotů nebo pro detekci objektů. [4]

Technologie měření doby letu se dá rozdělit na dvě hlavní kategorie: iToF (indirect Time of Flight) a dToF (direct Time of Flight). iToF je metoda, která vypočítá vzdálenost měřením času, který světlo nebo zvuk potřebuje k odrazení od objektu a návratu k senzoru. V iToF senzor vysílá pulz světla nebo zvuku a čeká na jeho odraz. Čas, po který trvá návrat odrazu, se měří a používá se k výpočtu vzdálenosti.

dToF je metoda, která měří čas, který světelný nebo zvukový pulz potřebuje k cestě přímo k objektu a zpět ke senzoru. dToF je obecně považován za přesnější než iToF, protože nevyžaduje výpočty pro kompenzaci rychlosti světla nebo zvuku v různých médiích.

Oba typy mají své vlastní výhody i nevýhody a používají se v různých aplikacích v závislosti na požadavcích. Například iToF se často používá v aplikacích, které vyžadují měření vzdálenosti na dlouhé vzdálenosti, zatímco dToF se často používá v aplikacích, které vyžadují vyšší přesnost.

iToF technologie obvykle používá pulzní zdroj světla, jako je laser, k vyslání krátkého světelného pulsu směrem k cílovému objektu. Světelný pulz se odráží od objektu a vrací se k senzoru, kde ho detekuje fotodetektor. Měří se čas, který trvá světelnému pulzu cesta k cíli a zpět k senzoru. Toto se používá k výpočtu vzdálenosti k objektu.

dToF technologie obvykle používá kontinuální zdroj světla, jako je LED nebo laser, k vyslání stálého proudu světla směrem k cílovému objektu. Světlo se odráží od objektu

a vrací se k senzoru, kde ho detekuje fotodetektor. Měří se čas, který trvá světlu na cestu k cíli a zpět k senzoru, a toto se používá k výpočtu vzdálenosti k objektu.

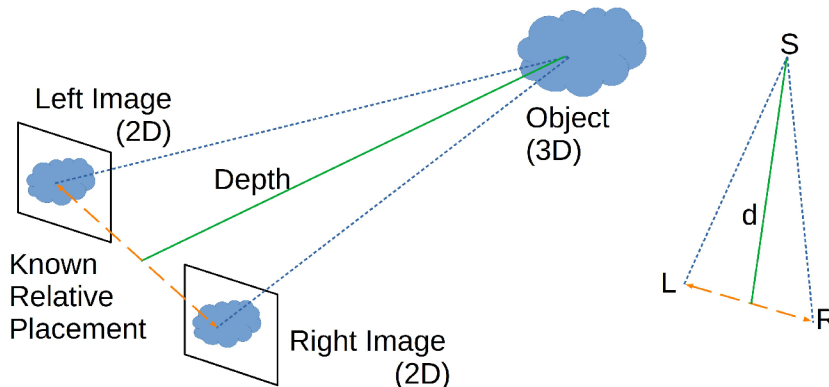
Oba typy mají své vlastní výhody i nevýhody a volba technologie závisí na konkrétních požadavcích aplikace. [6]

## 1.3 Triangulace

### 1.3.1 Pasivní triangulace

Označení pasivní vychází z toho, že se nevyužívá světlo aktivně k měření. Je pouze potřeba mít správně nasvícený měřený objekt. Samotné měření má více možných konfigurací. První možností je využití jediné kamery a to tak, že je snímán objekt statický a nasnímáme ho z vícero úhlů. Další možností je statická kamera a při snímání se pohybuje objektem.

Druhou možností je využití dvou a více kamer, přičemž v zorném poli všech použitých kamer musí být měřený bod, jak je tomu na obrázku 1.4. Snahou je z 2D snímků 3D prostoru získat informaci o hloubce a získat tak opět 3D informaci. Základní varianta využívající dvou kamer vlastně simuluje vnímání světa jako našima očima. Člověk díky dvěma očím, také dokáže vnímat, jak jsou předměty vzdálené.

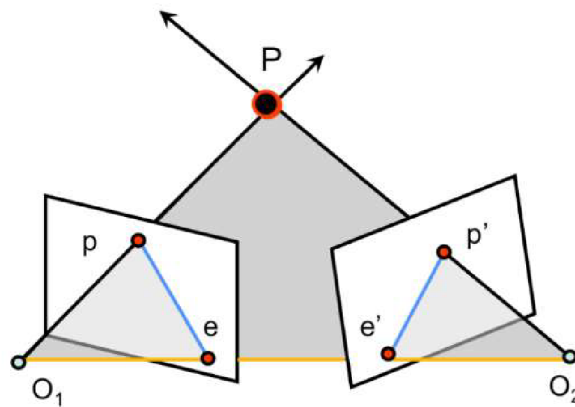


Obrázek 1.4 Základní princip pasivní triangulace [7]

V situaci, kdy snímáme objekt dvěma kamerami a snímáný objekt má na sobě měřený bod, je potřeba nejprve nalézt pixely na levém i pravém snímku, které odpovídají měřenému bodu. Pokud pak známe přesnou polohu kamer vůči sobě, lze dopočítat vzdálenost. Po změření všech bodů daného objektu, můžeme vytvořit 3D model.

Klasickou projekci 3D prostoru na 2D plochu, řeší model dírkové kamery. Problematiku snímání objektu pomocí dvou kamer řeší epipolární geometrie. Rozdílnost dvou snímků snímajících stejný objekt má stejný důvod, jako že objekty nám blízké se zdánlivě pohybují rychleji než ty vzdálenější, přestože se pohybují shodnou rychlostí. [7]

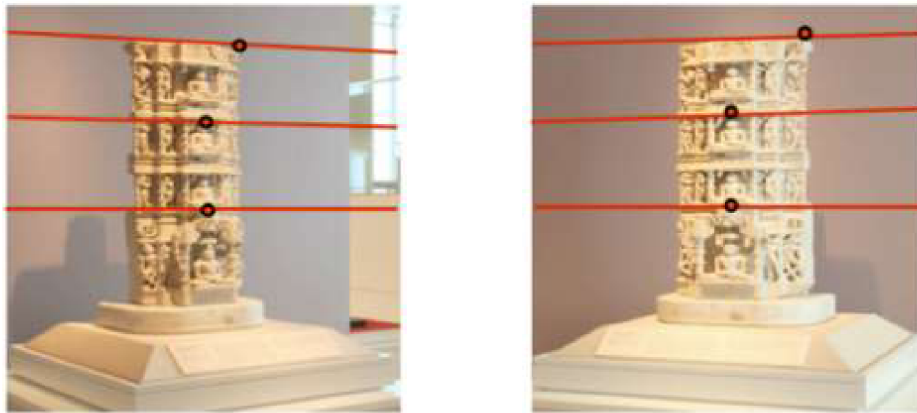
Jak je znázorněno na obrázku 1.5, základní princip epipolární geometrie je pohled dvou kamer na jeden bod  $P$  v 3D prostoru. Tento bod se promítá do obrazové plochy levé kamery jako bod  $p$  a do pravé kamery jako bod  $p'$ .  $O_1$  a  $O_2$  jsou body středového promítání pro jednotlivé kamery. Jejich spojením získáme bázi. Při promítnutí těchto bodů do obrazové roviny, získáme body  $e$  a  $e'$ , které se nacházejí na bázi. Plocha definovaná bodem  $P$  a bází, se nazývá epipolární rovina.



Obrázek 1.5 Základní princip epipolární geometrie [8]

Pokud si zvýrazníme pohled levé kamery na bod  $P$ , jedná se o polopřímku  $O_1 - P$  a bod  $P$  může být z pohledu levé kamery kdekoli na této linii, protože ji vidí jako bod. Pravá kamera vidí tuto linii již jako polopřímku. Po promítnutí do obrazové plochy pravé kamery se jedná o úsečku  $e' - p'$ . Stejně tak to funguje i z pohledu druhé kamery. Tyto linie se nazývají epipolární přímky a jsou naznačeny na obrázku 1.6.





Obrázek 1.6 Epipolární přímky [8]

V reálné situaci může být postup následující. Nejdříve si v levé kameře určíme projekci bodu  $P$ , tedy bod  $p$ . Předpoklad je, že známe polohu kamer, jejich orientaci a jejich definiční matice pro epipolární geometrii. To znamená, že pokud známe  $O_1$ ,  $O_2$  a bod  $p$ , můžeme definovat epipolární rovinu. Následně je možné definovat epipolární přímky. Na základě teorie epipolární geometrie se projekce bodu  $P$  do projekční roviny druhé kamery nachází právě na epipolární přímce. [8]

### 1.3.2 Aktivní triangulace

Opět se jedná o měřicí metodu, která dokáže z 2D informace, kterou máme ze snímku, pořízeného například pomocí CCD senzoru, získat informaci o hloubce. Aktivní triangulace má ve svém názvu slovo aktivní, protože používá pro měření zdroj světla.

Je také hlavním tématem této práce, proto je podrobněji rozebrána ve zvláštní kapitole 2. [9]

### 1.3.3 Fokusovací technika

Technika je založena na metodě tvaru ze zaostření, což je metoda získávání 3D obrazů, která využívá skutečný optický systém s omezenou hloubkou ostrosti. Hloubka ostrosti je oblast, kde je obraz ostrý, a závisí na třech parametrech: vzdálenosti kamery/objektu, cloně a ohniskové vzdálenosti. Při zachování konstantní clony a ohniskové vzdálenosti a změně vzdálenosti kamery/objektu pomocí konstantního kroku se získá sada 2D obrázků, kde každý obrázek má odlišnou hloubku ostrosti. To znamená, že různé části scény jsou v různých obrazech ostré.

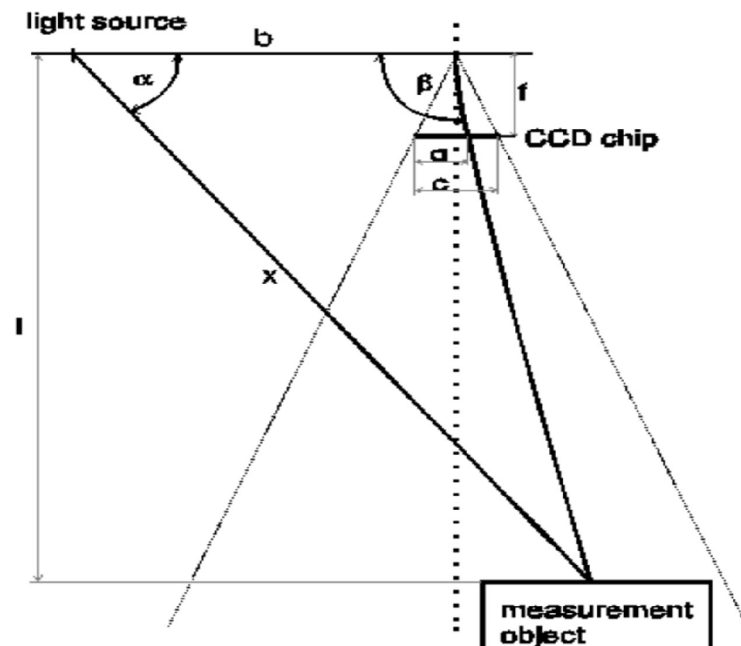
K určení části scény, která je v každém obrázku ostrá, se na každý pixel každého obrázku aplikuje měření ostrosti. Měření ostrosti je způsob kvantifikace ostrosti nebo kontrastu obrazu na základě předpokladu, že ostrý obraz obsahuje více vysokých

frekvencí než rozmazaný obraz. Existuje mnoho druhů měření ostrosti, jako jsou měření založená na gradientu, varianční, histogramová nebo frekvenční.

Měření ostrosti produkuje křivku pro každý pixel, kde pozice maxima představuje obrázek, ve kterém je pixel ostrý. Nalezením pozice maxima pro každý pixel může být vytvořena hloubková mapa, kde je každému pixelu přiřazena šedá úroveň podle jeho prostorové pozice. Hloubková mapa reprezentuje 3D tvar a strukturu scény. Kromě toho může být vytvořen sloučený obraz výběrem nejostřejšího pixelu ze sady obrazů. Sloučený obraz může být použit pro mapování textury na 3D vizualizaci scény. [10]

## 2. AKTIVNÍ TRIANGULACE

Základní princip lze popsat na modelovém příkladu, který je naznačen na obrázku 2.1. Měřený bod je nasvícen laserem a nasvícený bod je snímán pomocí CCD čipu. Zdroj světla a CCD čip mají vůči sobě pevnou polohu, a to včetně jejich úhlu natočení. Z toho vyplývá, že úhel  $\alpha$  je neměnný. Spojnice mezi světlem a CCD čipem se nazývá triangulační optická báze  $b$ . Paprsek světla je nejdříve vyzářený ze zdroje, následně odražený od objektu, a nakonec dopadá na CCD čip. Společně s bází tak tvoří trojúhelník. Paprsek při dopadu nasvítí konkrétní body na CCD čipu a z toho se určí úhel  $\beta$ . Známe tak úhly  $\alpha$ ,  $\beta$  a bázi, což je jedna strana trojúhelníku, a také parametry kamery s objektivem. Z těchto informací je možné dopočítat vzdálenost  $l$  měřeného objektu od měřicí soustavy.



Obrázek 2.1 Princip triangulačního trojúhelníku pro aktivní triangulaci [9]

Konkrétněji pro příklad na obrázku 2.1, když paprsek světla dopadá na senzor, a to na  $n$ -tý pixel z celkového počtu pixelů  $pxl$ , tak velikost  $a$  lze vypočítat rovnicí

$$a = \frac{c \cdot n}{pxl} \text{ [mm]}, \quad (2.1)$$

kde  $c$  je velikost čipu v milimetrech.

Následně lze dopočítat úhel  $\beta$ , díky znalosti velikosti  $a$  a ohniskové vzdálenosti  $f$  objektivu jako

$$\beta = \operatorname{actg}\left(\frac{c/2-a}{f}\right) + 90^\circ \quad [^\circ]. \quad (2.2)$$

Pomocí úhlů  $\alpha$ ,  $\beta$  a velikosti báze  $b$ , lze dopočítat hledanou vzdálenost  $l$  objektu od měřicího systému rovnicí

$$l = \frac{b \cdot \sin \beta}{\sin(180^\circ - (\alpha + \beta))} \quad [mm]. \quad (2.3)$$

Rozlišení aktivní triangulace v její základní formě, popsané výše, závisí na mnoha proměnných. V první řadě na měřené vzdálenosti. Pokud si představíme čtverec o dané velikosti a dáme ho blízko kamery, tento čtverec bude pokryt více pixely, než když stejný čtverec dáme do větší vzdálenosti od kamery. Proto s rostoucí vzdáleností klesá rozlišení.

Další proměnnou je báze. Čím větší báze je, tím větší jsou rozdíly v měřených datech při pohybu měřeným objektem. Takže bázi chceme mít co největší, ovšem v rámci mezí. Báze musí odpovídat požadovanému měřicímu rozsahu. Nedává smysl mít bázi jeden metr na měření deseticentimetrové vzdálenosti.

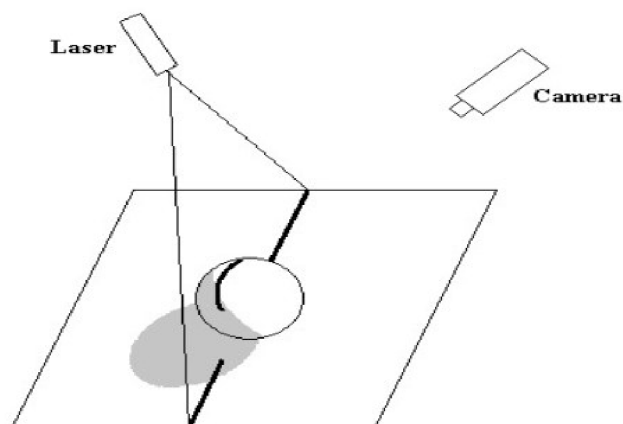
S velikostí báze souvisí i úhel  $\alpha$ . Jde o úhel, pod kterým vysílá paprsek zdroj světla vůči bázi. Kombinace tohoto úhlu a velikosti báze má velký vliv na měřicí rozsah.

Záleží také na ohniskové vzdálenosti. Čím větší je ohnisková vzdálenost, tím lepší rozlišení získáme. Omezením je, aby se nám měřený objekt v měřicím rozsahu vešel do záběru.

Dalším parametrem, který má vliv na rozlišení této metody, je rozlišení použité kamery. Samozřejmě, čím větší rozlišení kamera má, tím lepší rozlišení bude mít i samotná měřicí metoda.

Nevýhodou této metody je, že pro určité tvary nejsme schopni změřit všechny body. Jak je vidět na obrázku 2.2, kde je použita 2D technika s laserem vyzařujícím pruh, laser není schopen nasvítit celou plochu měřeného objektu. Tedy v tomto případě není možno měřit spodní polovinu sféry.

Na obrázku 2.2 je zároveň znázorněna šedou barvou oblast, kterou kamera nevidí. Může tedy vzniknout situace, kdy světelný zdroj objekt nasvítí, ale kamera tyto body nevidí, a tak o této oblasti měřeného objektu nemůžeme nic říci.



Obrázek 2.2 Naznačené nevýhody aktivní triangulace [9]

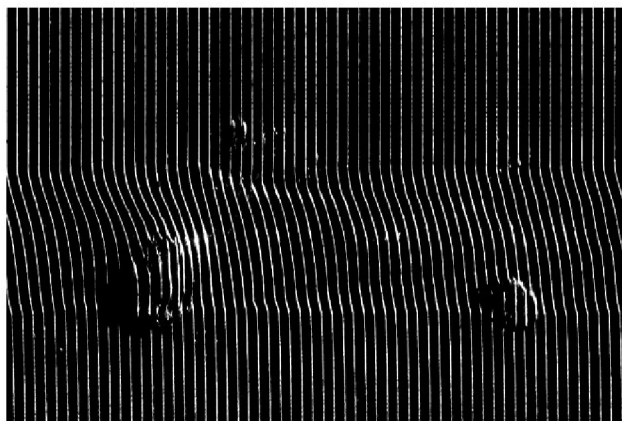
Kvalitu měření ovlivňuje také povrch měřeného objektu. Pokud chceme, aby kamera zaznamenala například světelný pruh co nejpřesněji, musí být pruh ostrý a dobře viditelný. Pokud je povrch objektu z materiálu, který ve velké míře světlo pohlcuje a odráží minimálně, na kameře bude pruh velice slabě vidět. Naopak pokud je povrch objektu lesklý, nasvícený pruh nemusí být ostrý a zároveň může povrch způsobit nevhodné odrazy světla.

Problém při měření může způsobovat i okolní světlo. Pokud okolní světlo, ať už jde o slunce či jiný zdroj světla, přesvítí naše primární světlo, které je použito k měření, nelze ho pak správně detekovat v obraze, a tedy nelze měřit. Proto je třeba redukovat množství okolního světla nebo ho zcela eliminovat. Alternativou je použití zdroje světla o vlnové délce, která není obsažena v rušivém okolním světle a na kameře použít úzkopásmový filtr. Ten tak propustí jen světlo ze zdroje světla, které je použito k měření. Jednou z možností je infračervené světlo. Nevýhodou je, že jej člověk nevidí, a tak je komplikované nastavit takový měřicí systém. [9]

Aktivní triangulace lze využít k získání 3D modelu. Tato metoda je označována jako laserové skenování. Je možné buď kontrolovaně pohybovat s měřeným předmětem o známou změnu polohy mezi snímky nebo druhá varianta je, že měřený objekt je na místě a kontrolovaně se pohybuje měřicí systém. Postupně se tak naskenuje celý objekt a z naměřených bodů lze následně poskládat 3D model. [11]

Techniky měření lze ještě rozdělit podle druhu světla. Základní variantou je bodový zdroj světla. Jedná se nejčastěji o laser a lze ji označit za 1D variantu. Druhou variantou je nasvícení přímky, často také pomocí laseru. Jde o 2D variantu. Poslední 3D varianta již vyžaduje nasvícení měřeného objektu komplexnějšími obrazci. Lze použít například projektor.

Pro 1D variantu se používá nejčastěji řádková kamera, kdežto pro 2D a 3D variantu se používá klasická plošná kamera. 1D a 2D měření může být velice náročné na čas, proto existují techniky, které potřebný čas na měření jsou schopny zredukovat. Například lze s výhodou využít situace, kdy zdroj světla pro měření je zároveň jediným zdrojem světla. Příklad pro 2D variantu je uveden na obrázku 2.3. Je vidět, jak jsou všechna měření objektu zaznamenána do jednoho snímku. Takový snímek je možné vytvořit, protože senzor vlastně zaznamenává světlo a jelikož je měřicí zdroj světla zároveň jediným zdrojem, je možné takto nasvítit postupně celý objekt v rámci jednoho snímku, přičemž nenasvícená část snímku se nezmění. Takže při pořizování jednoho snímku je buď zdrojem světla nebo měřeným objekt posouváno o přesně danou vzdálenost a jsou tak postupně nasvíceny všechny proužky. [9]



Obrázek 2.3 2D varianta aktivní triangulace urychlující dobu měření [9]

Aktivní triangulace je optická metoda měření a rekonstrukce 3-D objektů, která má široké uplatnění v průmyslu. Jednou z aplikací je získání 3-D modelu klobouku pomocí laserového pruhu a rotačního stolu. Laserový pruh osvětlí profil klobouku, který je snímán maticovou kamerou. Klobouk se otáčí na rotačním stole o jeden stupeň a opakuje se snímání profilu. Z 360 profilů se pak složí 3-D model klobouku.

Další aplikací je kontrola povrchu svarových švů na kolech automobilů pomocí laserového pruhu a speciální kamery. Laserový pruh osvětlí svarový šev, který je snímán kamerou s postupnou expozicí. Kamera tak zaznamená jen kontrastní laserový pruh a ignoruje ostatní světlo. Ze snímku se pak zrekonstruuje povrchový profil švu a detekují se případné vady, jako jsou díry, bubliny nebo nesprávná šířka.

Třetí aplikací je měření objemu viskózní kapky lepidla pomocí strukturovaného světla a kalibračního objektu. Strukturované světlo je tvořeno známým vzorem (například několik pruhů), který se promítne na kapku lepidla. Vzor se deformuje podle

tvaru kapky a jeho obraz je zachycen kamerou. Z obrazu se pak určí funkce výšky kapky nad základnou. Objem kapky se pak spočítá jako dvojitý integrál této funkce.

Čtvrtou aplikací je detekce a získání výškového profilu vozidla pomocí laserového paprsku a lineární kamery. Laserový paprsek osvětlí horní část vozidla, která je snímána lineární kamerou umístěnou nad vozovkou. Z každého řádku kamery se pak zjistí poloha laserového bodu a převede se na souřadnice v prostoru. Z těchto souřadnic se pak sestaví výškový profil vozidla, který slouží k jeho rozpoznání a klasifikaci. [12]

## 2.1 Kalibrace 2D varianty systému

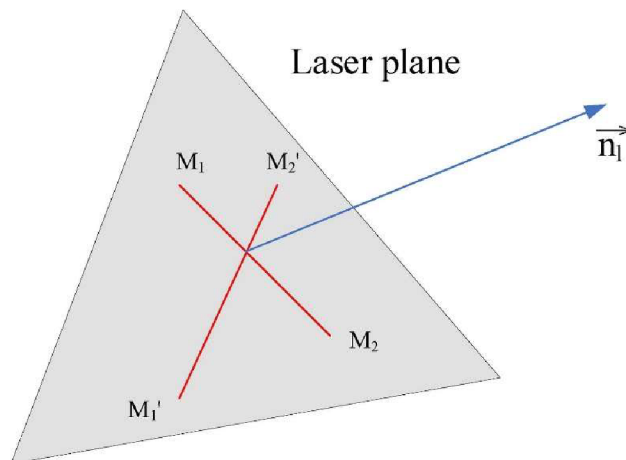
V praktické části je využíváno 2D varianty aktivní triangulace, proto zde budou popsány kalibrační metody právě pro tuto variantu.

Jak už je popsáno výše, pro získání polohy měřeného bodu v prostoru ze snímku, využívá tato metoda triangulační trojúhelník, který je zobrazen na obrázku 2.1. Pokud ovšem chceme dopočítat souřadnice tohoto bodu z trojúhelníku, je třeba znát parametry trojúhelníku. Je potřeba znát úhel natočení zdroje světla  $\alpha$  a velikost báze  $b$ . Jednou z možností je, si tyto parametry změřit. To však může být obtížný úkol, protože tyto parametry musíme znát co nejpřesněji. Přesnost určení těchto parametrů má přímý vliv na přesnost samotné metody. Z toho důvodu se používá alternativní postup, který hledá lineární transformaci nebo také koeficienty laserové plochy.

První z těchto možných postupů, je metoda vektorového součinu. U této metody jde o získání parametrů měřicí plochy, na kterou se následně umístí měřený objekt, a která je nasvícena laserem. Přesněji, tato metoda vyžaduje využití minimálně dvou laserových proužků a tyto proužky nesmí být vůči sobě paralelní. Příklad je uveden na obrázku 2.4. Měřicí rovinu lze díky tomu definovat pomocí normálového vektoru  $n$ , který se získá součinem vektorů laserových proužků jako

$$n = M_1 M_2 \times M'_1 M'_2, \quad (2.4)$$

kde  $M_1 M_2$ ,  $M'_1 M'_2$  jsou vektory laserových přímek.



Obrázek 2.4 Znázorněná metoda vektorového součinu [13]

Na základech tohoto principu existuje mnoho různých metod. Některé si pomáhají vícero laserovými proužky, jiné zase šachovnicovým kalibračním vzorem. Vždy ale zůstává problém, s určením středu laserového proužku na snímku, případně i určení průsečíku dvou proužků. Jeden z možných postupů pro hledání středu laserových čar je předpokládat, že intenzita pixelů má Gaussovo rozložení.

Protnutí dvou laserových proužků také není ideální v jednom bodě. Proto se za průsečík považuje bod, který je nejbližší extrahovaným středům v průsečíku laserových čar. Kvůli těmto nepřesnostem je složité garantovat přesnost kalibrace. Definici hledané měřicí roviny lze pak získat například metodou nejmenších čtverců.

Další jsou metody řešící lineární rovnice. Lineární rovnice vyjadřuje vztah mezi pixely kamery a referenčními body v prostoru. Tato závislost může vypadat takto:

$$s \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \\ 1 \end{bmatrix} = [r_1 \quad r_2 \quad t] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

kde  $s$  je měřítko,  $r_1$  a  $r_2$  jsou sloupcové vektory rotační matice. Řešení rovnice měřicí roviny může být dosaženo řešením rotační matice a translačního vektoru. Rovnici můžeme zapsat jako

$$s\tilde{m} = H\tilde{M} \quad (2.6)$$

a eliminací měřítka  $s$ , dostaneme rovnici

$$\begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{h}_3\tilde{M}} \begin{bmatrix} \hat{h}_1\tilde{M} \\ \hat{h}_2\tilde{M} \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$



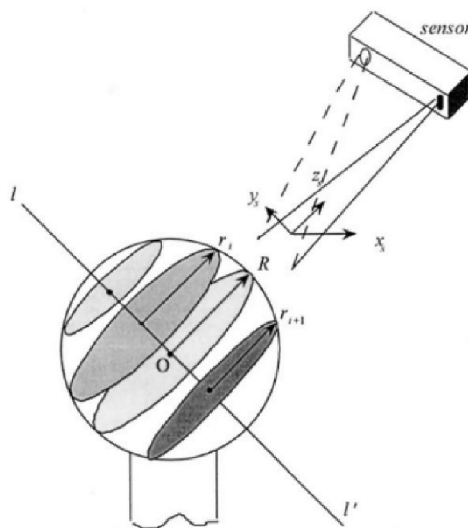
Následnou úpravou pak lze získat rovnici

$$\begin{bmatrix} \tilde{M}_i^T & 0^T & x_u \tilde{M}_i^T \\ 0^T & \tilde{M}_i^T & y_u \tilde{M}_i^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{h}_1^T \\ \hat{h}_2^T \\ \hat{h}_3^T \end{bmatrix} = 0. \quad (2.8)$$

Z toho vyplývá, že je zapotřebí nejméně čtyř dvojic známých referenčních bodů s přiřazenými body na snímku pro vyřešení transformační matice mezi souřadnicovým systémem kamery a souřadnicovým systémem reálného prostoru.

Pro nalezení známých referenčních bodů v prostoru se využívají různé kalibrační objekty. Nejznámější je šachovnicový vzor, ale může se použít i trojúhelníkový, nebo se dokonce pro kalibraci může použít koule. Důležité je hlavně znát rozměry těchto kalibračních objektů.

S výhodou se v metodách řešících lineární rovnice využívá lineárního mikro posuvu. Jak je vidět na obrázku 2.5, měřicí systém se skládá z kamery, ze zdroje světla, který tvoří laserový proužek, a z kalibrační koule. Díky mikro posuvu je možné objekt vůči kameře a zdroji světla posunout v jednom směru o přesně definovanou vzdálenost. Získáme tak více známých kalibračních bodů v prostoru.

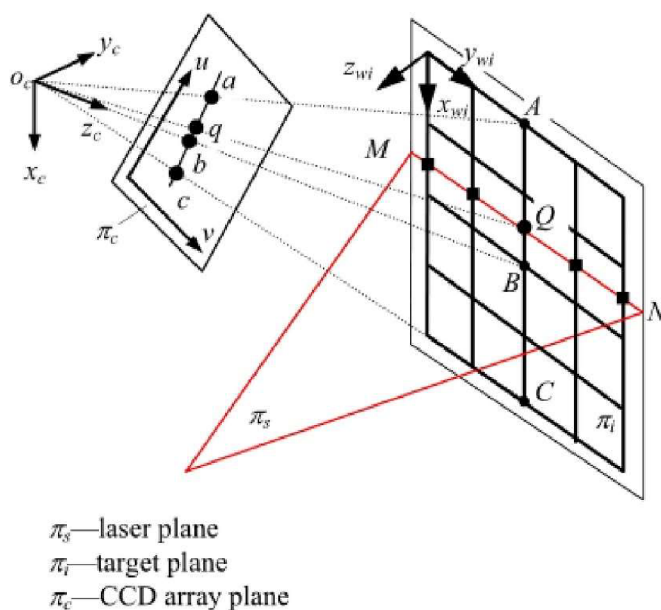


Obrázek 2.5 Aktivní triangulace s lineárním posuvem [13]

Další metody jsou založeny na dvojpoměru kolineárních bodů. Tento princip se ve velkém využívá pro stereo vidění, ale právě i pro aktivní triangulaci s promítáním laserového proužku. Pro tento případ je znázorněn princip na obrázku 2.6. Dle teorie, platí pro příklad na obrázku 2.6 následující vztah

$$\frac{AB}{BQ} : \frac{AC}{QC} = \frac{ab}{qb} : \frac{ac}{qc}, \quad (2.9)$$

kde  $AB$ ,  $AC$ ,  $BQ$  a  $QC$  jsou euklidovské vzdálenosti v souřadnicovém systému reálného prostoru a  $ab$ ,  $qb$ ,  $ac$  a  $qc$  jsou pixelové vzdálenosti příslušných bodů v souřadnicovém systému kamery. Tímto způsobem se dopočítá bod, který vznikne průnikem laserové čáry a pozorované přímky. Potom lze určit rovnice roviny vyzařovaného světla. [13]



Obrázek 2.6 Princip dvojoměru kolineárních bodů v aktivní triangulaci [13]

Další jsou metody využívající středového promítání do bodu a přímky. Také se hodně využívá ve stereo vidění. Jak je naznačeno na obrázku 2.7, paralelní čáry v reálném prostoru nejsou paralelní ve středovém promítání. Paralelní přímky mají tedy průsečík. Na obrázku se jedná o body  $v_1$  a  $v_2$  spojené přímkou  $l$ . Ideálně se také protínají paralelní čáry v ohnisku kamery. Neměla by však nastat situace, kdy rovina kamery a rovina šachovnice jsou paralelní. V takovém případě by se paralelní přímky neprotínaly.

Lineární rovnice obrazu je definována jako

$$ax + by + c = 0. \quad (2.10)$$

Příslušná rovnice roviny je pak

$$Ax + Bx + C = 0 \quad (2.11)$$

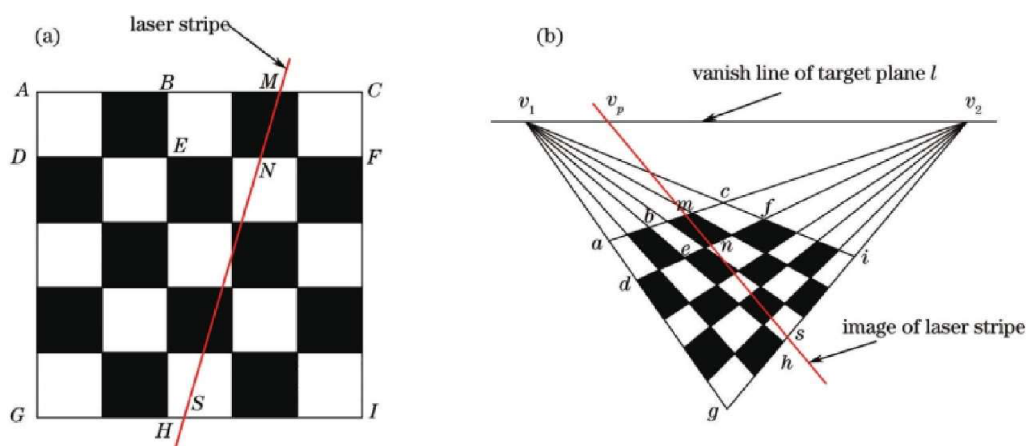
a definice přímky  $l$  je

$$l = [a, b, c]^T . \quad (2.12)$$

Potom platí vztah, že

$$l = K^{-T} n^T, \quad (2.13)$$

kde  $K$  definuje vnitřní parametry kamery a  $n$  je normálový vektor roviny vyzařovaného světla. Z této rovnice je tak možné získat právě normálový vektor  $n$ .



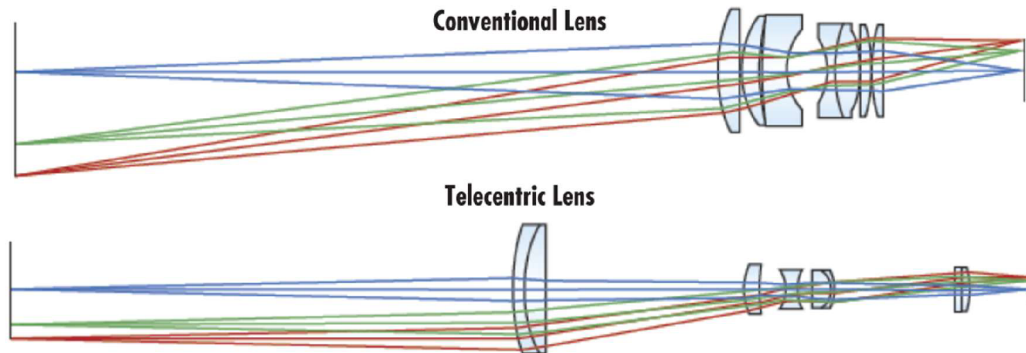
Obrázek 2.7 Princip metody využívající středové promítání [13]

Poslední zde zmiňovaná skupina metod, jsou metody využívající Plückerovu matici. Tyto metody nepotřebují získat referenční body roviny světla, čímž je možné se vyhnout některým chybám. Přesnost těchto metod pak může být vysoká, ale přesto nejsou příliš používané. Pravděpodobně kvůli jejich složitosti na pochopení i řešení. [13]

## 2.2 Varianta s telecentrickým objektivem

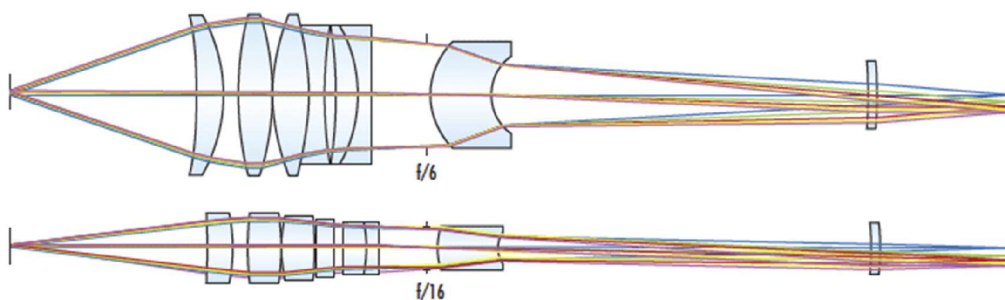
Konvenční objektivy mají úhlové zorné pole, což znamená, že čím více se objektiv vzdaluje od objektu, tím menší se stává zvětšení. To je podobné lidskému vidění a pomáhá nám vnímat hloubku obrazu. Avšak, úhlové zorné pole způsobuje paralaxní chybu, známou také jako perspektivní chyba, což snižuje přesnost měření. To znamená, že naměřená velikost objektu se mění, když se objekt posune, i když zůstane v hloubce ostrosti, kvůli změně zvětšení. Naštěstí, telecentrické objektivy tuto paralaxní chybu odstraňují. Telecentrické objektivy mají konstantní, neúhlové zorné pole. Ať už se

objektiv nachází v jakékoli vzdálenosti od objektu, bude mít vždy stejné zorné pole. Obrázek 2.8 ukazuje rozdíl mezi konvenčním a telecentrickým zorným polem. [14]



Obrázek 2.8 Rozdíl mezi telecentrickým a konvenčním objektivem [14]

Kolik je možné vidět skrze jakýkoli telecentrický objektiv závisí na velikosti skleněné části vpředu. Čím větší je skleněná přední část, tím větší je zorné pole. Telecentrické objektivy mohou být velmi velké a těžké, přitom mohou mít jen malý záběr, protože potřebují velkou skleněnou část vpředu. To může být problém v některých situacích, kdy jsme omezeni prostorem nebo hmotností. Clona objektivu také mění, jak velký je objektiv, protože skleněná část vpředu také roste s jasnem objektivu. Obrázek 2.9 ukazuje dva telecentrické objektivy s různou velikostí clon. Objektiv v horní části obrázku 2.9 je systém, který pracuje se clonou  $f/6$ , a objektiv ve spodní části pracuje se clonou  $f/16$  a propouští tak mnohem méně světla.

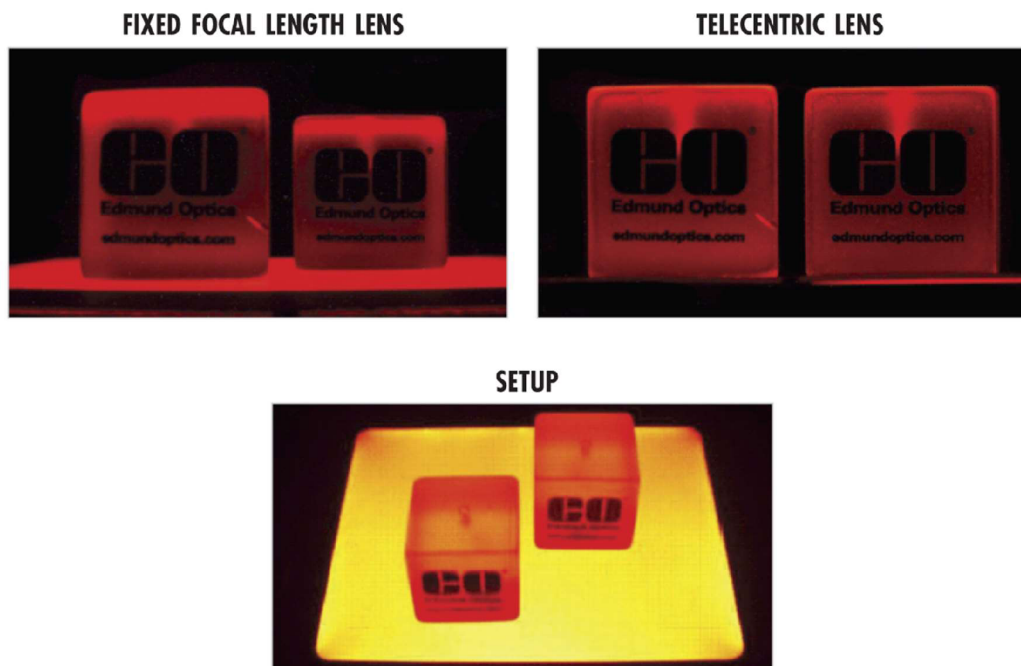


Obrázek 2.9 Rozdíl mezi telecentrickými objektivy s clonou  $f/6$  (nahore) a  $f/16$  (dole) [15]

Pokud je potřeba velmi velké zorné pole, pevné ohniskové vzdálenosti lze doplnit dalšími optickými prvky, aby se vytvořila pseudo-telecentrická čočka pro velké zorné

pole. Například lze použít čočku s pevnou ohniskovou vzdáleností, která byla doplněna Fresnelovou čočkou, aby se z ní stala telecentrická čočka. Tento typ doplnění má vždy nižší kvalitu obrazu než speciálně navržená telecentrická čočka, ale může být užitečný tam, kde je nákladově citlivá aplikace s velkým zorným polem vyžadujícím telecentricitu. V tomto případě lze použít pouze omezenou pracovní vzdálenost, stejně tak jsou značným omezením barevné vady kvůli použití Fresnelovy čočky. [15]

Telecentrické objektivy mají i své nevýhody, ale i díky konstantnímu zornému poli v měřicích aplikacích výhody jasně převyšují. Hlavní výhodou telecentrického objektivu je, že jeho zvětšení se nemění v závislosti vzdálenosti předmětu od objektivu. V dolní části obrázku 2.10 je vidět scéna určená k zachycení. V horní části je následně scéna zachycená pomocí konvenčního objektivu a pomocí telecentrického objektivu. V horní levé části obrázku 2.10 je snímek zachycující scénu pomocí konvenčního objektivu s fixní ohniskovou vzdáleností a je na první pohled možné rozeznat, že se kostky nenacházejí ve stejné vzdálenosti od objektivu. V pravé horní části se pak nachází snímek scény pomocí telecentrického objektivu. Zde naopak není možné rozpoznat, která z kostek se nachází blíže objektivu. Z této ilustrační scény jasně vyplývá výhoda telecentrických objektivů. Pokud se při měření pomocí konvenčních objektivů posune objekt, byť jen minimálně, dostaneme odlišné výsledky. Běžně je měření prováděno automatizovaně a měřený objekt je na místo dopravován například pomocí dopravníků. Opakované přesné umístění je pak složitý úkol. U telecentrických objektivů je tento problém eliminován, a tedy pro přesné měření se stává velice výhodnou součástí měřicího systému.



Obrázek 2.10 Scéna zachycená konvenčním a telecentrickým objektivem [14]

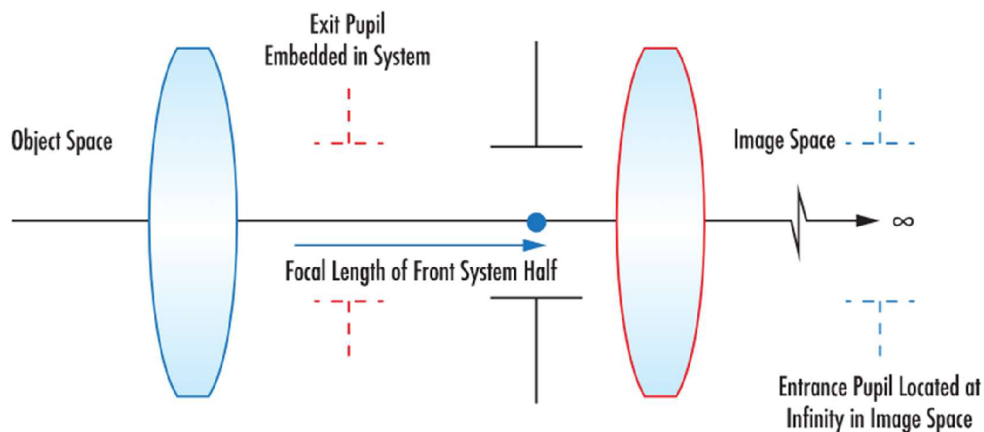
Vlastností telecentrických objektivů také je, že mají rovnoměrné rozložení hloubky ostrosti na obě strany od nejlepšího zaostření, což u konvenčních objektivů neplatí. Když už se dostaneme s hloubkou ostrosti mimo objekt a ten tak vidíme rozmazaně, stále je šance, že některé vlastnosti objektu lze zjistit. U telecentrických objektivů totiž dochází k rozostření symetricky a hrany si zachovávají svou polohu těžiště. Dokonce je možné rozostření v určitých případech využít s výhodou. Pokud je hrana rozostřená zabírá více pixelů než hrana zaostřená, a detekce její přesné polohy je tak méně náchylná na šum. Měření tak může být spolehlivější a lépe opakovatelné. [14]

Telecentrické objektivy mají standardně nízkou míru zkreslení, takže ve většině případů není potřeba provádět, pro měřicí účely, kalibraci zkreslení. U konvenčních objektivů je potřeba tuto kalibraci provést, protože zkreslení objektivu vytváří příliš velkou chybu měření. Jelikož u telecentrických objektivů není třeba kalibrace, lze ušetřit výpočetní výkon, a tedy i potřebnou dobu na jednotlivá měření. [16]

Existují tři druhy telecentrických objektivů. Mohou být objektivě telecentrické, obrazově telecentrické nebo dvojité telecentrické. Rozdíl je v umístění vstupní a výstupní pupily, přičemž vstupní pupila je obraz clony do objektového prostoru a výstupní pupila je obraz clony do obrazového prostoru.

Většina objektivů označených jako telecentrické jsou objektivě telecentrické. Tyto objektivy mají umístěnou vstupní pupilu v nekonečnu obrazového prostoru, díky

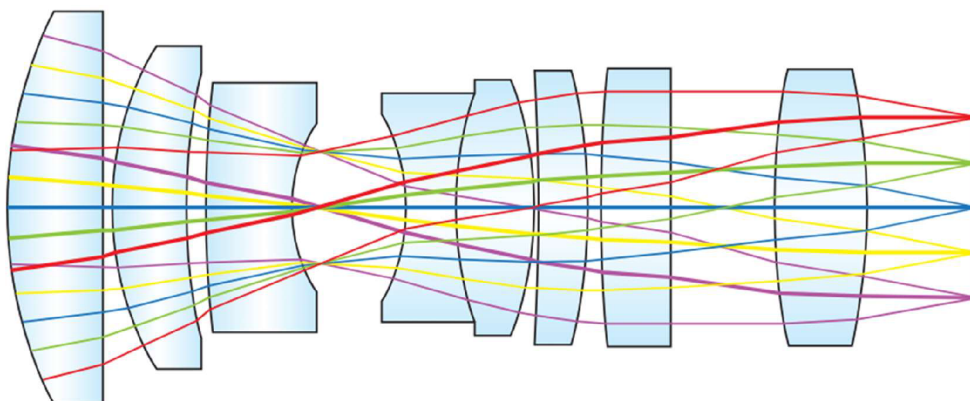
tomu je zorné pole konstantní a neúhlové, tedy bez perspektivního zkreslení. Z pohledu fyzické stavby objektivu je tohoto typu telecentricity dosaženo, umístěním clony systému do ohniskové roviny přední skupiny čoček. Nákres stavby objektivu je na obrázku 2.11.



Obrázek 2.11 Princip objektivě telecentrického objektivu [17]

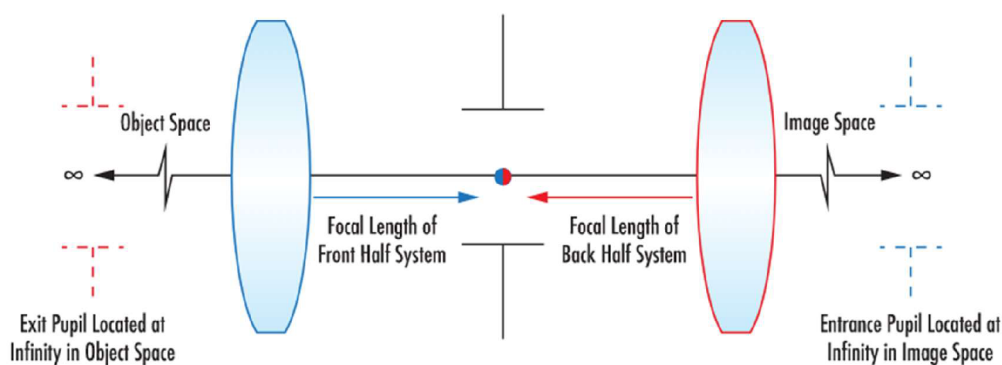
Přední část objektivu má přesně dané rozložení čoček, ale zadní část může mít pohyblivé elementy. Lze tak vyrobit objektiv s funkcí ostření, což může být užitečné v případě, že je potřeba splnit danou vzdálenost objektivu k měřenému objektu. Díky pohyblivým elementům může mít objektiv i možnost zvětšování, a dokonce je možné promítat obraz na větší snímáček, než je velikost zadní části objektivu.

O obrazovou telecentricitu se jedná, pokud má objektiv výstupní pupilu umístěnou v nekonečnu obrazového prostoru. Díky této vlastnosti dopadají paprsky na senzor rovnoběžně. Nezáleží tak na přesném umístění senzoru. Pokud senzor mezi snímky změní lehce polohu, budou snímky stále totožné, stejné výšky i šířky. Proto je možné obrazově telecentrické objektivy používat zároveň na vícero kamerách. Pokud budou objektivy stejné, dostaneme konzistentní výsledky. Průchod paprsků objektivem je znázorněn na obrázku 2.12, Rovnoběžné paprsky dopadající na senzor také eliminují některé obrazové vady, protože paprsky dopadají na senzor rovnoměrněji než u konvenčních objektivů.



Obrázek 2.12 Znáornění průchodu paprsků obrazově telecentrickým objektivem [17]

Poslední variantou je dvojitě telecentrický objektiv. U tohoto typu platí principy jak objektově telecentrického, tak obrazově telecentrického objektivu. To lze vidět na obrázku 2.13. Paprsky tak vstupují do objektivu paralelně a zároveň vystupují paralelně. Má výhody obou typů objektivů a je nejpřesnějším z nich. Je schopen eliminovat chybu měření ve změně umístění objektu, ale i malou změnu pozice senzoru. Zároveň eliminuje některé obrazové vady. Tento typ objektivu se tak používá v aplikacích vyžadujících maximální přesnost. [17]

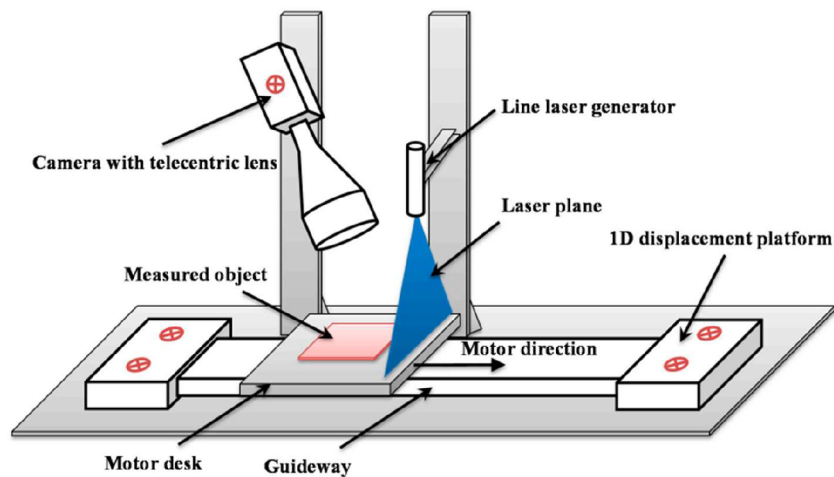


Obrázek 2.13 Znáornění principu dvojitě telecentrického objektivu [17]

Příkladem využití telecentrického objektivu je popsán v článku s názvem Design and analysis of high-accuracy telecentric surface reconstruction system based on line



laser. Tento článek popisuje měřicí systém, který je schopen velké přesnosti a to až řádu mikronů. Principem měření je právě 2D varianta aktivní triangulace s liniovým laserem. Na obrázku 2.14 je náčrt tohoto měřicího systému. Je složen z kamery s telecentrickým objektivem, ze speciálního liniového laseru a z platformy umožňující pohyb v jednom směru. Objekt je postupně nasnímán a poté složen do velice přesného modelu. Systém však zvládá nasnímat jen malou oblast, právě díky konstrukci telecentrického objektivu. [18]



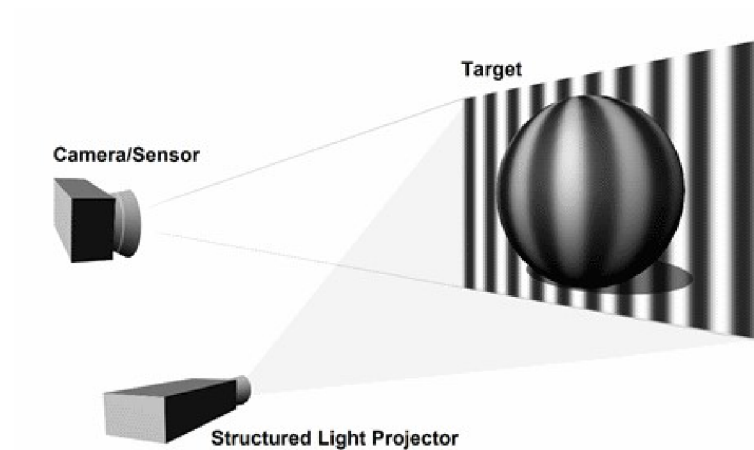
Obrázek 2.14 Znáornění principu dvojité telecentrického objektivu [18]

## 2.3 3D varianta aktivní triangulace

3D skenování pro tuto techniku není přesným označením procesu měření. Toto označení lépe vystihuje například z medicínské oblasti počítačovou tomografi nebo magnetickou rezonanci. Při nich je získán 3D model včetně vnitřních částí, které není běžně vidět zrakem ani kamerami. Proto je lepším označením 3D skenování povrchu. Toto označení lépe popisuje fakt, že dochází k měření  $x$ ,  $y$ ,  $z$  souřadnicí bodů povrchu. Výsledek lze také popsat jako mapu hloubky, kde pro souřadnice  $x$ ,  $y$  dostaneme z souřadnici (hloubku).

3D varianta aktivní triangulace využívá k měření strukturované světlo. Měřený objekt je nasvícen tímto strukturovaným světlem, což je speciální 2D vzor s proměnnou intenzitou. Variantou je i 3D vzor, u kterého dochází ke změně v ose  $x$  i  $y$ , na rozdíl od 2D varianty, kde dochází ke změně jen v jednom směru. Příkladem může být vzor, u kterého se mění intenzita světla na základě koherentní optické interference. Převážně

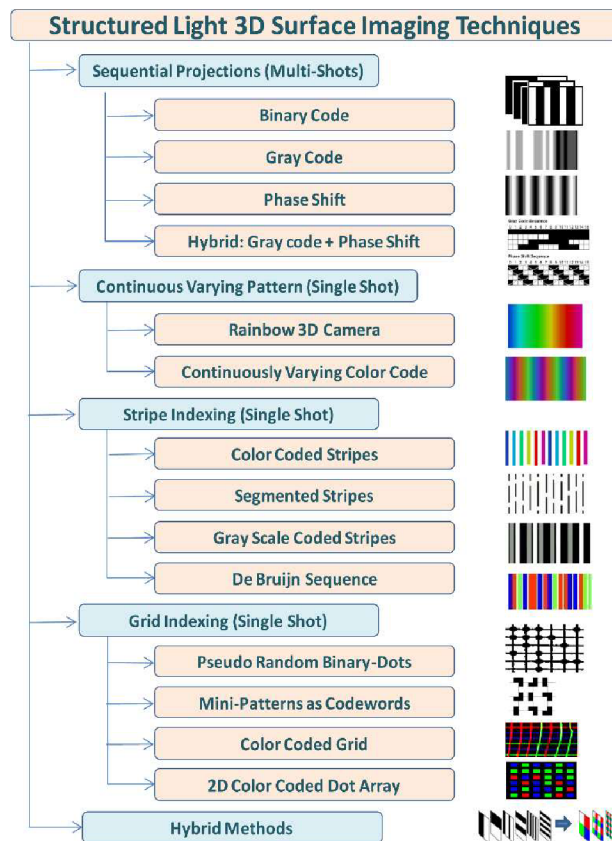
jsou však využívány 2D varianty vzorů. Zdrojem světla může být například projektor nebo světelný zdroj modulovaný prostorovým modulátorem. Příklad je možné vidět na obrázku 2.15.



Obrázek 2.15 Princip měření pomocí 3D varianty aktivní triangulace [19]

Takto nasvícená scéna, včetně měřeného objektu, je zachycena kamerou a je získán 2D snímek. Pokud je pořízen snímek bez měřeného objektu, bude nasvícený vzor bez deformací. Pokud je však součástí snímku měřený objekt, dojde k deformaci nasvíceného vzoru v závislosti na tvaru objektu. Snímek je následně vyhodnocen a na základě deformací známého vzoru, je získán 3D model. Existuje mnoho měřících principů svázaných s různými vzory nasvícení a s jejich algoritmy pro vyhodnocení snímků.

Jak již bylo řečeno, existuje mnoho technik měření pomocí strukturovaného světla. Základní dělení těchto technik je na sekvenční, kdy je pro měření použito vícero snímků, a jedno snímkové, kdy je pořízen pouze jeden snímek. Podrobnější dělení lze vidět na obrázku 2.16. Sekvenční varianty jsou výhodné, protože lze získat přesnější a spolehlivější výsledky než u jedno snímkových variant. Ne vždy však je možné pořídit více snímků. Pokud je měřený objekt v pohybu, nelze sekvenční varianty použít. V takovém případě jsou jedno snímkové varianty vhodnější alternativou.



Obrázek 2.16 Dělení technik 3D varianty aktivní triangulace [20]

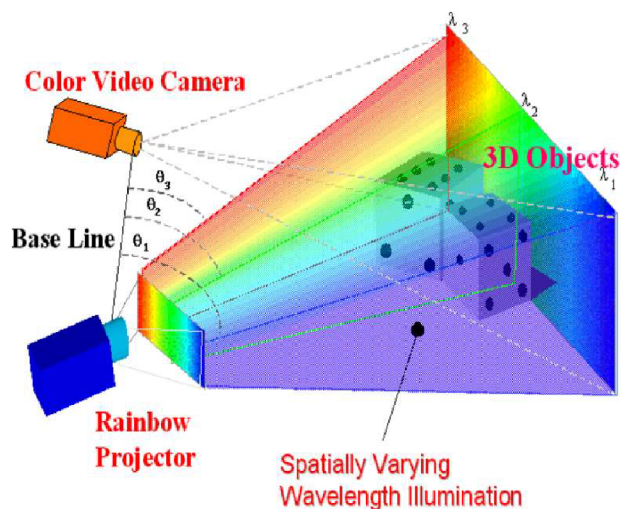
Jak je na obrázku 2.16 naznačeno, jedno snímkové varianty lze dále rozdělit na tři další podskupiny. První podskupinou jsou techniky s kontinuálně se měnícími strukturovanými světelnými vzory. Tyto techniky používají vzory, které se postupně mění v barvě nebo intenzitě, takže každý bod na povrchu má jedinečnou hodnotu, která určuje jeho polohu.

Druhou podskupinou jsou techniky s 1D kódovacími schémata (indexování pruhů). Tyto techniky používají paralelní pruhy různých barev nebo šedých úrovní, které jsou označeny tak, aby bylo možné je odlišit od ostatních. Tyto techniky také mohou získat 3D snímek jedním záběrem, ale vyžadují složitější dekodovací algoritmy a mohou být náchylné k chybám způsobeným šumem.

Třetí podskupinou jsou techniky s 2D kódovacími schémata (indexování mřížky). Tyto techniky používají 2D mřížkové vzory, které jsou rozděleny na malá okna, z nichž každé má jedinečný kód. Tyto techniky jsou obecně spolehlivější a přesnější než techniky s 1D kódovacími schémata, ale vyžadují více výpočetního výkonu a paměti. [20]

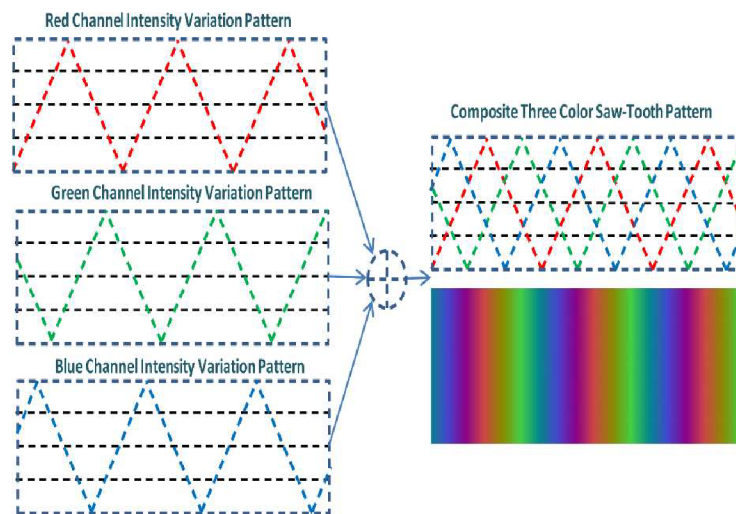
### 2.3.1 Techniky s kontinuálně se měnícími strukturovanými světelnými vzory

Jedním ze zástupců z podskupiny s kontinuálně se měnícími strukturovanými světelnými vzory je technika používající duhový světelný vzor, jak je vidět na obrázku 2.17. Tato technika využívá postupně se měnící vlnové délky napříč vzorem, který je promítán na měřený objekt. Projekce vzoru je uzpůsobena tak, aby byla možná jednoznačná korespondence mezi úhlem projekce roviny světla a určitou spektrální vlnovou délkou, což umožňuje snadnou identifikaci každého bodu měřeného povrchu.



Obrázek 2.17 Aktivní triangulace s projekcí duhového světelného vzoru [20]

Dalším příkladem je nepřetržitě se měnící barevné kódování. Jednou z možností je pro každý barevný kanál zvlášť vytvořit vzor s postupně se měnící intenzitou a ty následně sečíst dohromady. Vznikne tak nepřetržitě se měnící barevný vzor. Tento příklad je znázorněn na obrázku 2.18. Při této technice vzor nemusí splňovat proměňující se vlnovou délkou, ale využívá se toho, že pro každý bod známe intenzitu všech barevných složek a je tak možné určit polohu bodů. [20]

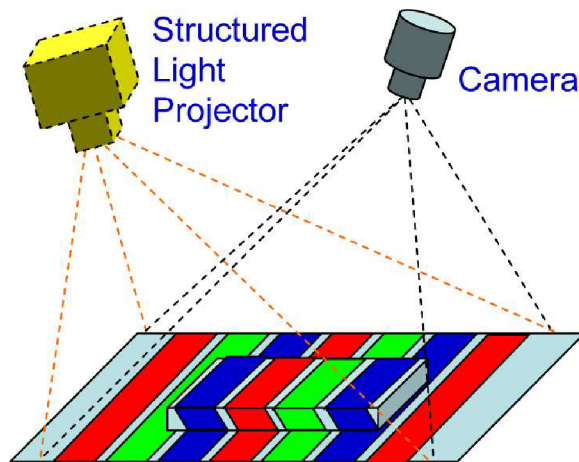


Obrázek 2.18 Aktivní triangulace s projekcí nepřetržitě se měnícího barevného vzoru [20]

### 2.3.2 Techniky s 1D kódovacími schématy (indexování pruhů)

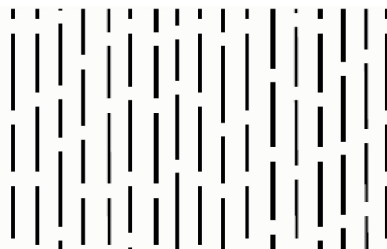
Další podskupinou byly techniky s 1D kódovacími schématy. Nekódované pruhy jsou rychlejší a jednodušší na projekci, ale obtížnější na indexování, což znamená určení pořadí pruhů v promítaném vzoru. Pruhy se mohou překrývat nebo chybět v získaném obraze kvůli paralaxnímu efektu nebo okluzi povrchových rysů objektu. Paralaxní efekt je jev, kdy se zdánlivá poloha nebo orientace objektu mění v závislosti na úhlu pohledu a okluzi rysů objektu je jev, kdy jsou některé části povrchu objektu skryté před pohledem kamery nebo projektoru kvůli jeho tvaru nebo umístění. Proto existují techniky které indexují promítané pruhy pro jejich snadnou identifikaci. [20] [21]

Jednou z možností je indexování pruhů pomocí barvy jak je naznačeno na obrázku 2.19. Barevné snímače obrazu mají běžně tři nezávislé kanály, které odpovídají různým spektrálním pásmům. Přičemž tři 8-bitové kanály mohou reprezentovat  $2^{24}$  různých barev. Díky tomu lze udělat velice kvalitní indexaci pruhů a dokonce dosáhnout na skenování povrchu v reálném čase. Je také možné zvolit odlišný přístup a do vzoru zakódovat vícero vzorů, přičemž každý má svou jedinečnou barevnou hodnotu.



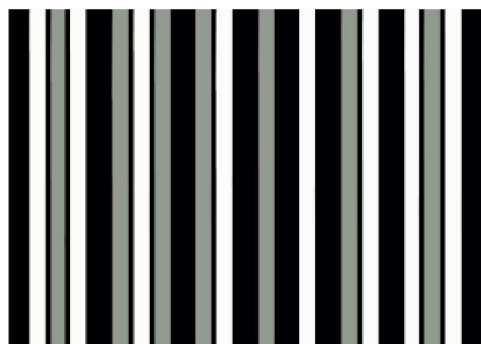
Obrázek 2.19 Aktivní triangulace s barevnou indexací pruhů [20]

Další možností indexace pruhů je každý proužek rozlišit vlastním jedinečným vzorem, jak je naznačeno na obrázku 2.20. Pak je možné ze snímku rozlišit pruhy mezi sebou. Pokud je však povrch objektu členitý, může se stát, že vzor konkrétního pruhu nebude rozpoznán. Tento vzor má díky tomu značné omezení. [20]



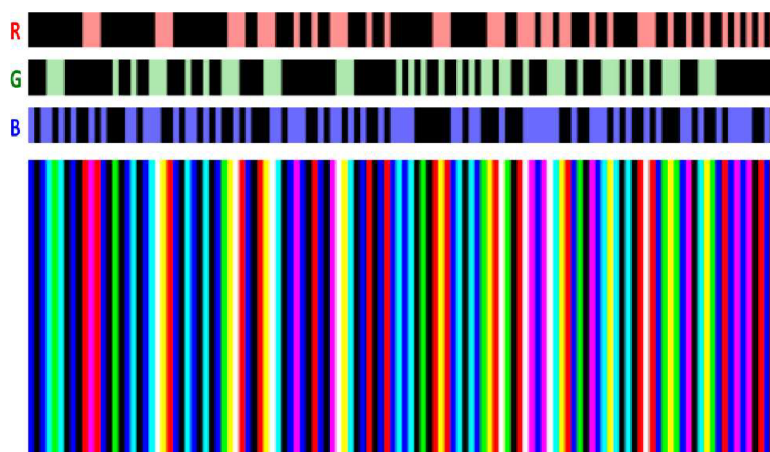
Obrázek 2.20 Aktivní triangulace s indexací pruhů vzorem [20]

Další možností je indexace pomocí odstínu šedi. Každý pruh je poskládán z vícero pruhů o různých úrovních šedi. Na obrázku 2.21 je příklad se třemi možnými úrovněmi černou, šedou a bílou. Proces porovnávání vzorů začíná korelací získané intenzity obrazu s promítaným vzorem. Jakmile je nalezena shoda, provede se další hledání na podúrovni šedého vzoru, například třípísmenných sekvencí WGB (white, gray, black), GWB atd. [20] [22]



Obrázek 2.21 Aktivní triangulace s indexací pruhů úrovní šedi [20]

Posledním příkladem indexace pruhů je indexace pomocí posloupnosti de Bruijn. Tato posloupnost je matematickým pojmem. Z abecedy o  $k$  prvcích se vytváří slova o  $n$  prvcích. Vzniká posloupnost slov, kde každé je jedinečné. Příkladem může být abeceda o prvcích 0 a 1, tedy  $k = 2$ . Pokud je zvoleno  $n = 3$ , je možné vytvořit  $2^3 = 8$  slov (000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111). Takto vznikne posloupnost de Bruijn. Tohoto principu se pak využívá k zakódování informace pomocí RGB barev. Příklad vzoru s takto zakódovanými indexy pruhů pro  $k = 5$  a  $n = 3$  je na obrázku 2.22. [20] [23]

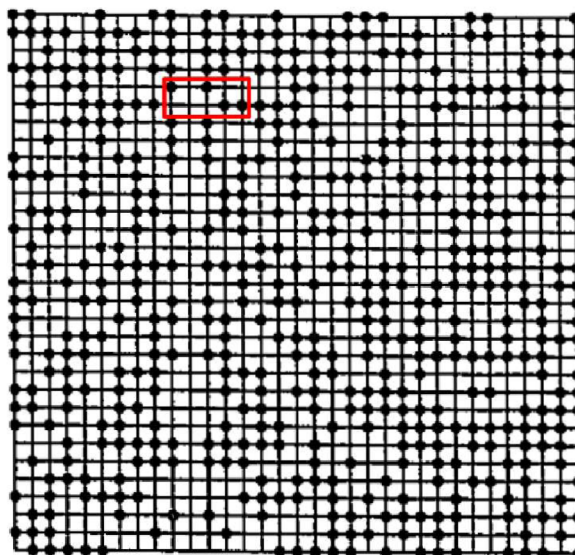


Obrázek 2.22 Aktivní triangulace s indexací pomocí posloupnosti de Bruijn [20]

### 2.3.3 Techniky s 2D kódovacími schémata (indexování mřížky)

Techniky s 2D kódovacími schémata indexují každou podoblast vzoru tak, aby byla jedinečná a zpětně identifikovatelná. Indexace je tak složitější než u 1D kódovacích schémat.

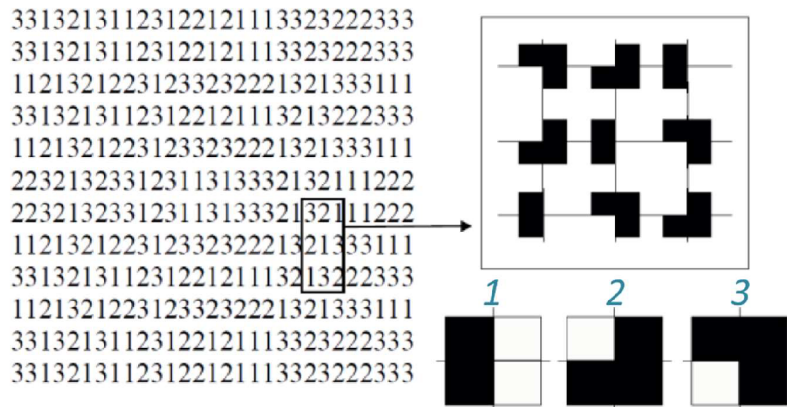
Příkladem je technika, vytvářející vzor pomocí pseudonáhodných binárních matic, pro vytvoření mřížky lokací, které mohou být označeny například tečkou. Pointou výsledného vzoru je, aby jakákoliv podoblast předem daných rozměrů byla jedinečnou. Příklad takto vytvořeného vzoru a podoblasti je na obrázku 2.23.



Obrázek 2.23 Aktivní triangulace s indexací pomocí pseudonáhodných binárních matic [20]

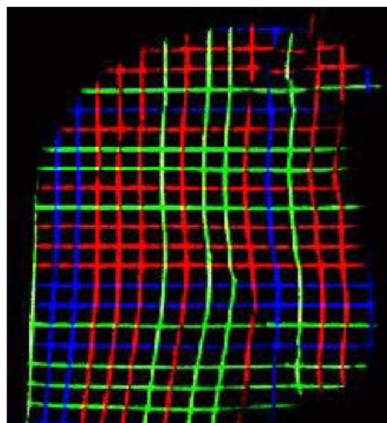
Podobným přístupem je vytvářet pseudonáhodné podoblasti se zakódovanými hodnotami, jak je vidět na obrázku 2.24. Každému číslu je přiřazen určitý tvar a každá podoblast se skládá z několika těchto tvarů. Jejich kombinace je zvolena tak, aby opět každá podoblast promítaného vzoru byla jedinečná a identifikovatelná.





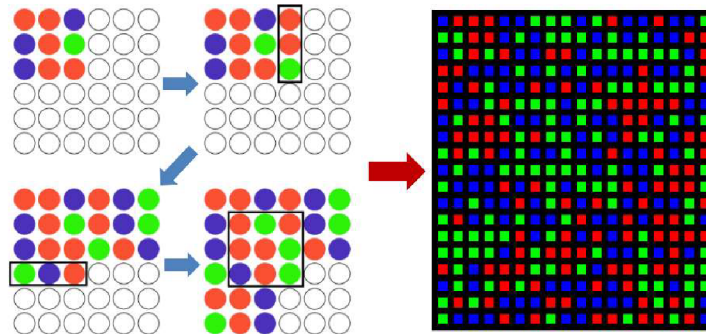
Obrázek 2.24 Příklad vytváření pseudonáhodných zakódovaných podoblastí [20]

Odlišným přístupem je barevné kódování mřížky. Zvolený barevný vzor, pro zakódování indexace, může nebo taky nemusí být pro horizontální pruhy stejný jako pro vertikální pruhy. Příklad takové mřížky je na obrázku 2.25. Tentokrát není garantováno, že každá podoblast bude mít jedinečný vzor. Tato technika, využívající barevnou mřížku jako promítaný vzor, nemusí být tak přesná jako dvě předchozí techniky.



Obrázek 2.25 Aktivní triangulace s projekcí vzoru barevné mřížky [20]

Další technika používá jako vzor síť barevných teček. Vzor je generován algoritmem, kdy jsou barevné tečky postupně přidávány. Postup je naznačen na obrázku 2.26. Za algoritmem se neschovává žádná složitá logika. Zároveň nezaručuje unikátnost všech podoblastí.

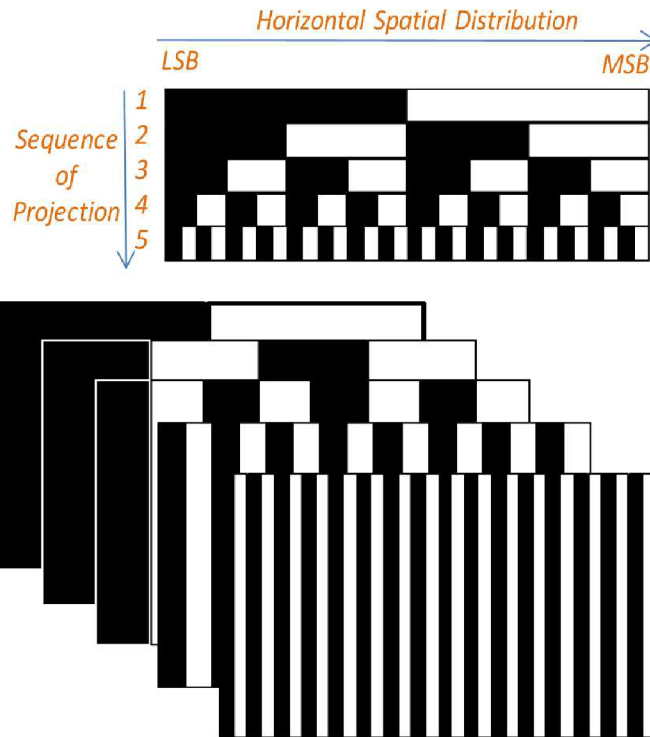


Obrázek 2.26 Aktivní triangulace s projekcí vzoru barevných teček [20]

Existuje také možnost vylepšit výsledky kombinací zmíněných technik. Může se jednat o možnost přizpůsobení dané techniky konkrétní aplikaci měřicího systému. [20]

### 2.3.4 Techniky se sekvenční projekcí

Tyto techniky promítají na objekt vícero vzorů, které se také nasnímají a z kombinace dat ze všech těchto snímků je teprve získán 3D model povrchu měřeného objektu. Jednou z technik jsou binární vzory. Jednotlivé vzory promítané na objekt jsou černobílé pruhy, přičemž postupně ve vzorech přibývá počet pruhů, jak je vidět na obrázku 2.27. Je zobrazen příklad s pěti promítanými vzory, čímž je získáno  $2^5 = 32$  unikátně indexovaných oblastí. Čím více vzorů na objekt promítneme, tím více pruhů bude v závěrečném snímku a tím větší je přesnost. Záleží však také na dalších vlastnostech měřicí soustavy, například rozlišení senzoru kamery. Nevýhodou je pak délka snímání jednoho objektu.



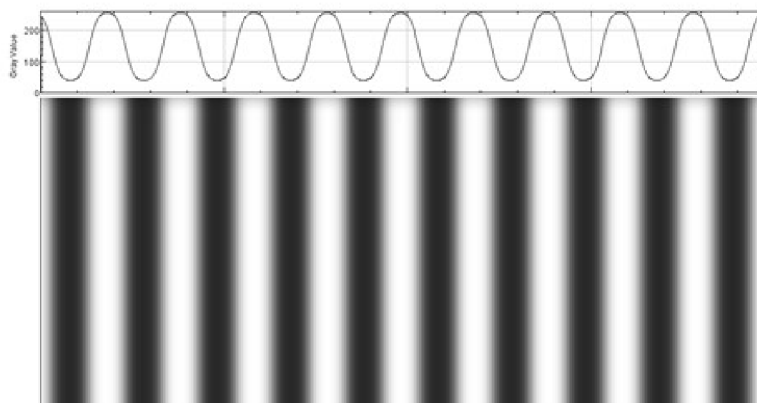
Obrázek 2.27 Aktivní triangulace s projekcí binárních vzorů [20]

Na předchozí techniku navazuje technika promítající vzor s pruhy v odstínech šedi. V předchozím případě byly pruhy pouze binární. Pokud jsou tedy přidány pruhy v odstínech šedé, je potřeba méně promítaných vzorů pro stejné rozlišení. Je-li použito  $M$  úrovní šedé a postupně je promítáno  $N$  vzorů, u kterých jsou pruhy postupně přidávány jako v předchozí technice, je získáno  $M^N$  pruhů. Například, pokud by  $N = 3$  a  $M = 4$ , je získáno  $4^3 = 64$  pruhů. Pro dosažení stejného rozlišení, tedy 64 pruhů, pomocí binárního vzoru, by bylo zapotřebí 6 vzorů oproti 3. Na obrázku 2.28 je zobrazen příklad vzorů pro  $M = 3$  a  $N = 3$ . [20]



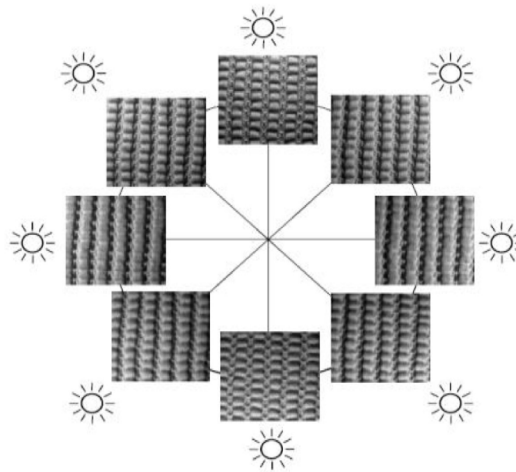
Obrázek 2.28 Aktivní triangulace s projekcí vzorů s pruhy v odstínech šedi [20]

Dalším příkladem je metoda fázového posuvu, která v základu funguje následovně. Na objekt jsou postupně promítány vzory, kde je intenzita pixelů definována sinusovou vlnou. Příklad je na obrázku 2.29. Jednotlivé obrázky promítané na měřený objekt mají mezi sebou známy fázový posuv sinusové vlny, která je definuje. Nasnímané obrázky jsou pak porovnány s referenčním obrázkem a na základě toho jsou získány hledané parametry objektu. [19]



Obrázek 2.29 Příklad vzoru aktivní triangulace metodou fázového posuvu [19]

Posledním příkladem je technika zvaná fotometrické stereo. Tato metody vyvozuje tvar povrchu měřeného objektu ze stínů. Objekt je snímán stále ze stejné pozice, ale mezi snímky se mění směr nasvícení objektu. Technika vyžaduje, aby všechny tyto zdroje světla byly bodového charakteru. Také vyžaduje aby ve snímky byl referenční bod o známých souřadnicích. Způsob nasvícení pro tuto techniku a vliv směru nasvícení na výsledný snímek na obrázku 2.30. [20]



Obrázek 2.30 Způsob nasvícení a vliv směru nasvícení při technice fotometrické stereo [20]

## 3. PRAKTICKÁ ČÁST

### 3.1 Návrh měřicího systému

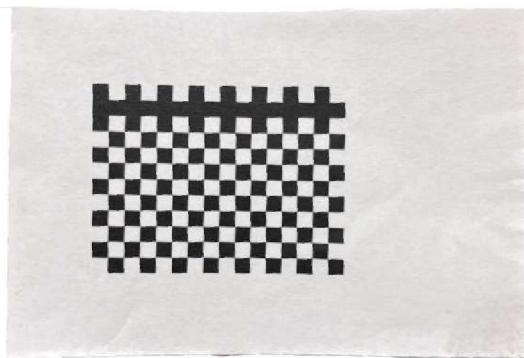
Návrh měřicího systému byl do značné míry ovlivněn tím, že tato práce vychází ze skriptů diplomové práce s názvem Aktivní stereovidení [24]. Jsou tedy použity stejné kalibrační i měřicí metody, to znamená, že se měřicí systém musí v základních prvcích podobat. Jedním z hlavních rozdílů je, že práce Aktivní stereovidení [24], jak již název napovídá, využívá dvou kamer, zatímco v této práci je používána jen jedna kamera. Dalším rozdílem je používání černobílé kamery oproti dvěma barevným. V některých případech je do měřicího systému přidáno zrcadlo. Návrh byl také omezen dostupnými prostředky na ústavu automatizace a měřicí techniky, které bylo možné zapůjčit.

Celkem byly testovány čtyři varianty měření pomocí aktivní triangulace. Byly tak použity čtyři různé měřicí systémy, které ale mají některé společné prvky. Jako první byly testovány varianty měřicího systému se zakomponovaným zrcadlem a to ve třech variantách. V první bylo zrcadlo součástí platformy, takže při kalibraci se také pohybovalo s platformou. V druhé se již nepohybovalo s platformou a zůstávalo v konstantní poloze. A ve třetí bylo zrcadlo také v konstantní poloze, ale došlo ke změně polohy kamery, aby nebylo nutné přestřovat. Dále pak byl testován měřicí systém využívající telecentrický objektiv.

Při všech měřeních byla použita kamera, která má označení Imaging Source DKM 37BUX178. Má senzor o velikosti 1/1,8 palce a rozlišení 3072x2048. Velké rozlišení je s výhodou využíváno, jak při kalibraci, tak při měření, protože snímek je při některých měřeních rozdělen na dvě části a tyto části jsou následně zvlášť zpracovávány.

Společným prvkem pro všechny testované měřicí systémy je také liniový laser, který je umístěn tak, aby svítil kolmo na plochu platformy, na kterou jsou umístěny měřené předměty nebo kalibrační prvky. Laser vyzařuje laserový proužek, který je zásadní pro měření pomocí aktivní triangulace, jak bylo vysvětleno v kapitole 2.

Ke kalibraci, jako kalibrační vzor, je ve všech variantách použita šachovnice s tím, že jeden celý řádek je začerněný. Důvodem je, že při kalibraci se laserový proužek promítá právě na tento začerněný řádek a jas nasvíceného proužku je rovnoměrný. Pokud by zůstal řádek střídavě černý a bílý, vznikl by problém, kdy černá a bílá odráží a pohlcuje světlo v rozdílné míře. Takže pro bílou část by byla ideálně potřeba tmavší expozice a pro černou světlejší. Tato upravená šachovnice je na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1 Upravený šachovnicový vzor pro kalibraci

### 3.1.1 Varianta s umístěním zrcadla na platformě

Na kameru je nasazen objektiv T0412FICS od značky Computar. Ohnisková vzdálenost objektivu je 4 mm. Poskytuje tak široký záběr, do kterého se vejde, jak měřený objekt, tak jeho odraz v zrcadle, ovšem za cenu většího zkreslení snímané scény.

Ve školní laboratoři bylo možné dále využívat platformu s krokovým motorem od firmy Standa. Primárně však bylo pro možnost měření v domácích podmínkách vytvořena alternativní platforma s možností přesného posuvu. Jedná se o dřevěnou platformu připevněnou na místo tiskové hlavy 3D tiskárny, která je z principu schopna přesného posuvu v z souřadnici, tedy měnit výšku platformy. 3D tiskárna má označení Ender-3 S1 Pro od firmy Creality. Tiskárna disponuje možností demontovat tiskovou hlavu a místo ní připevnit modul s laserem pro gravírování. Bylo tak možné připevnit vyrobenou dřevěnou platformu.

Dále je k platformě připevněno zrcadlo, které je umístěno naproti kameře. Pozice zrcadla je zvolena tak, aby na snímku kamery byla vidět plocha, na kterou je umístěn měřený předmět, tak i odraz této plochy v zrcadle. Celý měřicí systém je vyfocen na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2 Navržený měřicí systém se zrcadlem na platformě

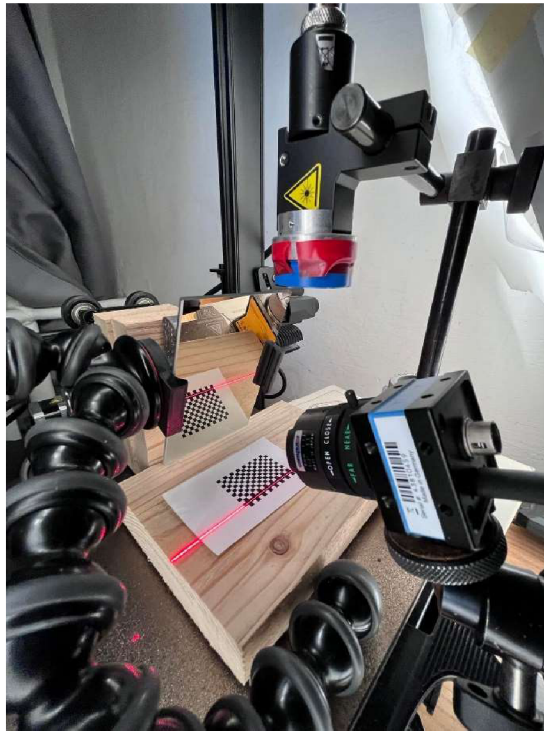
### 3.1.2 Varianta s pevnou pozicí zrcadla

Tato varianta je podobná té předchozí. Používá stejnou kameru, objektiv, laser i platformu. Také jejich umístění je zhruba stejné. Hlavním rozdílem je použití jiného zrcadla, a také jeho jiné umístění.

V této variantě je použito speciální zrcadlo, které má odraznou vrstvu napařenou na přední straně skla. Klasické zrcadlo má odraznou vrstvu na zadní straně skla, takže paprsky musí projít sklem tam i zpět. Průchod paprsků sklem pak způsobuje lom světla na přechodu prostředí. Pro eliminaci tohoto jevu při měření, je právě zvoleno zrcadlo s odraznou plochou napařenou na přední straně skla, aby k průchodu paprsků sklem nedocházelo.

Zrcadlo je umístěno na stativu nezávisle na platformě, takže i při pohybu platformy zrcadlo zůstává stále na stejném místě. Výsledný měřicí systém je zobrazen na obrázku 3.3.





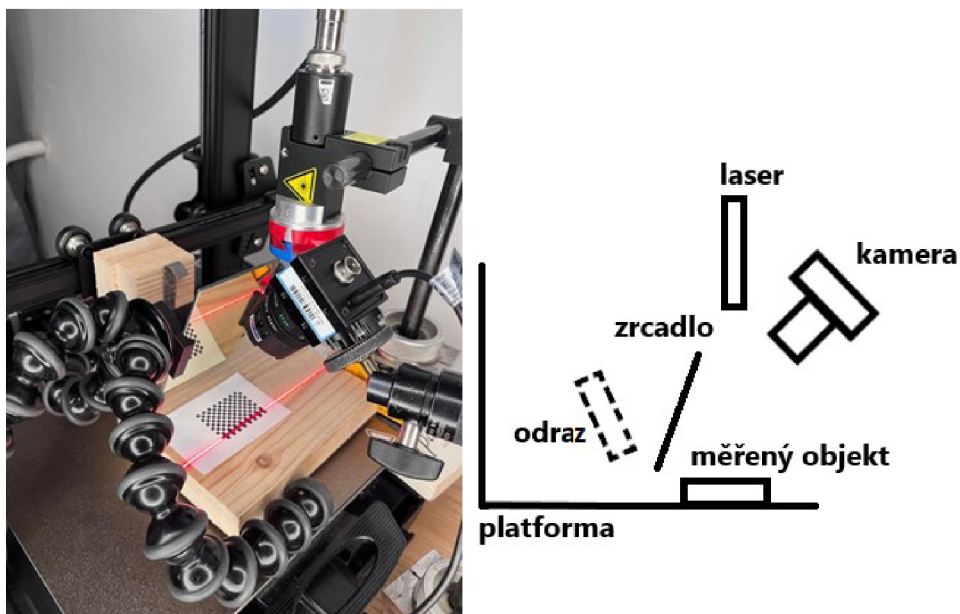
Obrázek 3.3 Navržený měřicí systém se zrcadlem na platformě

### 3.1.3 Varianta bez přeastřování

V této variantě je opět použito speciální zrcadlo, které má odraznou vrstvu napařenou na přední straně skla. Také všechny ostatní komponenty měřicí soustavy jsou totožné.

Zrcadlo je, totožně jako v předchozí variantě, umístěno v neměnné poloze na stativu, takže se nepohybuje s platformou. Zároveň musí být v dostatečné výšce, aby se platforma mohla pohybovat v určitém rozsahu pro získání dostatku kalibračních bodů. Nemůže být ani příliš vysoko, aby byly splněny požadavky na umístění kamery v kombinaci se zrcadlem, a taky aby nepřekáželo umístění laseru.

Hlavní změnou je umístění kamery. A to pod větším úhlem k platformě a také k zrcadlu. Snahou je nastavit kombinaci poloh kamery a zrcadla tak, aby snímáný objekt a také jeho odraz byly zhruba ve stejné vzdálenosti od senzoru, aby nebylo potřeba přeastřovat mezi těmito pohledy. Díky tomu není s měřicím systémem v průběhu kalibrace ani měření manipulováno a systém konzistentní. Tato kombinace poloh však nesmí bránit umístění laseru nad měřený objekt. Výsledná měřicí soustava, která byla následně pro měření použita, je zobrazena na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4 Navržený měřicí systém bez potřeby přestřování

### 3.1.4 Varianta s telecentrickým objektivem

V této variantě je na kameru nasazen telecentrický objektiv 0.16X 56675 SilverTL od Edmund optics. Telecentrické objektivy z principu jejich konstrukce eliminují některé optické vady, takže jsou často pro měřicí systémy využívány. Bohužel kombinace tohoto objektivu s používanou kamerou způsobovala jiné optické vady, které jsou popsány v kapitole 3.2.2.

Dalším prvkem měřicího systému je platforma s krokovým motorem 8MT167-100 od firmy Standa, která umožňuje mikroposuv. Platforma je v měřicím systému zamýšlená ke změně výšky kalibračního objektu, za účelem získání co největšího množství kalibračních bodů. Platforma je zobrazena na obrázku 3.5 a je vidět, že v tomto stavu ji nelze využít ke změně výšky kalibračního objektu. Proto je platforma připevněna k hliníkovému profilu ve tvaru L a ten je připevněn k magnetické podložce. Dále je k platformě připevněn plech také ve tvaru L, na který je už možné umísťovat kalibrační objekt a měřené předměty.



Obrázek 3.5 Platforma s krokovým motorem [25]

Komunikaci motoru s počítačem zajišťuje kontrolér 8SMC1-USBhF, který je také od firmy Standa, přes který je motor i napájen. Kontrolér platformy s motorem je na obrázku 3.6. Podle informací na stránkách výrobce, by měla fungovat komunikace kontroléru s počítačem, který má Windows 10, pokud má kontrolér poslední verzi firmwaru. Zároveň tato aktualizace musí být provedena ze staršího operačního systému. Na počítači s Windows 7 bylo zjištěno, že kontrolér má aktuální verzi firmwaru a přesto nekomunikuje s počítačem s Windows 10. I když jsou všechny potřebné nainstalované aplikace od výrobce aktuální. K ovládání platformy s krokovým motorem byl tak vyžit počítač s Windows 7, který byl k dispozici ve školní laboratoři.



Obrázek 3.6 Kontrolér pro platformu s krokovým motorem [25]

Jako první je nutné nainstalovat program MicroSMC od firmy Standa a následně spustit soubor Test.exe, který vypíše informace nutné pro inicializaci komunikace

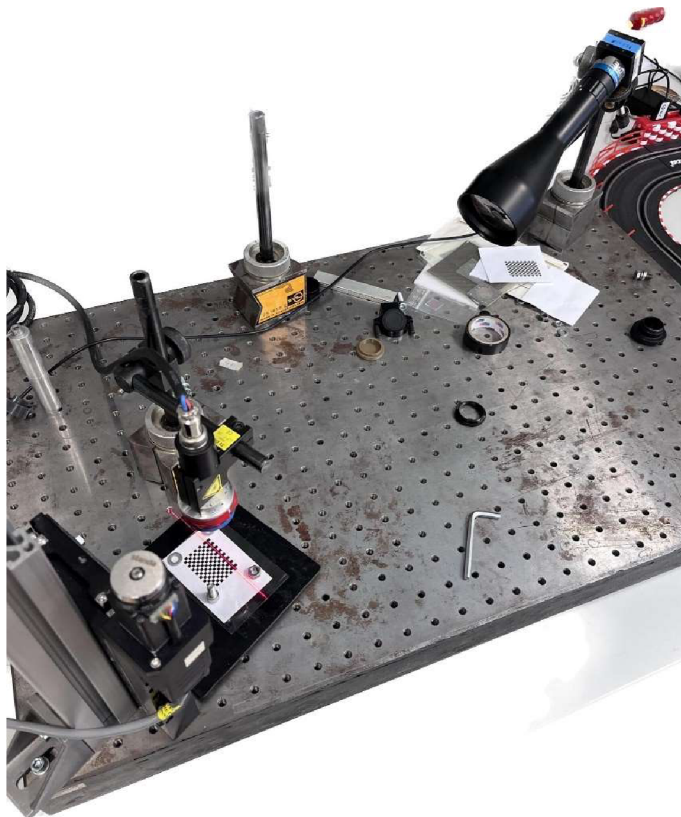
s kontrolérem, přes který je ovládán krokový motor. Jedná se o ID, sériové číslo a verzi programu.

Pro ovládání motoru lze použít nainstalovaný program MicroSMC nebo výrobce poskytuje knihovnu funkcí s názvem USMCDLL.lib v jazyce C++. Aby ji bylo možné v Matlabu využít, je potřeba nainstalovat rozšíření s názvem MinGW-w64 Compiler. Funkce z knihovny USMCDLL.lib jsou následně v prostředí Matlabu volány pomocí funkce *callib()*. Komunikaci a ovládání platformy s krokovým motorem je potřeba na počátku inicializovat. Pro tento účel slouží skript *MotorInit.m*, kde je jako první načtena knihovna USMCDLL.lib. Je zde kontrolováno jestli už knihovna nebyla načtena dříve, pokud ano, knihovna se znovu nenačítá a je pouze vypsána hláška, že inicializace už proběhla dříve. Následně jsou inicializovány potřebné parametry, včetně těch získaných souborem Test.exe, což bylo ID, sériové číslo a verze programu. Také jsou volány nejnnutnější funkce pro inicializaci.

Dále je k dispozici skript s názvem *MotorControl.m*, kde je ukázáno volání mnoha užitečných funkcí z knihovny pro ovládání platformy. Jsou zde také ukázány ošetření různých limitních stavů, aby se předešlo poškození platformy nebo krokového motoru. Příkladem je omezení krajních poloh pohybu, které jsou dané použitím platformy. To znamená vertikálním umístěním, upevněním k hliníkovému profilu a uchyceným plechem ve tvaru písmene L, na který jsou pokládány měřené předměty.

Platforma je pak využita k získání snímků kalibračního objektu v různých známých výškách, díky čemu je získáno vícero kalibračních bodů, jelikož je možné přesně nastavit o kolik se platforma posune. Pro tento účel existuje skript *AquireCalData.m*, který napřed volá funkci *MotorInit.m*, a následně si sám posouvá platformu v krocích o danou vzdálenost, pořizuje snímky kalibračního objektu a ukládá je. V mém případě však byl skript upraven, aby pouze posouval platformu a kamera byla připojena k jinému počítači, který pořizoval snímky pomocí skriptu *AquireCalibDataNoMotor.m*. To proto, že je potřeba s platformou komunikovat z počítače s Windows 7, zatímco zbytek práce byl prováděn na mém počítači s Windows 10. Zároveň se ukázalo výhodou při delších časech závěrky, že bylo možné zkontrolovat ustálení pořizovaného snímku a nedocházelo tak k pořizování nechtěných rozmazaných snímků.

Celý měřicí systém je na obrázku 3.7. V levé spodní části je platforma s krokovým motorem upevněná k hliníkovému profilu, který je připevněn k magnetické podložce. V pravém horním rohu je kamera s telecentrickým objektivem na stojanu, který je také připevněn k magnetické podložce.

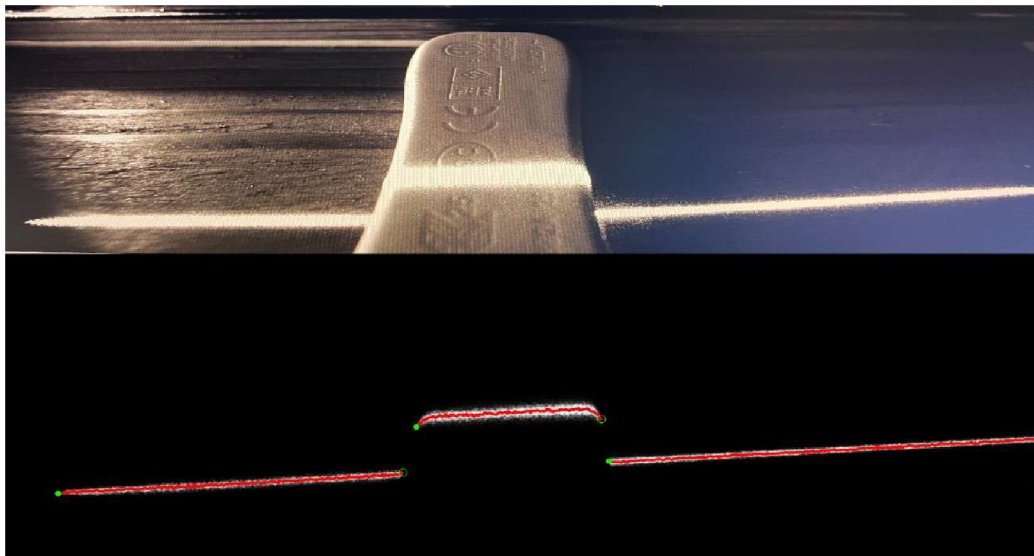


Obrázek 3.7 Navržený měřicí systém s teleobjektivem

## 3.2 Měření

### 3.2.1 Varianta s umístěním zrcadla na platformě

Většina objektivů způsobují zkreslení obrazu. Existují různé druhy zkreslení, například soudkovité či poduškovité. Nejvýrazněji se zkreslení projevuje u širokouhlých objektivů, tedy objektivů s malou ohniskovou vzdáleností. Na snímcích pořízených zvolenou měřicí soustavou pro tuto variantu, je také možné vidět důsledky zkreslení. Například na obrázku 3.8, je vidět zakřivení laserové čáry, která je reálně rovná.



Obrázek 3.8 Znáznornění zkreslení objektivu (nahore bez kalibrace, dole po kalibraci)

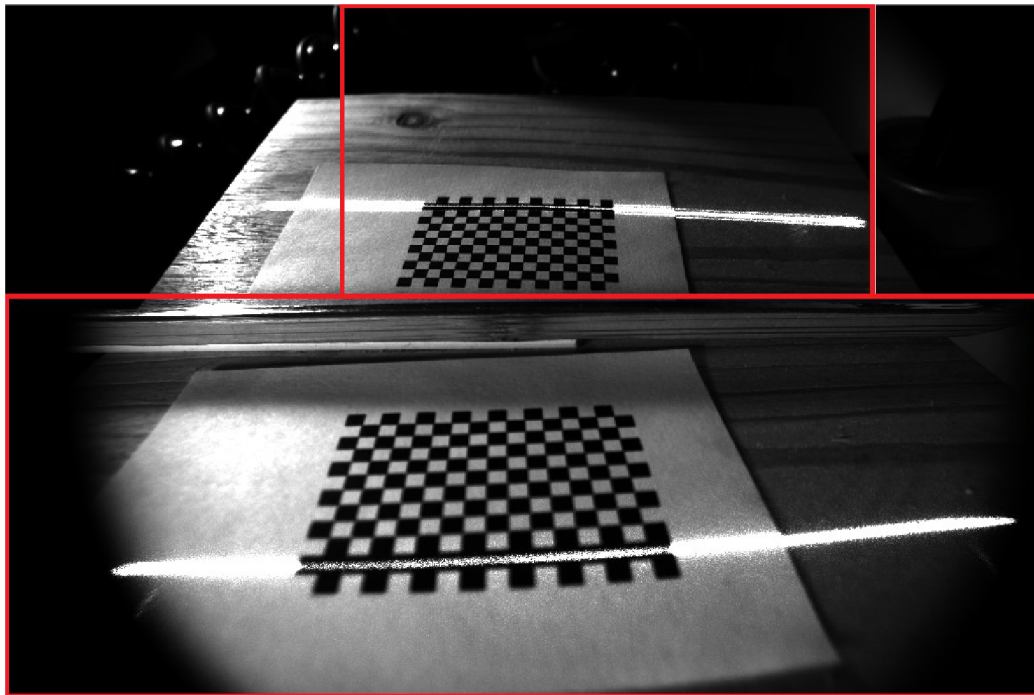
V měřicích úlohách počítačového vidění je více než vhodné zkreslení zkalibrovat. V prostředí programu Matlab je možné pro kalibraci optické soustavy použít aplikaci Camera Calibrator z Computer Vision Toolbox 10.0.

Pro kalibraci aplikací Camera Calibrator je potřeba pořídit sadu snímků s kalibrační šachovnicí v záběru. Šachovnice musí mít známé rozměry políček. Aplikace si pak v každém snímku najde rohy políček a získá tak referenční body v prostoru. Na jejich základě je pak schopna dopočítat parametry, které definují zkreslení způsobené převážně objektivem.

V této variantě, je měřicí systém navržen tak, že snímek je rozdělen na dvě části, kde spodní část je přímý pohled a horní část je odražený pohled v zrcadle. Díky zákonům optiky je odražený pohled na měřicí plochu vzdálenější než ten přímý. Důsledkem je, že je potřeba mezi těmito dvěma pohledy přeastřovat. Veškeré úkony jsou tak prováděny zvlášť pro dolní část snímku a zvlášť pro horní část snímku. Je tedy potřeba vytvořit dvě sady snímků s kalibrační šachovnicí. Jednou je zaostřena horní část snímku, podruhé spodní.

Dále je nutné snímky oříznout na velikost příslušného pohledu. Pro tyto účely byl vytvořen jednoduchý skript s názvem *imageDivider.m*, který snímky ořízne a uloží do příslušných složek cut a cutMirror. Pro přímý záběr se jedná o rozlišení 3072x1198 pixelů a pro záběr zrcadla 1501x850 pixelů. Na obrázku 3.9 je naznačen ořez snímku na příslušné záběry. Odtud jsou upravené snímky následně nahrány a použity pro kalibraci každého pohledu zvlášť. Aplikací vypočítané parametry jsou uloženy jako

*CameraParams.mat* a *CameraParamsMirror.mat*, aby mohly být později použity pro vytvoření nezkráceného snímku. Pro možnost náhledu průběhu kalibrace jsou uloženy i postupy, které lze v aplikaci načíst. Jedná se o *calibrationSession.mat* a *calibrationSessionMirror.mat*.



Obrázek 3.9 Příklad ořezu snímku na příslušné záběry

Pro kalibraci měřicího systému je využíváno skriptů z diplomové práce Aktivní stereovidění [24]. Stejně tak následně pro měření. Kalibrace probíhá metodou lineárních rovnic, jež byla rozebrána v kapitole 2.1. Pro kalibraci je zapotřebí pořídit deset snímků se speciálně upraveným kalibračním šachovnicovým vzorem. K šachovnicovému vzoru je přidána jedna linie jen černých políček. Laserový paprsek je nasměrován na tuto linii a úprava vzoru pomůže k rovnoměrnějšímu jasu laserového proužku.

Zmínovaných deset snímků je potřeba pořídit v různých výškách, které však musí být v přesně známých vzdálenostech od sebe. Účelem je získat více známých referenčních bodů v reálném prostoru. Tento přesný pohyb zajišťuje v laboratorních podmínkách školy platforma s krokovým motorem od firmy Standa. V práci Aktivní stereovidění [24] je pro pořízení snímků tímto způsobem za pomoci platformy vytvořen

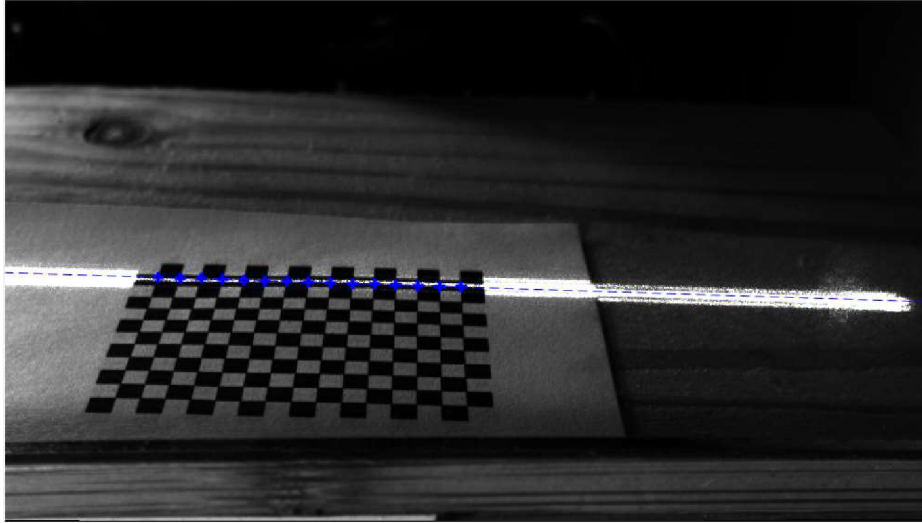
skript s názvem *AquireCalibData.m*. Skript řeší ovládání platformy a pořizování snímků, po jeho spuštění je proces plně automatický. Ve skriptu bylo nutné pouze upravit parametry pro navázání spojení s kamerou.

Jak již bylo popsáno, pro měření v domácích podmínkách byla použita platforma připevněná místo tiskové hlavy na 3D tiskárně. Pro pořízení sady kalibračních snímků s tímto měřicím systémem byl vytvořen skript s názvem *AquireCalibDataNoMotor.m*. Pro získání sady snímků tímto skriptem, je potřeba v rozhraní tiskárny nastavit požadovanou výšku platformy a pro každý snímek zvlášť spustit tento skript. Protože je nutné vyfotit opět dvě sady snímků pro horní a dolní pohled, je jen potřeba v záhlaví skriptu zvolit, o který pohled se jedná. Na základě této informace je snímek správně pojmenován a uložen do správné složky.

Pro samotnou kalibraci je zde skript *ATCalibration.m*. V tomto skriptu je nutné opět nastavit, který pohled bude zpracováván. Je také třeba vyplnit parametry pro odvození reálných souřadnic. V tomto případě má šachovnicový vzor 16 políček v řadě o velikosti 2,5 mm, takže bude v řadě 15 kalibračních bodů. To znamená, že *numberOfPoint* bude 15 a *xReal* je vektor od 0 do 35 po 2,5. *zReal* bude vektor od 0 do 9 po 1, protože je pořízeno 10 snímků v různých výškách.

Skript si následně načte správný snímek, ořízne jej na příslušný pohled a opraví zkreslení způsobené objektivem. Poté je ve snímku nalezen laserový proužek pomocí funkce *LaserLineFitting*. Zde bylo potřeba změnit funkci, aby si nepomáhala při hledání laserového proužku červenou barvou. Tato možnost není s černobílou kamerou možná. Laserový proužek je primárně nalezen metodou těžiště a následně proložen pomocí Curve Fitting toolboxu přímkou, případně parabolou. Dále funkce *CalibrationPoints.m* najde rohy na šachovnicovém vzoru, rozdělí body na jednotlivé sloupce a proloží jimi vertikální přímkou. Nakonec vypočítá průnik těchto přímek s nasvíceným laserovým proužkem, respektive proloženou přímkou tímto proužkem. To vše pro každý snímek ze sekvence. Na obrázku 3.10 jsou vidět nalezené kalibrační body.





Obrázek 3.10 Nalezené kalibrační body v kalibračním vzoru

Následně jsou nalezené naměřené hodnoty převedeny z pixelů na milimetry a jsou dopočítány jejich vzdálenosti. Potřebné parametry jsou pak získány metodou váhových nejmenších čtverců. Na počátku skriptu je možné nastavit, kolikrát proběhne tento výpočet. Při aktuálním nastavení proběhne výpočet dvakrát, kdy po prvním běhu jsou smazány kalibrační body vzdálenější než je nastavený práh.

Kalibrace probíhá na základě metody nejmenších čtverců, kdy se hledá vektor  $X$ , minimalizující podmínku  $\|Ax-b\|$ . Jelikož matice  $A$  není čtvercová, je nutné použít pseudo-inverzi matice  $A$

$$\begin{aligned} Ax &= b \\ (A^T A)x &= A^T b \\ x &= (A^T A)^{-1} A^T b. \end{aligned} \tag{3.1}$$

V matici  $A$  jsou souřadnice pixelů v souřadnicovém systému obrazu a vektor  $b$  obsahuje prostorové souřadnice bodů. V tomto případě má transformační matice rozměr  $3 \times 3$ , protože souřadnice v ose  $y$  je nulová.

$$\begin{bmatrix} \omega X \\ \omega Z \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \\ t_{41} & t_{42} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

Matice  $A$  má pak tvar

$$\begin{bmatrix} u_1 & v_1 & 1 & 0 & 0 & -u_1x_1 & -v_1x_1 \\ 0 & 0 & 0 & u_1 & v_1 & -u_1z_1 & -v_1z_1 \\ u_2 & v_2 & 1 & 0 & 0 & -u_2x_2 & -v_2x_2 \\ 0 & 0 & 0 & u_2 & v_2 & -u_2z_2 & -v_2z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_n & v_n & 1 & 0 & 0 & -u_nx_n & -v_nx_n \\ 0 & 0 & 0 & u_n & v_n & -u_nz_n & -v_nz_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{11} \\ t_{12} \\ t_{13} \\ t_{21} \\ t_{22} \\ t_{23} \\ t_{31} \\ t_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ z_1 \\ x_2 \\ z_2 \\ \vdots \\ x_n \\ z_n \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Výpočet může probíhat i iterativně, kdy jsou mezi jednotlivými kroky smazány ty kalibrační body, které jsou od skutečné pozice vzdálenější, než je nastavený práh. Výsledek kalibrace je nakonec uložen do transformační matice  $T1$  případně  $T2$ .

Pro měření je určen skript s názvem *Measure.m*. Na počátku je nutné opět nastavit, o který pohled se jedná, protože i měření je prováděno pro každý pohled zvlášť. Dále je potřeba nastavit, který algoritmus bude použit pro extrakci laserové čáry. Po sadě pokusných měření byla zvolena jako nejspolehlivější metoda těžiště, proto je primárně nastavena. Je také potřeba vybrat cestu ke správnému snímku. Snímky pro přímý pohled, tedy spodní část záběru kamery, jsou ve složce *Camera1Picture* a snímky pro odražený pohled, tedy horní část záběru kamery, jsou ve složce *Camera2Picture*.

Ve skriptu se nejprve načte snímek z příslušné složky podle zvoleného pohledu a pro tento pohled si ho skript i ořízne. Následně je na snímku opraveno zkreslení. Dále již pokračují jednotlivé algoritmy pro extrakci laserové čáry.

Primárně je používána metoda těžiště, pro kterou je potřeba nejprve snímek lehce rozmazat. Poté je volána funkce *LineExtractor2.m*, která pomocí metody těžiště hledá ve snímku laserový proužek. Nevýhodou metody je, že prohledává snímek po sloupcích. Důsledkem je, že scéna snímána kamerou musí být zvolena tak, že laserový proužek protne každý sloupec jen jednou.

Následně je pomocí funkce *separateLaseLine.m*, na základě nastavených prahů, laserová čára rozdělena na segmenty. Pokud je vzdálenost dvou segmentů pod nastavený práh, dojde naopak ke spojení segmentů.

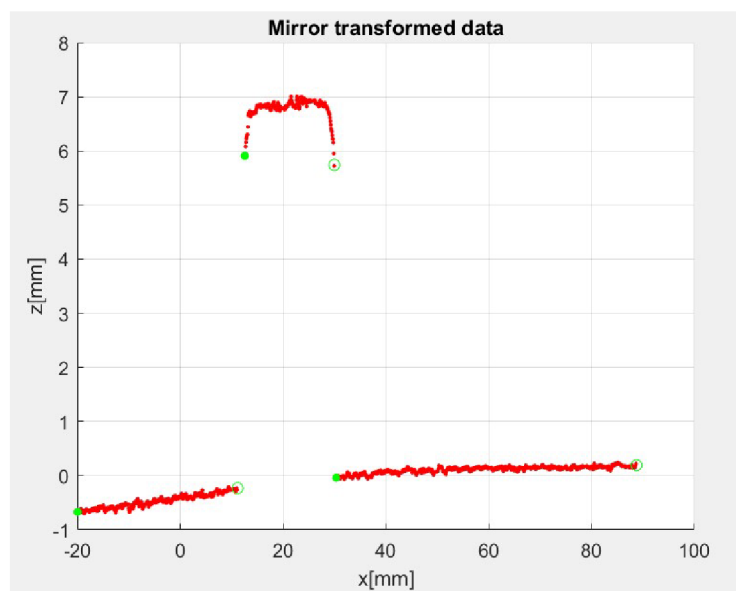
Nakonec už jen funkce *transformLaserData.m* převede pomocí transformační matice, získané kalibrací, pixelové souřadnice na reálné souřadnice.

Jako příklad pro měřený objekt je použit část plastového vypínače, který je částečně vidět na obrázku 3.8, o reálné výšce 7,8 mm. Skript pro měření je potřeba spustit pro každý pohled zvlášť. Výsledky tohoto příkladu měření jsou na obrázku 3.11 a 3.12.

Obrázek 3.11 zobrazuje výsledky pro přímý pohled kamery. Z grafu lze vyčíst, že změřená výška měřeného objektu se pohybuje okolo 7,11 mm. Odchýlení od reálné výšky je tedy 0,69 mm. Obrázek 3.12 pak zobrazuje výsledky pro pohled na odraz a výsledná měřená výška se v grafu pohybuje okolo průměru 6,78 mm a rozdíl oproti reálné hodnotě je 1,02 mm.



Obrázek 3.11 Výsledek měření pro přímý pohled



Obrázek 3.12 Výsledek měření pro pohled na odraz

Pro odchýlení měřených dat od reálných dat existuje několik možných důvodů. Výsledný graf měření pro přímý pohled by mohl naznačovat nepřesnou kalibraci. Je vidět, že naměřené hodnoty mimo měřený objekt jsou v plném rozsahu pod nulovou hodnotou. Domyslíme-li si průměrnou hodnotu v místě měřeného objektu, kdyby zde objekt nebyl, a rozdíl této hodnoty oproti nule přičetli k naměřené výšce objektu, získáme výsledek bližší reálné hodnotě.

Nepřesnost kalibrace mohla být způsobena například nepřesným kalibračním vzorem. Šachovnicový vzor je vytištěn na klasický papír, který nedrží trvale původní tvar, papír se může zvlnit. Část vzoru tak nemusela být vždy ve stejné výšce.

Dalším důvodem odchýlení od reálné hodnoty výšky může být použití výřezů z pořízeného snímku scény. Je tak získáno horší rozlišení.

Měřený objekt je navíc v odraženém pohledu vzdálenější, a tedy menší. Rozlišení pro tento pohled je tak ještě menší a přesnost měření horší. Tento pohled je tak vhodný hlavně pro doplnění oblastí, které nejsou v přímém pohledu vidět.

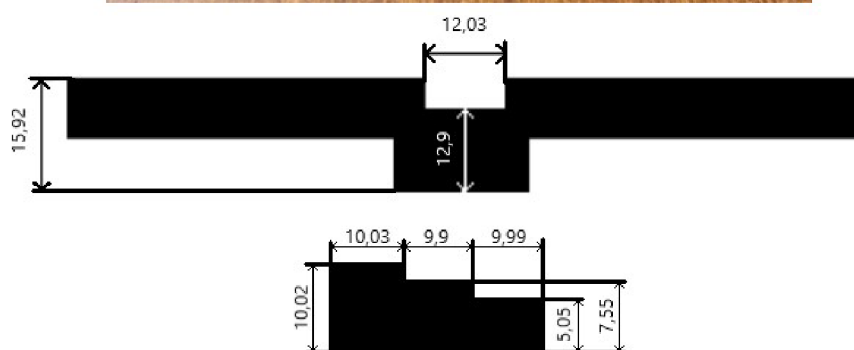
### 3.2.2 Varianta s pevnou pozicí zrcadla

V této variantě už probíhá kalibrace optické soustavy najednou pro celý snímek. Předpokladem je, že zrcadlo použité v této měřicí soustavě nebude působit další optické vady. Proces kalibrace a měření se tak stává snazším.

Pro kalibraci jsou snímky pořízeny pomocí skriptu *AquireCalibDataNoMotor.m*. je pořízeno patnáct snímků pro přímý záběr a patnáct pro záběr zrcadla. Kalibrace opět probíhá ve skriptu *ATCalibration.m*, kde je potřeba vybrat, o který ze dvou možných záběrů se jedná. Podle toho jsou načteny snímky ze správné složky, zbaveny zkreslení optické soustavy a oříznuty na příslušný záběr. Pro přímý záběr je rozlišení 1267x1075 pixelů a pro záběr zrcadla 1234x888 pixelů.

Dále je ve skriptu nastaven práh pro výběr kalibračních bodů na 0,06 mm. Body vzdálenější od skutečné polohy, než je tento práh, nejsou použité pro kalibraci. Pro přímý záběr je použito 93% ze všech možných bodů a pro záběr zrcadla je použito při kalibraci také 93% bodů. Výsledná kalibrační matice je na konci uložena buď pro přímý záběr jako *T1*, a nebo pro záběr zrcadla jako *T2*.

Pro otestování měření byly zvoleny objekty na obrázku 3.13. Na pravé straně se nachází model, který byl vytvořen pro tento účel a vytisknut na 3D tiskárně. Jde o plastový objekt o třech úrovních výšky. Původní model měl výšky 10 mm, 7,5 mm a 5 mm. Po vytištění jsou však skutečné hodnoty 10,02 mm, 7,55 mm a 5,05 mm. Šířky schodů jsou pak po 10 mm. Druhý objekt, na levé straně snímku, je kovový a má dvě výškové úrovně s tím, že nižší úroveň rozděluje vyšší úroveň v polovině. Dále jsou na obou koncích otvory. Výška vyšší úrovně je 15,92 mm a nižší 12,9 mm. Šířka nižší úrovně je 12,03 mm.



Obrázek 3.13 Objekty pro test měření

Měření pak probíhá ve skriptu *Measure.m*, kde je opět potřeba vybrat jeden ze záběrů. Snímek je pak načten ze správné složky, zbaven zkreslení optické soustavy a oříznut na příslušný záběr. Dále je možné zvolit algoritmus pro hledání laserového proužku ve snímku. Zachovány zůstaly jen funkční algoritmy. Jedná se o metodu těžiště, metoda klouzavých nejmenších čtverců a metoda lokálního maxima. Pro prezentované výsledky je použita metoda těžiště.

Měřením schodovitého plastového objektu v přímém záběru byla získána výška nejvyšší úrovně 9,83 mm, výška střední úrovně 7,4 mm a výška nejnižší úrovně 4,98 mm. Největší rozdíl oproti skutečné hodnotě je 0,19 mm u nejvyšší úrovně. Graf z tohoto měření je možné vidět na obrázku 3.14. Ze záběru zrcadla byla získána výška nejvyšší úrovně 9,81 mm, výška střední úrovně 7,4 mm a výška nejnižší úrovně 4,97 mm. Největší rozdíl je opět pro nejvyšší úroveň, a to o 0,21 mm. Graf tohoto měření je na obrázku 3.15.



Obrázek 3.14 Výsledek měření variantou s pevnou pozicí zrcadla se schodovitým objektem pro přímý záběr



Obrázek 3.15 Výsledek měření variantou s pevnou pozicí zrcadla se schodovitým objektem pro záběr zrcadla

Měřením kovového objektu z přímého záběru byla získána výška první části vyšší úrovně 15,5 mm, výška nižší úrovně v prostřední části 12,56 mm a výška druhé části vyšší úrovně 15,63 mm. Největší rozdíl oproti skutečné hodnotě je pro první část vyšší úrovně, a to o 0,42 mm. Výsledky tohoto měření jsou zobrazeny na obrázku 3.16. Ze záběru zrcadla byla naměřena výška první části vyšší úrovně 15,54 mm, výška střední nižší úrovně 12,55 mm a druhá část vyšší úrovně 15,65 mm. Největší rozdíl je o 0,37 mm, opět pro první část vyšší úrovně. Graf z tohoto měření je na obrázku 3.17.



Obrázek 3.16 Výsledek měření variantou s pevnou pozicí zrcadla s kovovým objektem pro přímý záběr



Obrázek 3.17 Výsledek měření variantou s pevnou pozicí zrcadla s kovovým objektem pro záběr zrcadla

Hlavní nevýhodou této varianty je jako v předchozím případě potřeba přeastřovat mezi dvěma záběry. Nejen, že se pravděpodobně nepodaří vždy přeastřit přesně jako v předchozích krocích, ale je také potřeba při každém přeastřování dotýkat se kamery. Hrozí tak pohyb kamery v průběhu kalibrace či měření.

### 3.2.1 Varianta bez přeastřování

Tato varianta má řešit problémy variant, u kterých je potřeba přeastřovat mezi přímým záběrem objektu a záběrem zrcadla s odrazem objektu. Tohoto efektu je docíleno změnou umístění kamery a zrcadla, jak už bylo popsáno v kapitole o návrhu měřicího systému.

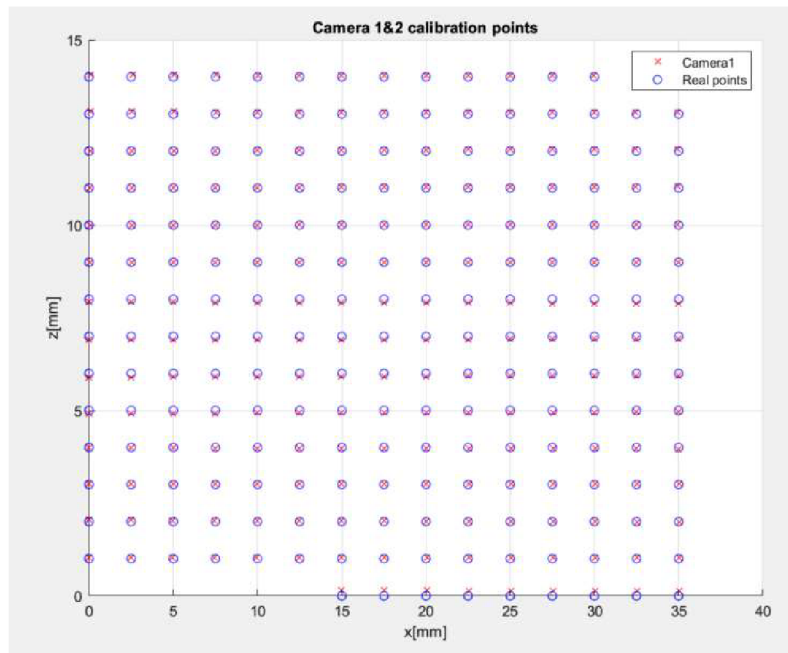
Pro kalibraci je pořízeno patnáct snímků s rozdílem jednoho milimetru v  $z$  souřadnici. Snímky jsou pořizovány pomocí skriptu *AquireCalibDataNoMotor.m*, přičemž platformou je pohybováno mezi snímky v rozhraní 3D tiskárny.

Kalibrace pak opět probíhá pomocí skriptu *ATCalibration.m*, kde se musí na začátku vybrat, zda je prováděna kalibrace přímého záběru nebo záběru zrcadla. Snímky jsou pak postupně načítány, zbaveny vad optické soustavy a oříznuty na příslušný pohled. Výsledné rozlišení přímého záběru je 1263x1071 pixelů a pro záběr zrcadla 1263x978 pixelů.

Práh pro výběr kalibračních bodů je nastaven na 0,15 mm, takže kalibrační body nalezené ve větší vzdálenosti od skutečné polohy než je tento práh jsou zamítnuty jako kalibrační body a pro kalibraci nejsou použity. Na obrázku 3.18 jsou vidět všechny použité kalibrační body pro přímý záběr označené křížky a jejich reálné pozice jsou



označeny kolečky. Pro přímý pohled je použito 97% všech kalibračních bodů. Pro záběr zrcadla je použito 78% všech možných kalibračních bodů.



Obrázek 3.18 Použité kalibrační body (x) a jejich reálná pozice (o) pro variantu bez přeastřování

Měření opět probíhá pomocí skriptu *Measure.m* a opět je potřeba vybrat, zda má být měření provedeno pro přímý záběr nebo záběr zrcadla. Dále je potřeba vybrat algoritmus pro extrakci laserového proužku. Zachovány zůstaly tři algoritmy, a to metoda těžiště, metoda klouzavých nejmenších čtverců a metoda lokálního maxima. Primárně je používána metoda těžiště. Příklad nalezené laserové čáry pomocí metody těžiště je na obrázku 3.19.



Obrázek 3.19 Příklad nalezené laserové čáry

Je také potřeba zadat cestu k snímku měřeného objektu. Ten je zbaven zkreslení optické soustavy a oříznut na příslušný záběr, stejný jako při kalibraci, příslušným algoritmem je pak nalezena laserová čára a jejím bodům jsou přiřazeny reálné souřadnice.

Pro měření byly opět použity dva testovací objekty: plastový schodovitý o třech úrovních a kovový o dvou úrovních výšky. Výsledek měření variantou bez přeastřování s plastovým schodovitým objektem pro přímý záběr je na obrázku 3.20 a pro záběr zrcadla je na obrázku 3.21. Z přímého záběru bylo naměřeno pro nejvyšší úroveň 9,95 mm, pro střední úroveň 7,32 mm a pro nejnižší 4,77 mm. Největší rozdíl oproti skutečné hodnotě je 0,28 mm pro nejnižší úroveň. Ze záběru zrcadla bylo naměřeno pro nejvyšší úroveň 10,1 mm, pro střední 7,59 mm a pro nejnižší 5,19 mm. Zde je největší rozdíl o 0,36 mm, opět pro nejnižší úroveň.

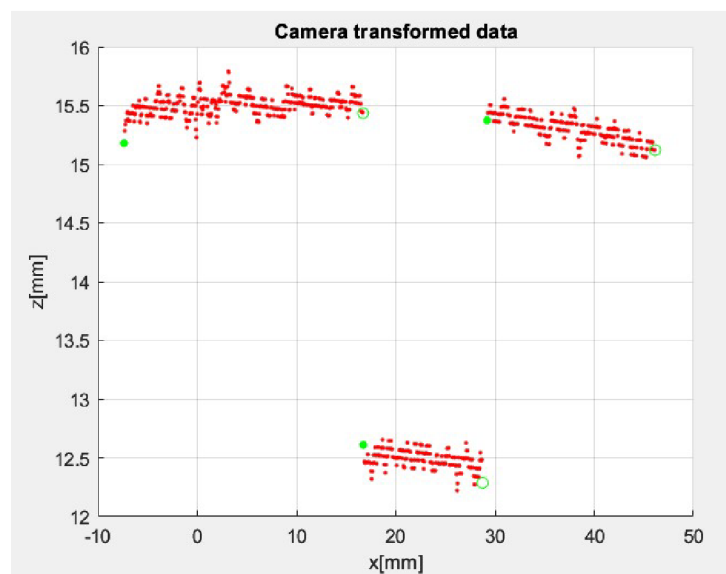


Obrázek 3.20 Výsledek měření variantou bez přeastřování s plastovým schodovitým objekt pro přímý záběr



Obrázek 3.21 Výsledek měření variantou bez přeastřování s plastovým schodovitým objekt pro záběr zrcadla

Výsledek pro kovový objekt pro přímý záběr je na obrázku 3.22 a pro záběr zrcadla na obrázku 3.23. Z přímého záběru bylo naměřeno, že levá část horní úrovně má 15,51 mm, nižší úroveň má 12,49 mm a pravá část horní úrovně má 15,3 mm. největší rozdíl je pro pravou část horní úrovně, a to 0,62 mm. Ze záběru zrcadla pak bylo naměřeno, že pravá část horní úrovně má 15,78 mm, střední nižší část má 12,75 a pravá vyšší část má 15,92 mm. Zde je největší rozdíl v nižší úrovni, a to o 0,15 mm.



Obrázek 3.22 Výsledek měření variantou bez přeostřování s kovový objekt pro přímý záběr



Obrázek 3.23 Výsledek měření variantou bez přeostřování s kovovým objektem pro záběr zrcadla

Tato varianta má hlavní nevýhodu v malé bázi měřicího systému, tedy že kamera se nachází blízko rovině laseru. Pozice kamery a zrcadla je částečně daná umístěním laseru, tedy že laser je umístěn přímo nad platformou, kterou nasvécuje laserovým proužkem, a kamera ani zrcadlo tomuto nasvícení nesmí bránit. Teoretickou možností nastavení měřicího systému je neumístit laser přímo nad platformu, ale umístit jej více na stranu a platformu by nasvécival zešikma. Kamera by pak mohla být umístěna pod menším úhlem k rovině platformy a příslušně k ní i zrcadlo, aniž by bránili v nasvícení. Tato varianta by však měla jako nevýhodu nekonzistentní nasvícení laserového proužku, protože od zdroje laseru k platformě by byl, na délce nasvíceného proužku, velký vzdálenostní rozdíl. Také by mohla vznikat místa, kde by laser nedosvítil, protože by byla schována za hranou a tyto místa by pak nebylo možné měřit.

Další možností pro vylepšení měřicí soustavy by bylo zvolení objektivu s větší ohniskovou vzdáleností. Mohl by se pak dělat menší výřez ze snímků a pro měření by bylo k dispozici větší rozlišení. Konkrétně u této varianty s malou bází by to bylo výhodou, protože díky malé bázi je mezi snímky z různých výšek malý rozdíl, takže záběr nemusí být tak velký.

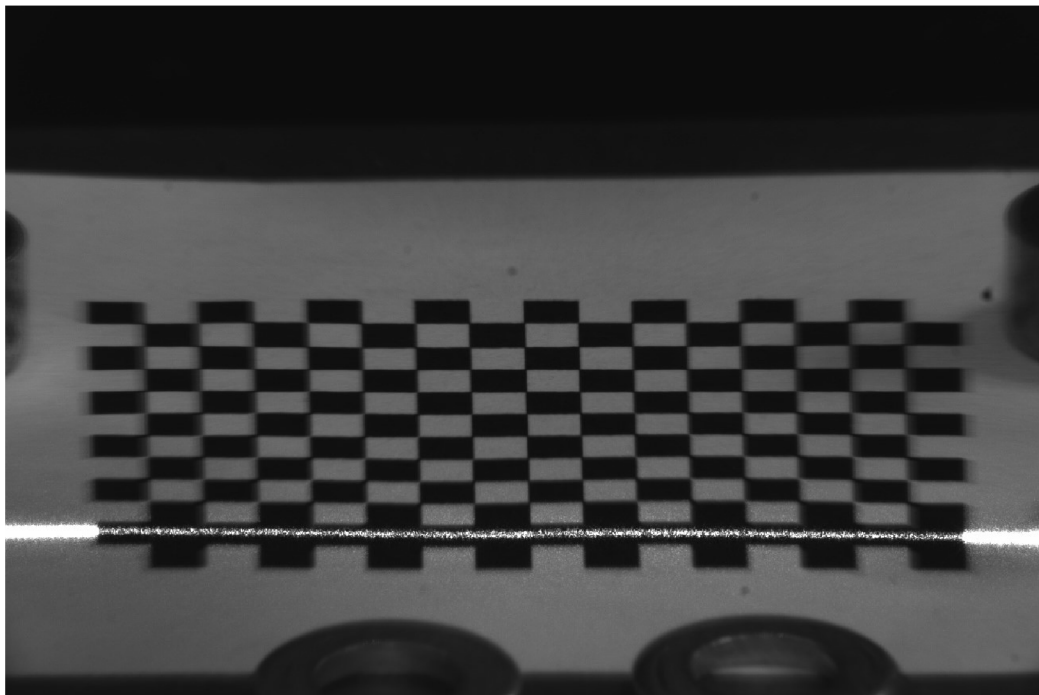
### 3.2.2 Varianta s telecentrickým objektivem

U této varianty není již nutná kalibrace optické soustavy. Jak už bylo zmíněno v kapitole o telecentrických objektivěch, svou konstrukcí mnohé vady eliminují. Navíc proces kalibrace je složitější, díky malému zornému poli objektivu, které je přibližně 4x3 cm.

V této variantě nejsou testovány možnosti využití zrcadla. Použitý telecentrický objektiv má malé zorné pole, což vychází z principu jeho konstrukce, a také malou hloubku ostrosti. Přidávat do systému zrcadlo je tak obtížným úkolem.

Součástí měřicího systému je platforma s krokovým motorem, na kterou jsou umísťovány měřené objekty a kalibrační šachovnice. Kamera s telecentrickým objektivem je napřed s plně otevřenou clonou zaostřena a až následně je přiclouženo pro dosažení co nejlepšího umístění roviny ostrosti. Přesto snímek pořízený touto optickou soustavou není zcela ostrý.

Na obrázku 3.24 je příklad pořízeného snímku touto optickou soustavou, který je následně použit pro kalibraci. Je na něm vidět, jak se hrany směrem od středu ke krajům postupně rozostřují, což dělá problémy při procesu kalibrace, konkrétně při hledání rohů šachovnice. Důvodem této vady může být nevhodná kombinace kamery a objektivu. Například, že senzor kamery je větší, než co umožňuje konstrukce objektivu. Nebo je špatná vzdálenost zadního elementu objektivu od roviny snímače kamery.



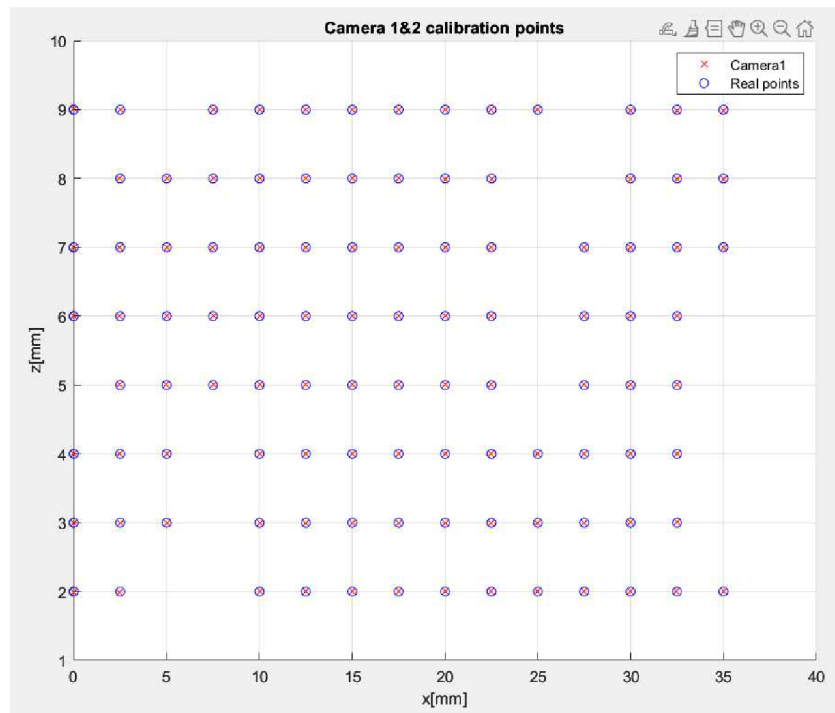
Obrázek 3.24 Příklad snímku použitého ke kalibraci

Nastavení expozice v kombinaci s okolním světlem byl také složitý úkol. Je totiž potřeba najít nastavení, kdy bude dobře vidět nasvícený laserový proužek a zároveň

dobře viditelný vzor šachovnice. Tyto dva úkoly jdou však proti sobě. Pro dobrou viditelnost světelného proužku je vhodné, mít co nejméně okolního světla, aby jim nebyl laserový proužek přesvícen. Naopak pro dobrou viditelnost šachovnice je potřeba více okolního světla. Také pokud je více okolního světla, je možné více přiclonit a mít větší vzdálenost od roviny ostrosti, kdy budou snímky stále ostré, a je také možné volit kratší čas závěrky.

Při pořizování snímků pro kalibraci je celkem pořízeno čtrnáct snímků, ve snaze pokrýt co největší oblast záběru objektivu. Kvůli výše zmíněným komplikacím však vždy na některých snímcích nebylo možné detekovat rohy šachovnice nebo laserový proužek, přestože jsou snímky doostřeny pomocí funkce *imsharpen*. Proto jsou tyto snímky eliminovány a kalibrace probíhá na zbytku snímků. Ve vzorovém příkladu, který je v příloze této práce, byly ze čtrnácti pořízených snímků smazány první dva, protože způsobovaly chybu v algoritmu kalibrace, kvůli špatné detekci šachovnice. Dále algoritmus eliminuje z kalibrace poslední tři snímky, kvůli nekompletní detekci šachovnice.

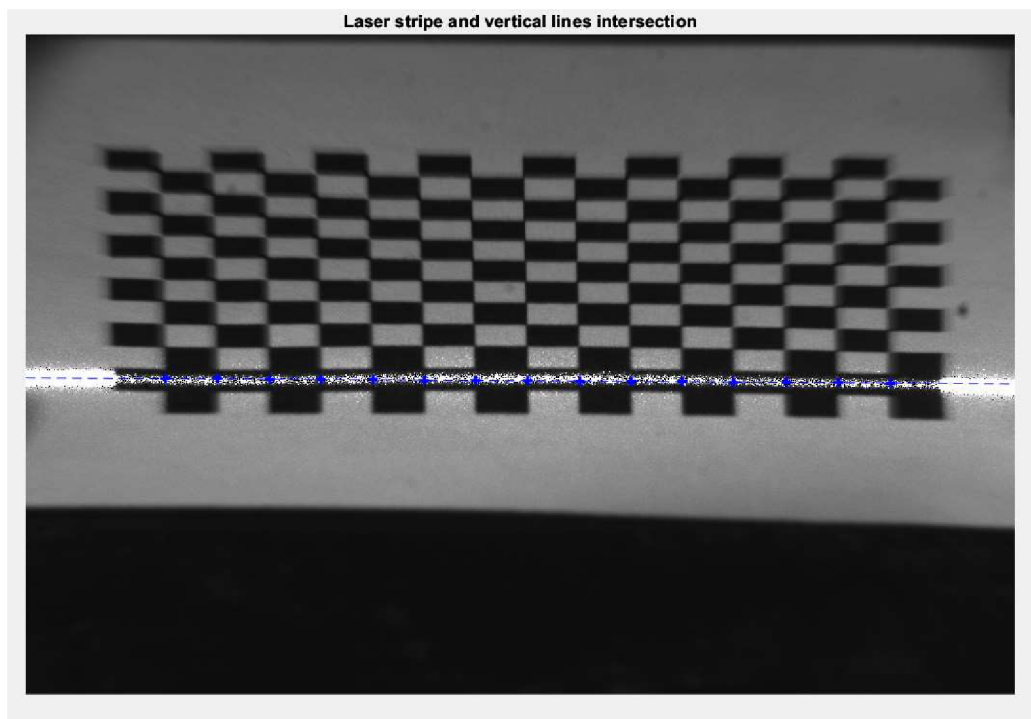
V rámci kalibrace jsou pak dále eliminovány některé body, které jsou po přepočítání do reálných souřadnic vzdálenější od reálné hodnoty než daná vzdálenost. V tomto případě se jedná o 0,03 mm. Pro kalibraci tak bylo použito 85,8 % bodů ze zbylých snímků. Eliminované body na obrázku 3.25 chybí. V rámci obrázku 3.25 jsou modrým kroužkem zobrazeny reálné očekávané hodnoty kalibračních bodů a červeným křížkem dopočítané polohy získaných kalibračních bodů po kalibraci.



Obrázek 3.25 Použité kalibrační body (x) a jejich reálná pozice (o) pro variantu s telecentrickým objektem

Kalibrace dále probíhá stejně jako v předchozích variantách. Jsou detekovány kalibrační body na kalibrační šachovnici, postupně v jednotlivých výškách. Příklad detekovaných bodů pro jeden z kalibračních snímků je zobrazen na obrázku 3.26.

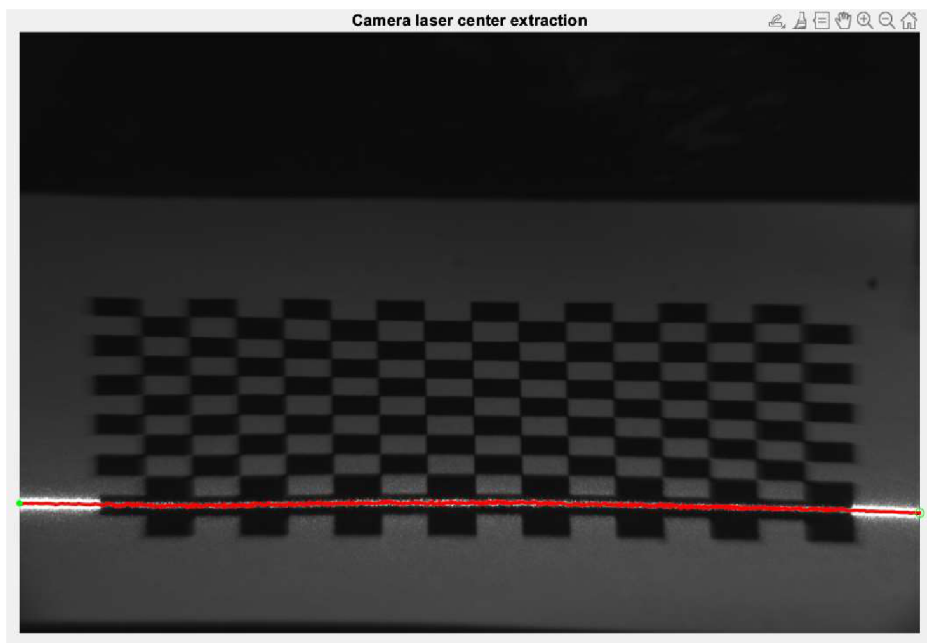




Obrázek 3.26 Příklad nalezených průsečíků

Měření probíhá standartně pomocí skriptu *Measure.m*, jen není potřeba ze snímku dělat výřez, odstraňovat zkreslení optické soustavy, a ani vybírat, zda je záběr přímý nebo záběr odrazu zrcadla, protože v této měřící soustavě není zrcadlo a ke zpracování je využíván celý snímek.

Jako první byl pořízen snímek kalibračního vzoru, aby se zjistilo, jak velkou chybu může způsobovat. Pořízený snímek je na obrázku 3.27. Na základě podobných snímků byl systém i kalibrován, takže případné nepřesnosti už jsou zavedeny do systému. Výsledek měření je na obrázku 3.28. Je na něm dobře vidět, že jsou hodnoty ve střední části vyšší. Papír s vytištěnou kalibrační šachovnicí měl po stranách, mimo záběr, závaží. Přesto se podle těchto výsledků nepodařilo mít vzor v rovině, a to při měření nebo už při kalibraci.

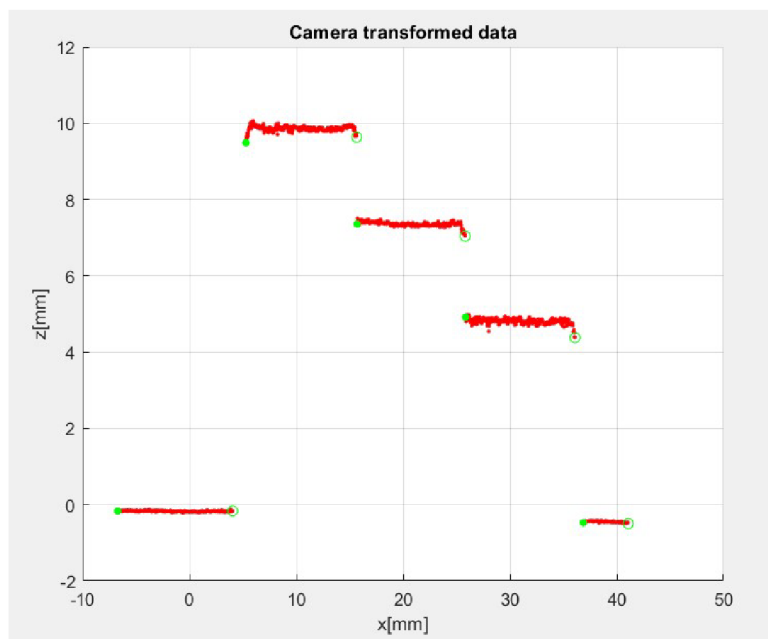


Obrázek 3.27 Snímek kalibračního vzoru pro měřicí účely

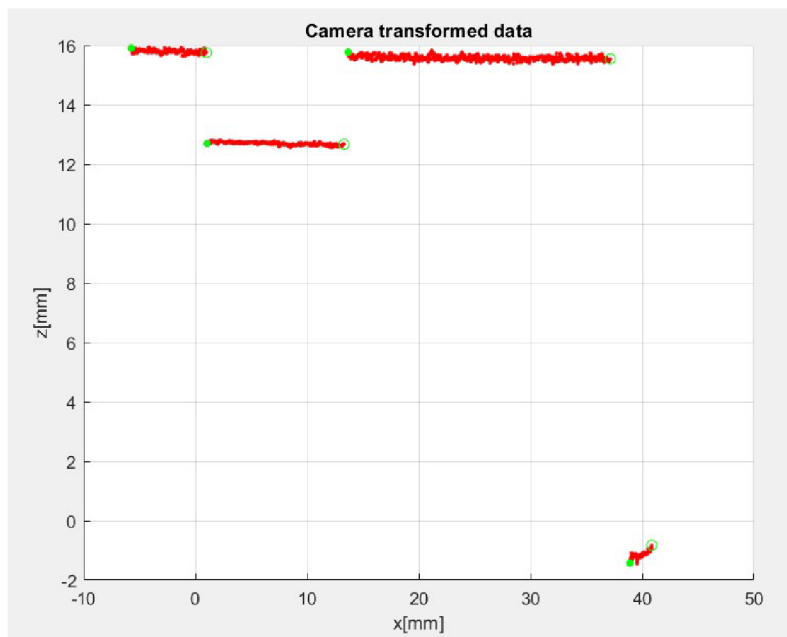


Obrázek 3.28 Výsledek měření kalibračního vzoru

Pro otestování měření byl opět zvolen plastový schodovitý objekt a kovový objekt, tak jako v předchozích variantách. Výsledky měření jsou pro schodovitý objekt na obrázku 3.29 a pro kovový objekt na obrázku 3.30. Pro schodovitý objekt bylo pro nejvyšší úroveň naměřeno 9,86 mm, pro prostřední 7,35 mm a pro nejnižší úroveň 4,8 mm. Největší rozdíl oproti skutečné hodnotě je pro nejnižší úroveň, a to o 0,25 mm. U kovového objektu bylo pro první část vyšší úrovně naměřeno 15,8 a pro druhou část 15,57 mm. Nižší úroveň byla změřena ve výšce 12,69 mm. Zde je největší rozdíl oproti skutečné hodnotě pro druhou část vyšší úrovně. Rozdíl je 0,35 mm. V grafu je vidět ještě jeden poslední úsek, úplně vpravo. Jedná se odraz paprsků procházejících otvorem v pravé části objektu.



Obrázek 3.29 Výsledky měření s teleobjektivem pro schodovitý objekt



Obrázek 3.30 Výsledky měření s teleobjektivem pro kovový objekt

## 4. ZÁVĚR

Tato práce se zabývá technikou aktivní triangulace, speciálně pak variantami se zrcadlem přidaným do měřicího systému. Otestována je také možnost využití telecentrického objektivu. Nejdříve jsou v teoretické části rozebrány různé principy optických měřicích zařízení, kam spadá i aktivní triangulace. Ta je zde rozebrána podrobněji. Následně jsou vysvětleny různé přístupy ke kalibraci měřicích systémů využívajících princip aktivní triangulace. Celkem byly testovány čtyři varianty měřicího systému využívající princip aktivní triangulace. Pro všechny varianty jsou popsány navržené měřicí soustavy. Je zde také popsáno, jakým způsobem jsou navržené měřicí systémy zkalibrovány a také, jak probíhá samotné měření. Nakonec jsou pro každou z variant prezentovány výsledky měření testovacích objektů.

Jako první byla testována varianta měřicího systému, která měla zrcadlo součástí platformy. Na základě první varianty vznikla varianta druhá. V té je použito speciální zrcadlo s napařenou odraznou vrstvou na přední části skla, takže nedochází k lomu světla při průchodu sklem. Dále je zrcadlo umístěno na stativ, to znamená, že při pořizování snímků v jednotlivých výškách pro kalibraci, zůstává zrcadlo na stejném místě. U obou těchto variant je největším problémem potřeba přeastřovat mezi přímým záběrem a záběrem na odraz v zrcadle, jelikož se díky nastavení měřicího systému nachází v různých vzdálenostech od roviny senzoru. Při přeastřování tak dochází k zásahu do měřicího systému, a také je složité přeastřit vždy na stejné místo jako v předchozích krocích.

Potřebu přeastřování řeší třetí varianta. Zde je cílem změnit umístění kamery a zrcadla tak, aby přímý záběr a záběr zrcadla byly ve stejné vzdálenosti od roviny senzoru a bylo tak možné zaostřit na oba záběry najednou. Toto eliminuje potřebu v průběhu měření zasahovat do systému a i samotný proces kalibrace a měření je o něco jednodušší. Problémem této varianty je malá báze měřicího systému na principu aktivní triangulace. Při změně výšky měřeného objektu tak dochází jen k malým změnám na snímku použitým k měření.

Výsledky naznačují, že varianty aktivní triangulace se zrcadlem v měřicím systému jsou na úkor přesnosti, protože je záběr kamery dělen na výřezy. Tyto varianty jsou tak primárně vhodné pro objekty, u kterých nejsme schopni přímým pohledem změřit celý povrch, například když struktura objektu blokuje výhled na laserový proužek z pozice kamery s objektivem. Použití zrcadla je tak levnější variantou k použití druhé kamery. Varianty se zrcadlem však budou vždy méně přesné, než použití druhé kamery.

Přesnějších výsledků by bylo možné dosáhnout vylepšením kalibrace systému, například použitím přesnějšího kalibračního objektu nebo přesnějším laserem, který nasvěcuje tenčí laserový proužek. Pomoci by také mohly jiné objektivy s větší ohniskovou vzdáleností, než je aktuálně použit.

Poslední testovanou variantou je měřicí systém s telecentrickým objektivem. Ty se často využívají v měřicích systémech, jelikož změnou vzdálenosti objektu od objektivu nedochází ke změně velikosti objektu na snímku. Tato vlastnost v tomto konkrétním měřicím systému nebyla využita. Z principu konstrukce telecentrického objektivu však také tyto objektivy nemají některé optické vady, které běžné objektivy mají. Eliminuje se tak možnost chyb, způsobených nedokonalou kalibrací optické soustavy.

Testovaný měřicí systém však měl své vlastní optické vady, které komplikovaly měření. Snímky se postupně od středu ke krajům rozostřovaly. Na testovacích objektech pak byla největší odchylka od skutečné hodnoty 0,42 mm. Limitem telecentrických objektivů je velikost zorného pole a jejich cena. Pokud jsou měřené objekty v konkrétní aplikaci menší než zorné pole objektivu, je výhodné pro měřicí účely použít telecentrické objektivy, protože eliminují některé optické vady běžných objektivů.

## LITERATURA

- [1] Interferometers. *Explain that stuff!* [online]. Chris Woodford, 2021 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/howinterferometerswork.html>
- [2] *What is an Interferometer?*. LIGO Lab [online]. California: Ligo Caltech [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.ligo.caltech.edu/page/what-is-interferometer>
- [3] Time of Flight principle. *Terabee* [online]. Saint-Genis-Pouilly: Terabee [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.terabee.com/time-of-flight-principle/>
- [4] *Time-of-flight: what you need to know about these new means of computer vision. AVSystem – Shaping The World of Connected Devices.* [online]. Kraków: AVSystem, 2021 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.avsystem.com/blog/time-of-flight/>
- [5] IKEUCHI, Katsushi, Yasuyuki MATSUSHITA, Ryusuke SAGAWA, Hiroshi KAWASAKI, Yasuhiro MUKAIGAWA, Ryo FURUKAWA a Daisuke MIYAZAKI. *Active Lighting and Its Application for Computer Vision: 40 Years of History of Active Lighting Techniques.* Springer, 2020. ISBN 978-3030565763.
- [6] ToF can be divided into iToF and dToF (direct time of flight). *DOMI* [online]. Shenzhen City: domi, 2021 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.tof-sensor.com/tof-can-be-divided-into-itof-and-dtof-direct-time-of-flight/>
- [7] DRMAX. *Computer Vision: Stereo 3D Vision.* Baeldung [online]. Bucharest: Tarnum Java SRL, 2022 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.baeldung.com/cs/stereo-vision-3d>
- [8] HATA, Kenji a Silvio SAVARESE. CS231A Course Notes 3: Epipolar Geometry. *Interactive Perception and Robot Learning Lab-Home* [online]. Stanford: Stanford IPR Lab, 2021 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: [https://web.stanford.edu/class/cs231a/course\\_notes/03-epipolar-geometry.pdf](https://web.stanford.edu/class/cs231a/course_notes/03-epipolar-geometry.pdf)
- [9] KALOVÁ, I.; LISZTAN, M. Active Triangulation Technique. In 5th International Conference of PhD Students. Miskolc: University of Miskolc, 2005. p. 99-104. ISBN: 963-661-673- 6.
- [10] BILLIOT, Bastien, Frédéric COINTAULT, Ludovic JOURNAUX, Jean-Claude SIMON a Pierre GOUTON. 3D Image Acquisition System Based on Shape from Focus Technique. *Sensors* [online]. 2013, **13**(4), 5040-5053 [cit. 2023-05-07]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s130405040
- [11] PIATEK, Slawomir. Measuring distance with light. *Hamamatsu Protonics* [online]. Hamamatsu Protonics, 2015 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: [https://hub.hamamatsu.com/us/en/application-notes/automotive/measuring-distance-with-light.html#3\\_2](https://hub.hamamatsu.com/us/en/application-notes/automotive/measuring-distance-with-light.html#3_2)
- [12] KALOVÁ, Ilona a Marek LISZTAN. Industrial applications of triangulation technique. *IFAC Proceedings Volumes* [online]. 2006, **39**(21), 258-263 [cit. 2023-04-16]. ISSN 14746670. Dostupné z: doi:10.1016/S1474-6670(17)30194-5

- [13] XU, Xiaobin, Zhongwen FEI, Jian YANG, Zhiying TAN a Minzhou LUO. Line structured light calibration method and centerline extraction: A review [online]. 23 November 2020 [cit. 2022-12-24]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103637>
- [14] HOLLOWS, Gregory a Nicholas JAMES. The Advantages of Telecentricity. *Edmund Optics* [online]. York: Edmund Optics, c2023 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/advantages-of-telecentricity>
- [15] HOLLOWS, Gregory a Nicholas JAMES. Telecentric Lens Size Control. *Edmund Optics* [online]. York: Edmund Optics, c2023 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/telecentric-lens-size-control>
- [16] HOLLOWS, Gregory a Nicholas JAMES. Distortion and Telecentricity. *Edmund Optics* [online]. York: Edmund Optics, c2023 [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/distortion-and-the-telecentricity-specification/>
- [17] HOLLOWS, Gregory a Nicholas JAMES. Telecentric Design Topics. *Edmund Optics* [online]. York: Edmund Optics, c2023 [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/telecentric-design-topics>
- [18] YAO, Linshen a Haibo LIU. Design and Analysis of High-Accuracy Telecentric Surface Reconstruction System Based on Line Laser. *Applied Sciences* [online]. 2021, **11**(2) [cit. 2023-05-13]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app11020488
- [19] What is Structured Light Imaging? [online]. Huntington Beach: RoboticsTomorrow, 2018 [cit. 2022-12-26]. Dostupné z: <https://www.roboticstomorrow.com/article/2018/04/what-is-structured-light-imaging/11821>
- [20] GENG, Jason. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics* [online]. 2011, **3**(2) [cit. 2023-04-19]. ISSN 1943-8206. Dostupné z: doi:10.1364/AOP.3.000128
- [21] COLLINGS, Neil. Full parallax three-dimensional display with occlusion effect using computer generated hologram. *Optical Engineering* [online]. 2011, **50**(7) [cit. 2023-04-19]. ISSN 0091-3286. Dostupné z: doi:10.1117/1.3599871
- [22] ROBINSON, Alan, Lyuba ALBOUL a Marcos RODRIGUES. *Methods for Indexing Stripes in Uncoded Structured Light Scanning Systems* [online]. 2004 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/221546280\\_Methods\\_for\\_Indexing\\_Stripes\\_in\\_Uncoded\\_Structured\\_Light\\_Scanning\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/221546280_Methods_for_Indexing_Stripes_in_Uncoded_Structured_Light_Scanning_Systems)
- [23] COX, Graham. The de Bruijn Sequence. *Bealdung* [online]. Bukurešť, 2022 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.baeldung.com/cs/de-bruijn-sequence>



- [24] DOLEŽAL, Milan. Aktivní stereovidění. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2022, 96 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Ilona Janáková, Ph.D.
- [25] 8SMC1-USBhF - Microstep Driver (USB Interface). *Standa* [online]. Vilnius, c2000-2023 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z:  
[https://www.standa.lt/products/catalog/motorised\\_positioners?item=175](https://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=175)

## **SEZNAM PŘÍLOH**

<b>PŘÍLOHA A - OBSAH ELEKTRONICKÉ PŘÍLOHY .....</b>	<b>83</b>
---	-----------

## Příloha A - Obsah elektronické přílohy

### 1 Pohyblive\_zrcadlo

- calibCam1 ..... Kalibrační snímky pro přímý pohled kamery
- calibCam2 ..... Kalibrační snímky pro pohled kamery na odraz
- Camera1Picture ..... Snímky pro měření (přímý pohled)
- Camera2Picture ..... Snímky pro měření (pohled na odraz)
- kalibrace ..... Snímky pro kalibraci zkruslení
  - cut ..... Snímky pro přímý pohled
  - cutMirror ..... Snímky pro pohled na odraz
- Standa ..... Složka pro lineární posuv
  - CheckerboardBlackStripe.pdf... Upravený šachovnicový vzor
  - CheckerBoardPrint.m ..... Skript pro tvorbu šachovnic
  - MotorControl.m ..... Skript pro ovládání motoru
  - MotorInit.m ..... Skript pro inicializaci motoru
  - SetMotorPos.m ..... Funkce pro nastavení polohy
  - USMCDLL.h ..... Hlavičkový soubor pro motor
  - USMCDLL.lib ..... Knihovna pro ovládání motoru
- AquireCalibData.m ..... Skript pro akvizici kalibračních dat
- AquireCalibDataNoMotor.m ..... Skript pro akvizici kalibračních dat bez motoru
- ATCalibration.m ..... Skript pro kalibraci aktivní triangulace
- CalibrationPoints.m ..... Funkce pro nalezení kalibračních bodů
- CalibrationSession.mat ..... Kalibrační session (přímý pohled)
- CalibrationSessionMirror.mat ..... Kalibrační session (pohled na odraz)
- CameraParams.mat ..... Vnitřní parametry kamery (přímý pohled)
- CameraParamsMirror.mat ..... Vnitřní parametry kamery (pohled na odraz)
- IGGMSep.m ..... Vylepšená metoda těžišť
- imageDivider.m ..... Skript pro rozdělení snímku
- LaserLineFitting.m ..... Funkce pro proložení laserové čáry přímkou
- LineExtractor.m ..... Metoda lokálního maxima
- LineExtractor2.m ..... Metoda těžišť
- Measure.m ..... Skript pro měření
- MLS.m ..... Klouzavé nejmenší čtverce
- plotLaserLine.m ..... Funkce pro vykreslení laserových středů
- separateLaserLine.m ..... Funkce pro rozdělení laser. čáry na segmenty
- StegerAlgorithm.m ..... Stegerův algoritmus
- T1.mat ..... Transformační matice (přímý pohled)
- T2.mat ..... Transformační matice (pohled na odraz)

- transformLaserData.m ..... Transformace z pixel. souřadnic do reálných

## 2Pevne\_zrcadlo

- calibCam1 ..... Kalibrační snímky pro přímý pohled kamery
- calibCam2 ..... Kalibrační snímky pro pohled kamery na odraz
- Camera1Picture ..... Snímky pro měření (přímý pohled)
- Camera2Picture ..... Snímky pro měření (pohled na odraz)
- kalibrace ..... Snímky pro kalibraci zkusobní
  - cut ..... Snímky pro přímý pohled
  - cutMirror ..... Snímky pro pohled na odraz
- Standa ..... Složka pro lineární posuv
  - CheckerboardBlackStripe.pdf... Upravený šachovnicový vzor
  - CheckerBoardPrint.m ..... Skript pro tvorbu šachovnic
  - MotorControl.m ..... Skript pro ovládání motoru
  - MotorInit.m ..... Skript pro inicializaci motoru
  - SetMotorPos.m ..... Funkce pro nastavení polohy
  - USMCDLL.h ..... Hlavičkový soubor pro motor
  - USMCDLL.lib ..... Knihovna pro ovládání motoru
- AcquireCalibData.m ..... Skript pro akvizici kalibračních dat
- AcquireCalibDataNoMotor.m ..... Skript pro akvizici kalibračních dat bez motoru
- ATCalibration.m ..... Skript pro kalibraci aktivní triangulace
- CalibrationPoints.m ..... Funkce pro nalezení kalibračních bodů
- CalibrationSession.mat ..... Kalibrační session (přímý pohled)
- CalibrationSessionMirror.mat ..... Kalibrační session (pohled na odraz)
- CameraParams.mat ..... Vnitřní parametry kamery (přímý pohled)
- CameraParamsMirror.mat ..... Vnitřní parametry kamery (pohled na odraz)
- IGGMSep.m ..... Vylepšená metoda těžiště
- imageDivider.m ..... Skript pro rozdělení snímku
- LaserLineFitting.m ..... Funkce pro proložení laserové čáry přímkou
- LineExtractor.m ..... Metoda lokálního maxima
- LineExtractor2.m ..... Metoda těžiště
- Measure.m ..... Skript pro měření
- MLS.m ..... Klouzavé nejmenší čtverce
- plotLaserLine.m ..... Funkce pro vykreslení laserových středů
- separateLaserLine.m ..... Funkce pro rozdělení laser. čáry na segmenty
- StegerAlgorithm.m ..... Stegerův algoritmus
- T1.mat ..... Transformační matice (přímý pohled)
- T2.mat ..... Transformační matice (pohled na odraz)
- transformLaserData.m ..... Transformace z pixel. souřadnic do reálných

### 3BezPreostrovani

- calibCam1 .....Kalibrační snímky pro přímý pohled kamery
- calibCam2 .....Kalibrační snímky pro pohled kamery na odraz
- Camera1Picture.....Snímky pro měření (přímý pohled)
- Camera2Picture.....Snímky pro měření (pohled na odraz)
- kalibrace .....Snímky pro kalibraci zkreslení
  - cut..... Snímky pro přímý pohled
  - cutMirror ..... Snímky pro pohled na odraz
- Standa.....Složka pro lineární posuv
  - CheckerboardBlackStripe.pdf... Upravený šachovnicový vzor
  - CheckerBoardPrint.m..... Skript pro tvorbu šachovnic
  - MotorControl.m ..... Skript pro ovládání motoru
  - MotorInit.m ..... Skript pro inicializaci motoru
  - SetMotorPos.m..... Funkce pro nastavení polohy
  - USMCDLL.h ..... Hlavičkový soubor pro motor
  - USMCDLL.lib ..... Knihovna pro ovládání motoru
- AcquireCalibData.m ..... Skript pro akvizici kalibračních dat
- AcquireCalibDataNoMotor.m ..... Skript pro akvizici kalibračních dat bez motoru
- ATCalibration.m ..... Skript pro kalibraci aktivní triangulace
- CalibrationPoints.m ..... Funkce pro nalezení kalibračních bodů
- CalibrationSession.mat ..... Kalibrační session (přímý pohled)
- CalibrationSessionMirror.mat..... Kalibrační session (pohled na odraz)
- CameraParams.mat ..... Vnitřní parametry kamery (přímý pohled)
- CameraParamsMirror.mat..... Vnitřní parametry kamery (pohled na odraz)
- IGGMSep.m ..... Vylepšená metoda těžiště
- imageDivider.m ..... Skript pro rozdělení snímku
- LaserLineFitting.m..... Funkce pro proložení laserové čáry přímkou
- LineExtractor.m ..... Metoda lokálního maxima
- LineExtractor2.m ..... Metoda těžiště
- Measure.m ..... Skript pro měření
- MLS.m ..... Klouzavé nejmenší čtverce
- plotLaserLine.m ..... Funkce pro vykreslení laserových středů
- separateLaserLine.m ..... Funkce pro rozdělení laser. čáry na segmenty
- StegerAlgorithm.m..... Stegerův algoritmus
- T1.mat ..... Transformační matice (přímý pohled)
- T2.mat ..... Transformační matice (pohled na odraz)
- transformLaserData.m ..... Transformace z pixel. souřadnic do reálných

#### 4TelecentrickyObjektiv

- calibCam1 .....Kalibrační snímky pro přímý pohled kamery
- calibCam2 .....Kalibrační snímky pro pohled kamery na odraz
- Camera1Picture.....Snímky pro měření (přímý pohled)
- Camera2Picture.....Snímky pro měření (pohled na odraz)
- kalibrace ..... Snímky pro kalibraci zkreslení
  - cut..... Snímky pro přímý pohled
  - cutMirror ..... Snímky pro pohled na odraz
- Standa.....Složka pro lineární posuv
  - CheckerboardBlackStripe.pdf... Upravený šachovnicový vzor
  - CheckerBoardPrint.m..... Skript pro tvorbu šachovnic
  - MotorControl.m ..... Skript pro ovládání motoru
  - MotorInit.m ..... Skript pro inicializaci motoru
  - SetMotorPos.m..... Funkce pro nastavení polohy
  - USMCDLL.h ..... Hlavičkový soubor pro motor
  - USMCDLL.lib ..... Knihovna pro ovládání motoru
- AcquireCalibData.m ..... Skript pro akvizici kalibračních dat
- AcquireCalibDataNoMotor.m ..... Skript pro akvizici kalibračních dat bez motoru
- ATCalibration.m ..... Skript pro kalibraci aktivní triangulace
- CalibrationPoints.m ..... Funkce pro nalezení kalibračních bodů
- CalibrationSession.mat ..... Kalibrační session (přímý pohled)
- CalibrationSessionMirror.mat..... Kalibrační session (pohled na odraz)
- CameraParams.mat ..... Vnitřní parametry kamery (přímý pohled)
- CameraParamsMirror.mat..... Vnitřní parametry kamery (pohled na odraz)
- IGGMSep.m ..... Vylepšená metoda těžiště
- imageDivider.m ..... Skript pro rozdělení snímku
- LaserLineFitting.m..... Funkce pro proložení laserové čáry přímkou
- LineExtractor.m ..... Metoda lokálního maxima
- LineExtractor2.m ..... Metoda těžiště
- Measure.m..... Skript pro měření
- MLS.m ..... Klouzavé nejmenší čtverce
- plotLaserLine.m ..... Funkce pro vykreslení laserových středů
- separateLaserLine.m ..... Funkce pro rozdělení laser. čáry na segmenty
- StegerAlgorithm.m..... Stegerův algoritmus
- T1.mat ..... Transformační matice (přímý pohled)
- T2.mat ..... Transformační matice (pohled na odraz)
- transformLaserData.m ..... Transformace z pixel. souřadnic do reálných