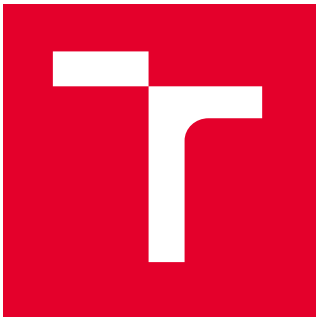


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

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

3D MĚŘENÍ POMOCÍ ŘÁDKOVÝCH KAMER

3D RECONSTRUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Luboš Vít**

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Miloslav Richter, Ph.D.**

SUPERVISOR

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Luboš Vít ***ID:*** 211442

Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

3D měření pomocí řádkových kamer

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem je vypracovat algoritmy pro měření 3D tvaru pohybujících se objektů pomocí řádkových kamer.

1) Nastudujte možnosti snímání obrazu pomocí řádkových kamer. Pro měření zvolte dvě sestavy a jejich výsledky porovnejte. V prvním případě tvoří zobrazovací roviny písmeno V, ve druhém případě jsou v jedné rovině.

2) Navrhněte jednoduchý matematický aparát pro vyhodnocení 3D tvaru.

3) Realizujte testovací pracoviště a nasnímejte scény vhodné pro ověřování algoritmů.

4) Realizujte základní algoritmy měření a zhodnoťte výsledky. Srovnejte jednotlivé metody vůči sobě a popište jejich výhody a nevýhody.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Gonzalez R.C., Woods R.E.: Digital Image Processing, 4th edition, Pearson, 2017, ISBN 978-0133356724

Termín zadání: 7.2.2022 ***Termín odevzdání:*** 23.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Miloslav Richter, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Práce se zabývá problematikou 3D měření pomocí řádkových kamer. Jelikož je v dnešní době kladen velký důraz na kvalitu a automatizaci výroby, jsou řádkové kamery vhodným zařízením poskytujícím přesnost pro kontrolu výroby na páse. První část práce pojednává o teorii týkající se optiky, snímání a zpracování obrazu. V dalších částech práce je probrána realizace návrhu matematického aparátu pro vyhodnocení 3D tvaru, návrh testovacího pracoviště a samotného snímání scény se zpracováním pomocí základních algoritmů měření.

Klíčová slova

3D, Řádkové kamery, Algoritmy měření, Počítačové vidění, Vícerozměrné signály, Optika, Snímání, Zpracování obrazu

Abstract

The thesis focuses on 3D measurement using line scan cameras. In response to the emphasis on quality and automatization of production nowadays, the line scan cameras are the appropriate devices providing accuracy for a belt product inspection. The first part of the thesis discusses the desing theory of optics, sensoring and image processing. The realisation of designing a mathematic instrument for evaluation of 3D shape, designing a test workspace and the main sensoring of the scene with processing with basic measuring algorithms is a content of the second part of the thesis.

Keywords

3D, Line scan cameras, Measurement algorithms, Computer vision, Multidimentional signals, Optics, Sensoring, Image processing

Bibliografická citace

VÍT, L. *3D měření pomocí řádkových kamer*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2022. 83 s., 18 s. příloh. Semestrální práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Richter, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Luboš Vít
VUT ID studenta:	211442
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2021/22
Téma závěrečné práce:	*3D měření pomocí řádkových kamer*

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: ----------

podpis autora

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Miroslavovi Richterovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady, technologickou a metodickou pomoc při měření. Zároveň bych rád poděkoval mé sestře Hance Vítové, s pomocí při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 23.5.2022 ----------

podpis autora

Obsah

1. ÚVODNÍ SLOVO 11

2. TEORETICKÝ ÚVOD 12

2.1 KAMERY 12
2.1.1 Základní model kamery 12
2.1.2 Analogové kamery 12
2.1.3 Klasické digitální kamery 13
2.1.4 Řádkové kamery 13
2.2 ÚVOD DO OPTIKY 14
2.2.1 Foton 14
2.2.2 Geometrická optika 15
2.2.3 Optické aberace 17
2.2.4 Vlnová optika 20
2.3 VLASTNOSTI OBRAZU 21
2.3.1 Snímání 21
2.3.2 Jas, kontrast a barva 22
2.3.3 Ostrost 23
2.3.4 Barevná hloubka 24
2.4 ZPRACOVÁNÍ OBRAZU 25
2.4.1 Digitalizace 25
2.4.2 Histogram a ekvalizace histogramu 26
2.4.3 Prahování 27
2.4.4 Filtrace šumu 27
2.4.5 Detekce hran obrazu 30
2.5 TRANSFORMACE OBRAZU 31
2.5.1 Geometrická transformace obrazu 31
2.6 EPIPOLÁRNÍ GEOMETRIE A FUNDAMENTÁLNÍ MATICE 32
2.6.1 Epipolární geometrie 32
2.6.2 Fundamentální matice 33

3. 3D MĚŘENÍ POMOCÍ ŘÁDKOVÝCH KAMER 35

3.1 VYTVOŘENÍ TESTOVACÍHO PRACOVIŠTĚ 35
3.2 SNÍMÁNÍ POMOCÍ ŘÁDKOVÝCH KAMER 36
3.3 ZÍSKÁNÍ SNÍMKŮ K MĚŘENÍ 37
3.4 PRINCIP 3D MĚŘENÍ POMOCÍ ŘÁDKOVÝCH KAMER 38
3.5 MĚŘENÉ PŘEDMĚTY 40
3.6 MĚŘENÍ S ROZLOŽENÍM KAMER DO ROVINY V 41
3.6.1 První snímky řádkových kamer 41
3.6.2 První měření na páse 42
3.6.3 První zlepšení měření 45
3.6.4 Optimalizované měření 46
3.6.5 Optimalizované měření s podkladem 50
3.7 MĚŘENÍ S KAMERAMI VE SPOLEČNÉ ROVINĚ 54
3.8 TVORBA 3D MODELU VYUŽITÍM MAPY DISPARITY 59

4. ZÁVĚR 63

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1 Princip dírkové komory [16] ... 12
2.2 Porovnání "klasické" kamery a kamery řádkové [5] ... 14
2.3 Druhy spojných čoček ... 15
2.4 Druhy rozptylných čoček ... 15
2.5 Lom paprsků spojnými čočkami ... 16
2.6 Lom paprsků rozptylnými čočkami ... 16
2.7 Lom paprsku vydutým a vypuklým zrcadlem [4] ... 17
2.8 Vznik otvorové vady u čočky a zrcadla [25] ... 17
2.9 Princip optické vady koma [6] ... 18
2.10 Princip optické vady astigmatismus [6] ... 18
2.11 Druhy zkreslení obrazu [6] ... 19
2.12 Princip optické barevné vady vzdálenosti [27] ... 19
2.13 Elektromagnetické spektrum [17] ... 20
2.14 Interference elektromagnetického záření [18] ... 21
2.15 Černobílé snímky s původním, zesíleným a sníženým jasem ... 22
2.16 Černobílé snímky s původním, zesíleným a sníženým kontrastem. ... 22
2.17 Snímky jednotlivých barevných složek obrazu ... 23
2.18 Snímky se sestupnou barevnou hloubkou obrazu ... 24
2.19 Princip ekvalizace histogramu ... 26
2.20 Princip prahování obrazu ... 27
2.21 Příklad filtrace šumu pomocí průměrování ... 28
2.22 Příklad filtrace šumu pomocí mediánu ... 29
2.23 Příklad redukce šumu Gaussovským filtrem ... 29
2.24 Princip detekce hran v obraze ... 30
2.25 Epipolární plocha π [33] ... 32
2.26 Náklon epipolární roviny π [33] ... 33
2.27 Detekce similarit ve stereo páru [33] ... 33
2.28 Homografie epipolární roviny π [33] ... 34
3.1 Model dopravníkového pásu ... 35
3.2 Model dopravníkového pásu ... 36
3.3 Trigonometrie měření ... 39
3.4 Trigonometrie měření ... 39
3.5 Modely měřených předmětů z programu Fusion 360 ... 40
3.6 Nastavení měřícího pracoviště s rozložením kamer do roviny V ... 41
3.7 První snímky pomocí řádkové kamery ... 42
3.8 Výsledky prvního měření: Jedna destička ... 43
3.9 Výsledky prvního měření: Dvě destičky ... 43
3.10 Výsledky prvního měření: Tři destičky ... 44
3.11 Měření dvou destiček s kolečky ... 45
3.12 Měření třech destiček s kolečky ... 46
3.13 Snímky měření výseku elipsoidu bez podkladu ... 47
3.14 Snímky měření šesti schodů bez podkladu ... 48
3.15 Snímky měření tří schodů bez podkladu ... 49
3.16 Snímky měření výseku elipsoidu s podkladem ... 50

3.17 Detail detekce okraje kolečka 51
3.18 Snímky měření šesti schodů s podkladem 52
3.19 Snímky měření tří schodů s podkladem 53
3.20 Nastavení měřícího pracoviště s rozložením kamer ve společné rovině 54
3.21 Snímky měření výseku elipsoidu s kamerami ve společné rovině 55
3.22 Snímky měření šesti schodů s kamerami ve společné rovině 56
3.23 Snímky měření tří schodů s kamerami ve společné rovině 57
3.24 Proložení jednotlivých snímků k tvorbě mapy disparity 59
3.25 Průměrování a prahování mapy disparity 59
3.26 Tvorba 3D modelu z prahové mapy disparity 60
3.27 3D model získaný po průměrování mapy disparity bez prahování 60
3.28 3D model získaný po průměrování mapy disparity bez prahování 61
3.29 Proložení jednotlivých snímků a tvorba mapy disparity výseku elipsoidu 61
3.30 Zprůměrovaná mapa disparity výseku elipsoidu 62
3.31 3D model výseku elipsoidu získaný po průměrování mapy disparity 62

1. ÚVODNÍ SLOVO

Řádkové kamery se uplatní zejména v industriálním prostředí. Používají se především pro snímání výrobků na páse. Lze jimi kontrolovat kvalitu produktů a automatizovat procesy, které jsou nezávislé na lidském faktoru. Kamera s vyhodnocovacím softwarem je schopna odhalit například zmetky při běžném taktu výrobního pásu. Časté využití mají například v tiskařském, textilním, papírenském průmyslu nebo také při výrobě skleněných tabulí či kovových plechů.

Hlavní výhoda řádkových kamer je snímání neomezené velikosti snímků. Řádková kamera je limitována pouze šířkou snímku, která se pohybuje v rozmezí 2048 px až 12288 px v závislosti na kvalitě a ceně kamery [22]. Výška snímku je limitována dobou snímání, je tedy čistě na uživateli, jak velký snímek potřebuje. Defaultně kamera snímá jeden řádek.

Jednou z možných aplikací řádkové kamery je také 3D měření, tímto tématem se zabývá moje bakalářská práce. 3D optické měření lze realizovat pomocí fotoaparátů, videokamer, lidarů a dalších zařízení. Velkou výhodou trojrozměrného měření pomocí řádkových kamer je redukce proměnných při měření. Ta je způsobena sestavou měřícího aparátu a optimalizací rychlosti pásu, po kterém je měřený předmět přepravován. Avšak proto jsou právě kalibrace a optimalizace systému velice důležité a náročné záležitosti pro přesnost měření.

Pro prostorové měření řádkovou kamerou využívám dvě kamery v různých konfiguracích a vyhodnocuji jednotlivé výsledky měření. Stereoskopické vidění ověřila již matka příroda na živých organismech v rámci milionů let. Dalo by se říct, že právě oči jsou jakousi formou snímačů, které umožňují mozku vnímat trojrozměrný obraz a dál ho zpracovávat. Organismy proto mívají, až na výjimky, oči po párech pro lepší možnost rozpoznání vzdálenosti a tvaru pozorovaného předmětu. V případě takového komára závisí jeho život na kvalitě rozlišení, zdali je plácačka blízko, daleko nebo jakou rychlostí se blíží. Avšak obrazové zpracování umožňuje až mozek nebo jeho ekvivalent.

Každý z nás se pravděpodobně setkal s produkty vytvořenými pomocí 3D stereoskopického snímání. Ať už by se jednalo o filmy ve 3D kinech, které jsou většinou natáčeny pomocí dvou kamer či jedné kamery se dvěma objektivy využívající stereografii nebo také Google Earth, který byl vytvořen za pomoci lidaru z letadla. Měření a posuzování tvaru snímaného objektu pomocí kamer není novinkou a v budoucnu se frekvence využití bude zajisté zvyšovat. Nicméně využití řádkových kamer je v běžném životě výjimečným způsobem měření, se kterým se jen tak nesetkáme.

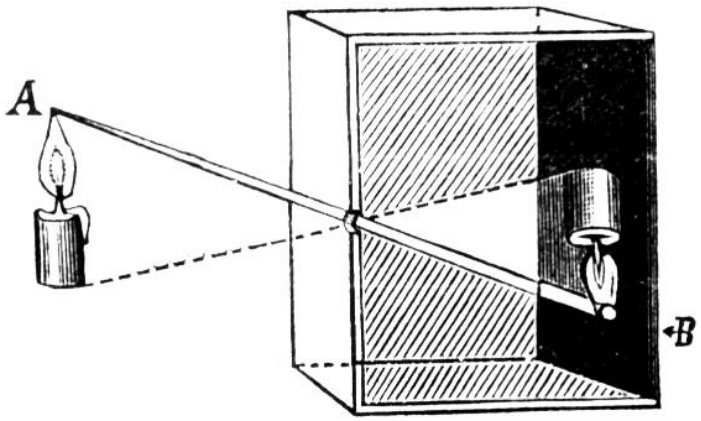
Moje bakalářská práce je rozdělena na dvě části, první teoretickou, ve které si vysvětlíme základy optiky, vlastnosti digitálního obrazu, zpracování a vytvoření digitálního obrazu, druhy kamer a jejich využití. Ve druhé části bakalářské práce se zabývám samotným 3D měřením pomocí řádkových kamer, jejich kalibrací a návrhem vyhodnocovacího software v prostředí Matlab.

2. TEORETICKÝ ÚVOD

2.1 Kamery

2.1.1 Základní model kamery

Camera obscura, známá také jako dírková komora nebo pod anglickým názvem pinhole, je nejjednodušším modelem kamery. Princip této kamery je znám již z dob antického Řecka. Představme si krabici (princip dírkové komory znázorněn v obrázku 2.1) s malým otvorem uprostřed její strany. Tímto otvorem nám prochází světlo a dopadá na opačnou stranu uzavřené krabice, kde vykresluje obraz scény, který převrácený vodorovně i svisle. Podobného principu si všimli již zmínění antičtí Řekové, avšak ve větším měřítku – místnosti [29].
Postupem času dírkovou kameru studovala řada známých vědců například Leonardo da Vinci nebo Giambattista Della Porta, který ji vylepšil použitím čočky v místě dírky a tím docílil lepšího obrazu. První zmínka o zachycení scény na světločivý materiál je z roku 1826 připsána Niépcemu s osmihodinovou expozicí [28].



Obrázek 2.1 Princip dírkové komory [16]

2.1.2 Analogové kamery

Analogové kamery byly využívány od objevu prvního fotoaparátu. Většinou zachycují scénu na fotografický papír, případně na film. Paprsky světla na něm vyvolají chemickou reakci, která způsobí ztmavení míst, kam dopadá nejvíce světla. Tím vznikne fotografický negativ, který se musí vyvolat. Po vyvolání fotografie či filmu je snímek fyzicky uložen ve struktuře materiálu [25].
Dodnes se v některých případech upřednostňuje analogový snímek před snímkem digitálním, ať už je to osobní preferencí, nebo vlastnostmi snímku.

2.1.3 Klasické digitální kamery

Digitální kamerou se označuje zařízení, které je schopno vytvářet dvojrozměrný jasový obraz trojrozměrné scény a ten uložit do digitální formy. Označením „klasické“ se myslí kamery běžně dostupné využívající CCD nebo CMOS snímače (více v kapitole Snímače).

I tyto kamery lze využívat pro optické měření, avšak ve specifických aplikacích. Nejčastěji v případech, kdy kvalita měření není hlavním cílem. Klasické kamery kladou totiž řadu překážek při požadavcích na přesnost měření, jako například homogenní nasvícení scény, nerovnoměrnost zaostření a podobné. Každý z těchto problémů lze v určité míře zredukovat, avšak ne vždy se dosáhne požadované přesnosti.

Výhodou těchto kamer je jejich dostupnost a cena, lze je proto využívat v místech, kde by mohlo dojít k poškození kamery vlivem okolního prostředí. Příkladem takového použití by mohla být detekce státních poznávacích značek vozidel na komunikacích. Teplota, vlhkost a prašnost může způsobit různé potíže s kamerou, nemá tedy smysl využívat nákladnější druhy kamer. Zároveň kamera ukládá snímanou scénu do 2D formátu snímku, což nám umožňuje přístup k jednotlivým snímkům obrazu. Perioda ukládání jednotlivých snímků je totožná s periodou snímání.

S tím se pojí další parametry těchto kamer, jako je například frekvence snímaní uváděna často v parametru *fps (frames per second)* udávající počet snímků za sekundu, rozlišení, poměr stran. Základní model kamery se skládá z [1]:

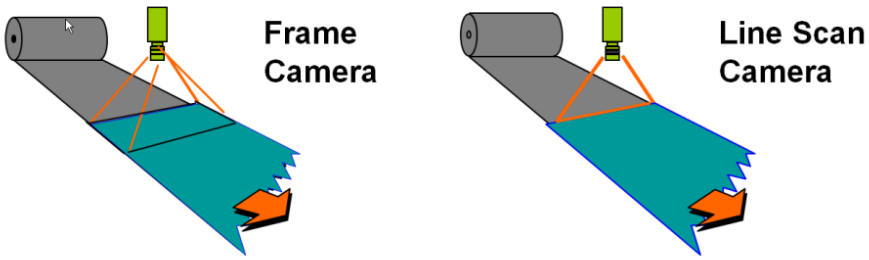
- Objektivu – Promítne obraz snímané scény na snímač obrazu
- Snímače obrazu – Přemění jas, intenzitu záření či jiné fyzikální veličiny na signál, který lze dále zpracovávat.
- Elektronických obvodů pro obsluhu snímače – Zajišťující funkci snímače a kvalitu snímání.

2.1.4 Řádkové kamery

Jedná se o specifický druh digitálních kamer, které jsou přizpůsobeny ke snímání právě jednoho řádku snímku. Jednotlivé části těchto kamer jsou prakticky stejné jako u kamer „klasických“. Z důvodu snímání jednoho řádku scény se musí kamera vůči snímanému objektu pohybovat s konstantní rychlostí. Široké využití naleznou například v průmyslu k snímání kvality výrobků, jejich vad, počtu [5].

U řádkových kamer je velkou výhodou jejich rychlost snímání a s ní spojená i kvalita měření. Při vysoké rychlosti pásu lze tak kontrolovat výrobky s velkou přesností. Na rozdíl od klasických kamer nedochází při snímání k problémům se zaostřením v částech snímku a problémy s expozicí. Řádková kamera snímá pouze úzkou část scény (na obrázku 2.2 je znázorněno porovnání „klasické“ kamery a kamery řádkové) stačí zaostřit právě na tuto část. Velmi obdobně je to i s nasvícením snímané scény. Takto lze standardizovat výsledky snímání a eliminovat případné potíže, které by nás neminuly u kamer „klasických“ [5].

U řádkových kamer je důležitým parametrem vzorkovací frekvence uváděna v *kHz*, která lineárně souvisí s hustotou rozlišení výsledného snímku. Všeobecně platí, že čím větší detail snímku potřebujeme, tím vyšší frekvenci snímkování musíme použít [5].



Obrázek 2.2 Porovnání "klasické" kamery a kamery řádkové [5]

2.2 Úvod do optiky

Lineární kamery podobně jako fotoaparáty potřebují pro správné zobrazení snímané scény objektiv. Objektiv se skládá ze soustavy čoček, které soustředí snímaný prvek na senzor kamery či fotoaparátu. Bez objektivu nelze jednoduše zaostřit a ani zachytit daný objekt. Objektivy mimo jiné umožňují nastavení ohniskové vzdálenosti zvětšením nebo zmenšením vzdálenosti čoček v objektivu. To má za důsledek možnost nastavení perspektivy záběru.

2.2.1 Foton

V 18. století se Newton a Heygens snažili přijít na to, jakým způsobem popsat elektromagnetické záření. Newton stál na straně částicové teorie, kdy argumentoval, že geometrické vlastnosti lomu a odrazu světla lze vysvětlit pouze touto teorií. Tyto částice jsou dnes známy pod pojmem fotony. Zatímco Heygens podporoval teorii vlnovou, která i když nedokázala vysvětlit makroskopické vlastnosti světla tak dokázala vysvětlit například interferenci a další mikroskopické jevy [4].

Debata se dále rozvířila na začátku 20. století, kdy Einstein podpořil částicovou teorii při objevu fotoelektrického jevu. V dalších letech Bohr a Heisenberg prosadili myšlenku duality chování fotonu, která předpokládá chování obou teorií, avšak pouze jedné při experimentech. Einsteinův objev fotoelektrického jevu nám také umožnil vývoj a sestrojení dnešních senzorů digitálních kamer a dalších elektrosoučástek [2].

2.2.2 Geometrická optika

Geometrická neboli paprsková optika je část fyziky zabývající se makroskopickými vlastnostmi světla neboli elektromagnetického záření.

Světlo v zjednodušené formě lze reprezentovat svazkem paprsků, které mají jednotný směr a šíří se rychlostí světla. Tento paprsek se při dopadu na optický materiál může lomit nebo odrazit, oba jevy popisuje Snellův zákon lomu a odrazu. [24] Lze ho vyjádřit pomocí rovnice

$$n_a * sin\ \theta_a = n_b * sin\ \theta_b\ , \tag{2.1}$$

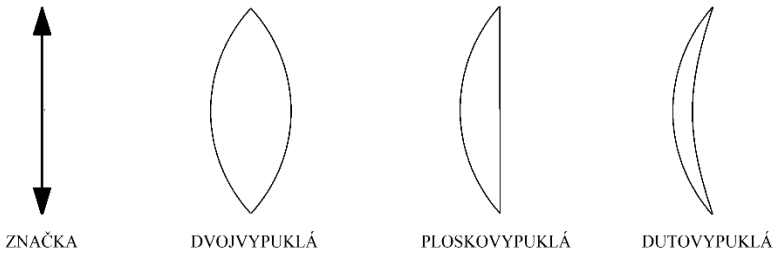
popisuje závislost indexu lomu n jednoho prostředí na druhém, přičemž θ je úhel lomu, či odrazu. Pro index lomu platí

$$n = c/v\ , \tag{2.2}$$

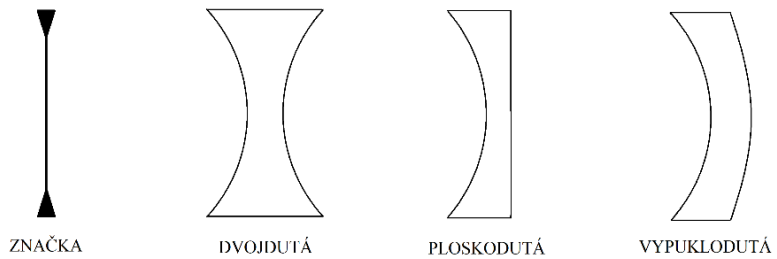
kde c je rychlost světla ve vakuu a v rychlost světla v daném prostředí.

Objektivy obsahují čočky, které jsou typicky dvojího druhu – spojné (konvexní) a rozptylné (konkávní), jednotlivé typy čoček naleznete v obrázku 2.3 a 2.4. Oba typy čoček lze kombinovat z každé strany čočky zvlášť a tím nám mohou vznikat speciální druhy čoček, které kompenzují například barevnou vadu achromát, která je způsobena disperzí bílého světla [3].

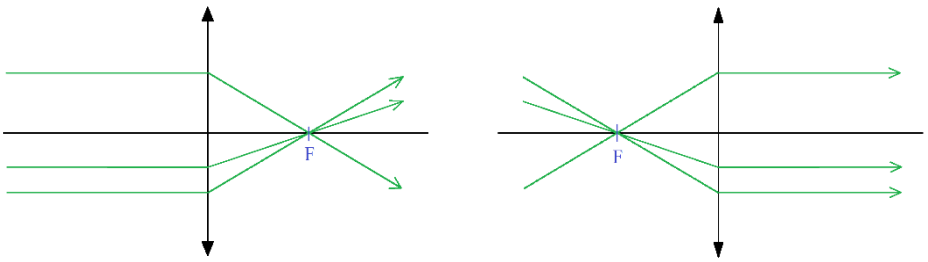
Spojné čočky mění svazek paprsků světla procházející jimi na svazek sbíhavý, tudíž vzniká bod zvaný ohnisko, ve kterém se jednotlivé paprsky setkávají. Rozptylné čočky, avšak mění svazek paprsků na svazek rozbíhavý, u kterého vzniká pomyslné ohnisko před čočkou [4]. Šíření paprsku záření čočkou je znázorněn na obrázcích 2.5 a 2.6.



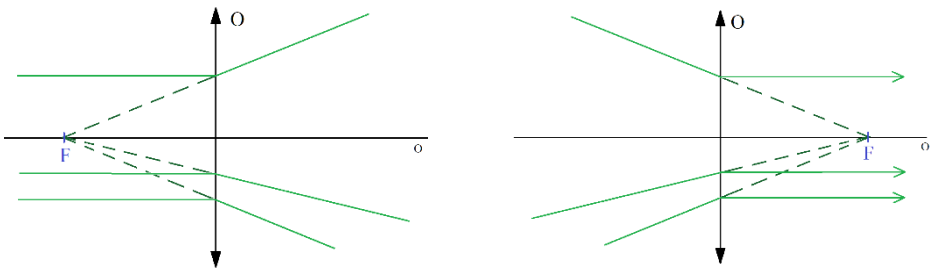
Obrázek 2.3 Druhy spojných čoček



Obrázek 2.4 Druhy rozptylných čoček



Obrázek 2.5 Lom paprsků spojnými čočkami



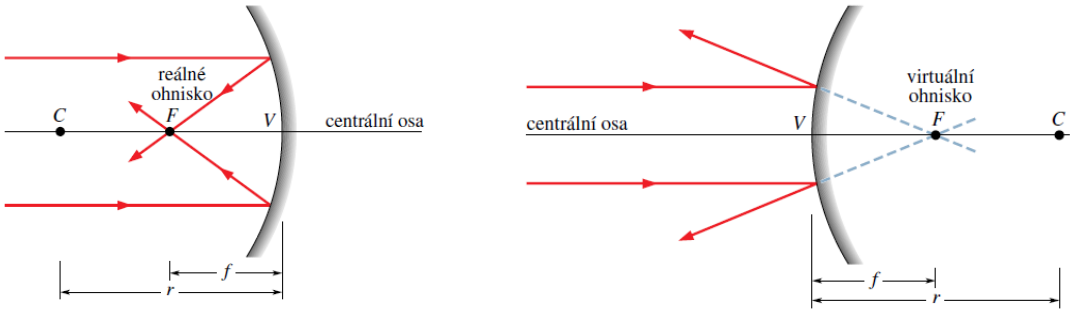
Obrázek 2.6 Lom paprsků rozptylnými čočkami

Obdobně se chovají i zrcadla, základním typem je zrcadlo ploché, které odráží paprsky do (ideálně) jediného směru. Zrcadlo musí být vyrobeno z materiálu, které nepohlcuje dopadající paprsky. Takto by totiž docházelo k poklesu jasu, či další ztráty informace v obraze. Obraz předmětu je zjevně stejně vzdálený od zrcadla jako skutečný předmět a zrcadlo, avšak je stranově převrácený. Dalším typem zrcadel jsou zrcadla kulová, které se dělí na zrcadlo vyduté a vypuklé [4].

Vydutá zrcadla odráží světelný paprsek do společného ohniska, které se nachází před zrcadlem. Zároveň je jejich obraz zvětšený při umístění předmětu mezi zrcadlo a jeho ohnisko, stejně jako u zrcadel rovinných je stranově převrácený. Při posunu předmětu před ohnisko zrcadla dochází k zmenšení obrazu předmětu a jeho horizontálnímu převratu.

Vypuklá zrcadla soustředí svazek paprsků do virtuálního ohniska, které se nachází za zrcadlem. Obraz předmětu vypuklého zrcadla je zmenšený oproti původnímu předmětu.

Na obrázku 2.7 je demonstrován princip geometrické optiky vypuklého a vydutého zrcadla [4].



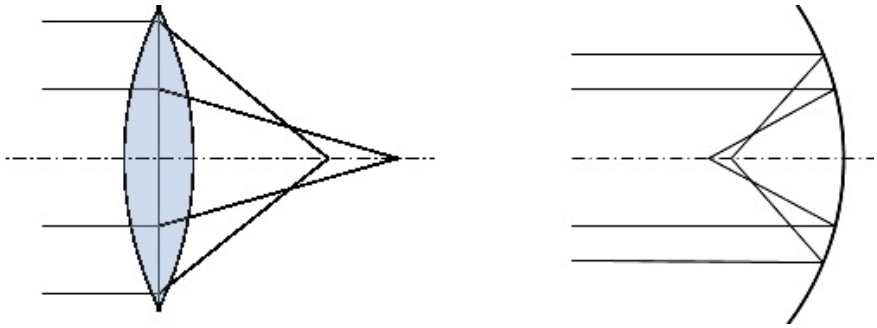
Obrázek 2.7 Lom paprsku vydutým a vypuklým zrcadlem [4]

2.2.3 Optické aberace

Otvorová vada

Známa také jako sférická aberace, je způsobena zobrazováním bodu ležícím na ose čočky širokým svazkem paprsků. Způsobuje neostrost obrazu z důvodu relativního zaostření bodu. Jednotlivé části čočky jsou totiž jinak vzdáleny od bodu což má za důsledek rozdílný lom světla čočkou vytvářející nejednoznačnost ohniska, viz obrázek 2.8. Důsledkem je, že obrazem bodu je kroužek (rozostřený bod) [7].

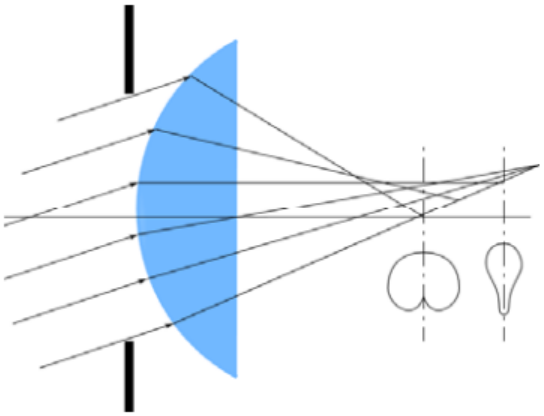
Při měření lze tuto vadu redukovat, například při použití tmeleného dubletu – stmelené dvojice čoček (spojné a rozptylné) se stejnými poloměry. U otvorové vady složitější soustavy čoček lze upravit parametry soustavy, a tím vadu redukovat [6].



Obrázek 2.8 Vznik otvorové vady u čočky a zrcadla [25]

Koma

Koma je typem optické aberace, která vzniká zobrazením bodu mimo osu čočky širokým svazkem paprsků. Tento bod je vykreslený jakožto protáhlá úzká ploška v obraze. V praxi koma způsobuje zamlžený obraz, především v okrajích. Její princip naleznete v obrázku 2.9 [7].

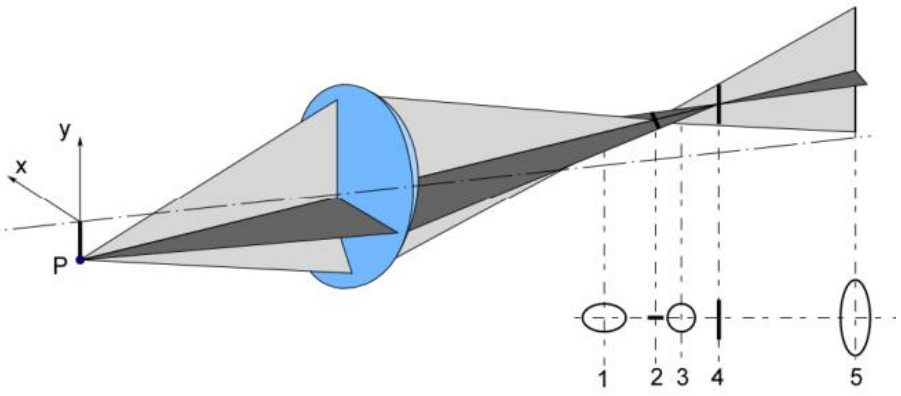


Obrázek 2.9 Princip optické vady koma [6]

Astigmatismus

Vniká při lomu úzkých paprskových svazků nepřesně vyrobenou čočkou. V jednotlivých rozměrech čočky *x* a *y* se paprsky lámou pod jinými úhly a tím vzniká několik ohnisek. Princip astigmatismu znázorněn v obrázku 2.10 [7].

V praxi lze čočku s astigmatickou vadou poznat často dle rozmazání světlých bodů v obraze, například světel aut, pouličního osvětlení atp. Astigmatismus v tomto případě způsobuje symetrické rozmazání těchto světlých bodů. Pro redukci je zapotřebí použít dvě čočky se stejnou vadou, avšak inverzní vůči sobě, aby se vada redukovala [6].

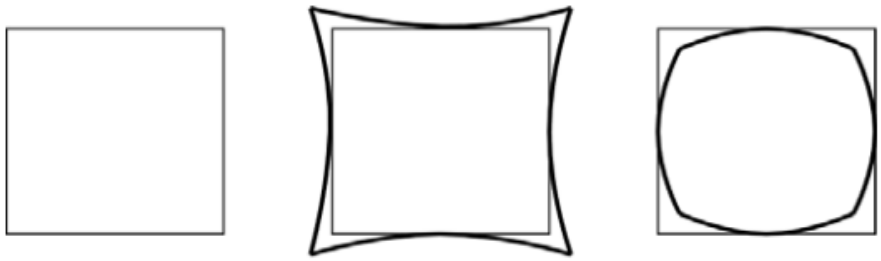


Obrázek 2.10 Princip optické vady astigmatismus [6]

Zkreslení obrazu

Existují dva druhy zkreslení obrazu – konvexní a konkávní, v obrázku 2.11 jsou znázorněny oba druhy. Vzniká zobrazením bodu ležícího mimo osu čočky úzkým svazkem paprsků. Při průchodu paprsku čočkou se její trajektorie zaoblí a tím způsobí deformaci obrazu [7].

Na kvalitu snímání má velký vliv, proto bývá často vyjadřováno v promile u jednotlivých objektivů. Pro její kompenzaci lze využít dvou čoček s opačnými typy zkreslení [7].

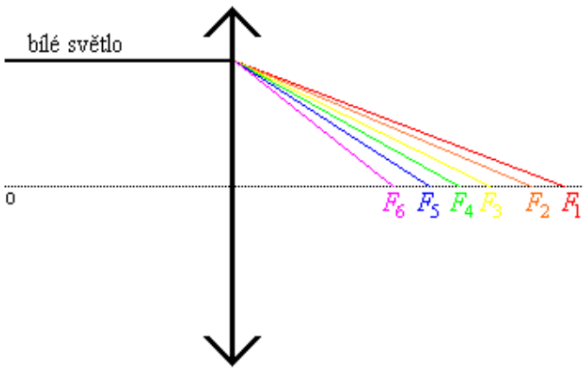


Obrázek 2.11 Druhy zkreslení obrazu [6]

Barevné vady

Jelikož je lom světla závislý na vlnové délce záření, při používání čoček dochází k různým barevným vadám. V případě, že pro dvě různé vlnové délky světla existují dvě různá ohniska, jedná se o ohniska achromatická, případ několika ohnisek znázorněn v obrázku 2.12. Při odstranění barevné vady pro tři vlnové délky záření, jedná se o soustavu apochromatickou. Pokud jsou odstraněny barevné vady čtyř vlnových délek, je to tzv. superachromatická soustava [7].

Vlnové délky, pro které se odstraňuje barevná vada, jsou závislé na druhu použití čoček. Pro jejich redukci se často snažíme korigovat parametry soustavy čoček. Největší vliv na odstranění barevné vady má změna disperze optických skel při zachování indexu lomu (či naopak). Využitím dubletu z různých materiálů se dá redukovat úroveň barevné vady, tyto čočky se nazývají achromáty [7].

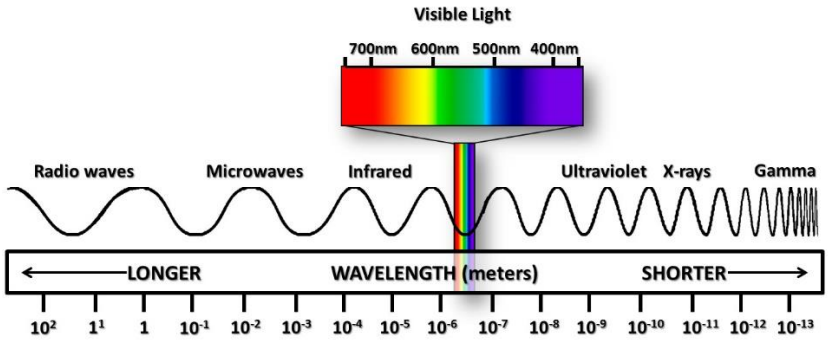


Obrázek 2.12 Princip optické barevné vady vzdálenosti [27]

2.2.4 Vlnová optika

Vlnová optika se na světlo dívá jakožto na elektromagnetické vlnění, platí pro něj tedy vlastnosti šíření vln. Tento způsob interpretace v některých experimentech naráží na pravidla, které platí pro záření a naopak [2].

Světlem se všeobecně uvažuje část elektromagnetického spektra v rozmezí vlnové délky 380 nm – 760 nm, v obrázku 2.13 je zobrazeno elektromagnetické spektrum. Jedná se o velice malý interval z celého elektromagnetického spektra.



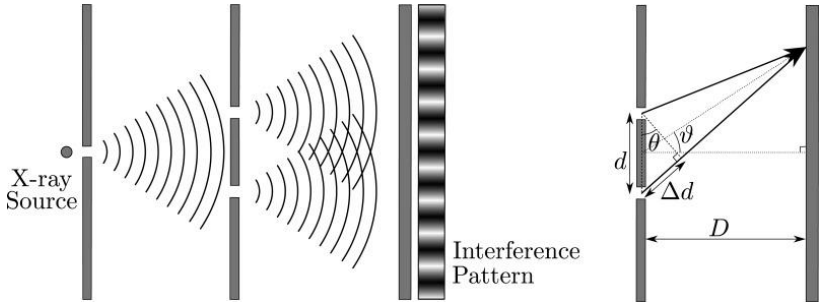
Obrázek 2.13 Elektromagnetické spektrum [17]

Jedním z parametrů světla je jeho rychlost šíření $c = 3*10^8\ ms^{-1}$ ve vakuu, která je nezávislá na frekvenci, avšak v jiných prostředích je rychlost menší a začíná být závislá na frekvenci [4].

Zavádí se také pojem absolutní index lomu, který definuje poměr rychlosti šíření světla ve vakuu ku její rychlosti v jiném prostředí.

Při průchodu elektromagnetického vlnění mezi dvěma prostředími dochází buďto k odrazu nebo také k difrakci. Difrakce je jev, při kterém dochází k rozložení světla dle frekvence jeho jednotlivých složek [7].

Dalším jevem elektromagnetického vlnění je interference (viz obrázek 2.14), ke které dochází při setkání dvou elektromagnetických vln při průchodu stejným prostředím. Výsledkem je součet či rozdíl těchto dvou vln dle jejich vzájemné frekvence a fázovému posunu. Tento jev se využívá k redukci odražených paprsků světla z čoček v objektivu. V běžném životě se s ním můžeme setkat u olejové skvrny na mokré silnici, ve které lze zahlédnout barevné kruhy způsobené právě interferencí. V praxi se často využívá Newtonových sklech, které interferencí odhalí případné vady povrchu materiálu. Na interferenci je založeno například měření vzdáleností předmětů, nebo ke kontrole rovinných a kulových ploch. [7] [30].



Obrázek 2.14 Interference elektromagnetického záření [18]

2.3 Vlastnosti obrazu

2.3.1 Snímání

Pro měření pomocí kamer je jedním z nejdůležitějších parametrů kvalita vstupních dat, se kterou pojí i vlastnosti a cena snímače. Snímačem se všeobecně myslí elektrotechnická součástka, schopna převádět informace z reálného světa na číslicová data. Snímač nám nejprve předá data v analogové formě, většinou jako elektrický signál. Přičemž jak měřená, tak získaná veličina jsou spojité v čase i v úrovni. U digitálních snímacích zařízení je potřeba ještě A/D převodník, který spojitý signál navzorkuje a zdiskretizuje [1].

Nejčastěji používanými typy snímačů v kamerách jsou CCD a CMOS [8].

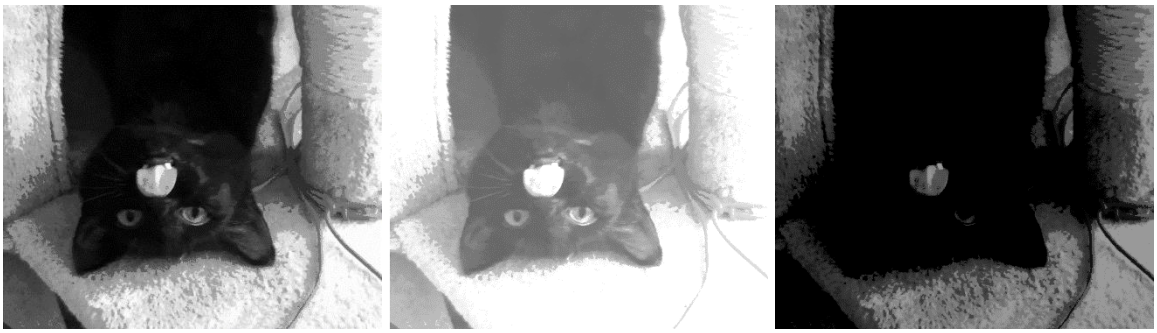
CCD [Charged Coupled Device] - zachycují fotony jakožto elektrické náboje, v jednotlivých fotobuňkách (fotosenzor reprezentující jeden pixel výsledného snímku). Snímač vysouvá akumulovaný náboj pomocí soustavy analogových posuvných registrů, který je následně zesílen a prostřednictvím dalších elektronických obvodů v kameře převeden na signál digitální. CCD snímače disponují lepšími vlastnostmi obrazu, než snímače CMOS avšak velkou nevýhodou je jejich složitější výroba a s ní spojena větší kupní cena [9].

CMOS [Complementary Metal Oxide Semiconductor] - obsahují zesilovač a A/D převodník pro každou fotobuňku zvlášť, umožňují tak přístup a možnost úpravy měřené informace pro jednotlivé fotobuňky. Zároveň poskytují na svém výstupu signál v digitální formě, tudíž jsou jednodušší na výrobu a dovolují snazší implementaci v dalších zařízeních. Tyto snímače se využívají v levnějších typech kamer a v běžných spotřebních zařízeních – telefonech, tabletech, počítačových kamerách a podobných [8] [9].

Standartním poměrem snímače u kamer je 4:3, lze se setkat i s kamerami s atypickým poměrem či rozměrem snímače, například u kamer řádkových.

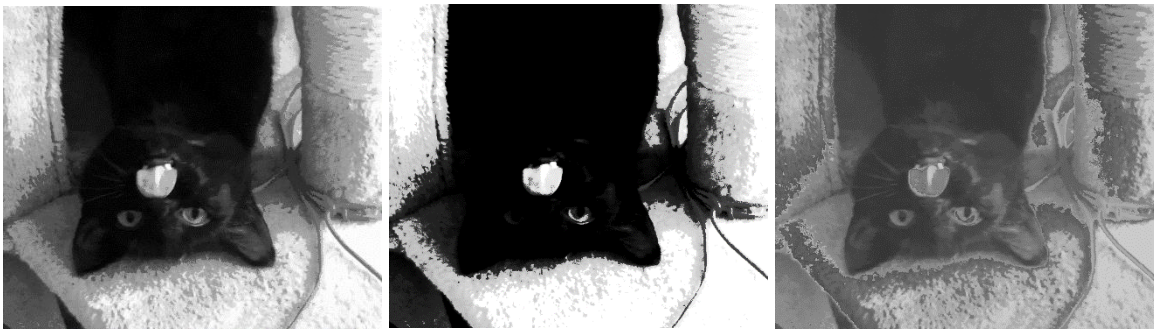
2.3.2 Jas, kontrast a barva

Jas je vlastnost obrazu reprezentující velikost snímané optické veličiny. V digitálním obraze lze jas měnit přičtením konstantní hodnoty, tedy zvýšením jasu, nebo odečtením, tedy snížením jasu, ke všem prvkům obrazové matice. Standartně mají jednotlivé pixely obrazu v rozmezí *0–255* hodnot, více v kapitole digitalizace [12].
Pro demonstraci v obrázku 2.15 lze vidět, že přičtením hodnoty 100 ke každému pixelu vstupního obrázku se obrázek zesvětlí, a naopak odečtením ztmavne.



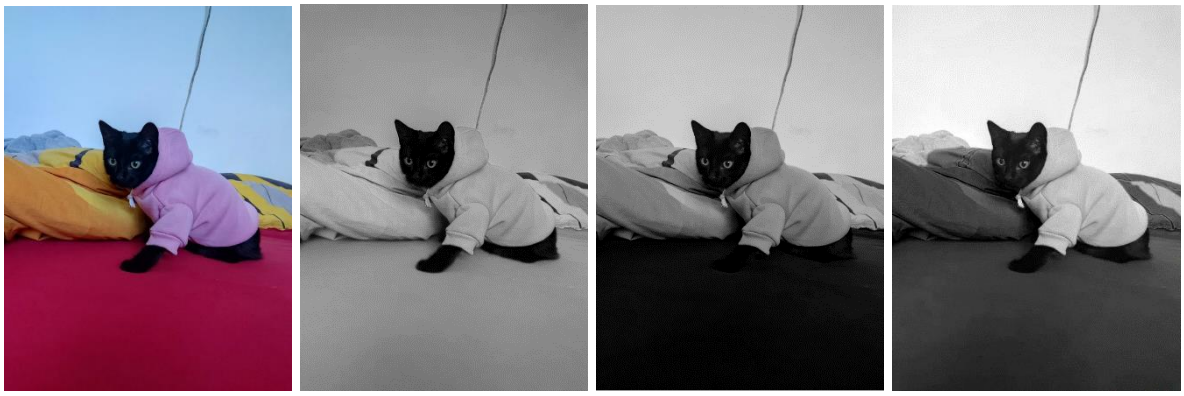
Obrázek 2.15 Černobílé snímky s původním, zesíleným a sníženým jasem

Kontrast uvádí absolutní či relativní rozdíl hodnot v obrazové matici. Kontrast se zvýší přičtením konstantní hodnoty k prvkům, které jsou nad průměrnou hodnotou kontrastu a odečtení této hodnoty u ostatních. Prahovou úroveň kontrastu, dle které se přičítá či odečítá hodnota, lze také nastavit manuálně.
Na následujících obrázcích je znázorněno zvýšení a snížení kontrastu. Pro obrázky byl vybrán práh na hodnotě 128. Na obrázku se zesíleným kontrastem (uprostřed) se přičetla hodnota 50 pro pixely s hodnotou nad 128 a odečetla pro ostatní. U obrázku se sníženým kontrastem (vpravo) se odečetla hodnota 50 pro všechny pixely s hodnotou nad 128 a přičetla pro ostatní [14]. Obrázek 2.16 zobrazuje jednotlivé úpravy kontrastu.



Obrázek 2.16 Černobílé snímky s původním, zesíleným a sníženým kontrastem.

V digitálním obraze je informace o barvě, resp. jednotlivých složkách barvy, uložena v třetím rozměru obrazové matice. Obrázek má barvy uloženy v jasových maticích pro každou barvu zvlášť. V monitorech, televizních obrazovkách a kamerách je často využíváno uložení ve formátu RGB čili v barvách červená, zelená, modrá.
V obrázku 2.17 je znázorněno vykreslení původního snímku (vlevo) a jeho jednotlivých barevných složek v pořadí červená, zelená, modrá. Každá barevná složka obsahuje monochromatickou informaci o jasu dané barvy. Při porovnání barevných složek oproti originálu je vidět, že červená barva prostěradla se ve snímku červené barvy jeví světle a v ostatních snímcích tmavě. V důsledku čím světlejší je pixel monochromatického snímku dané barvy tím dominantnější bude právě tato barva ve snímku barevném [14].



Obrázek 2.17 Snímky jednotlivých barevných složek obrazu

2.3.3 Ostrost

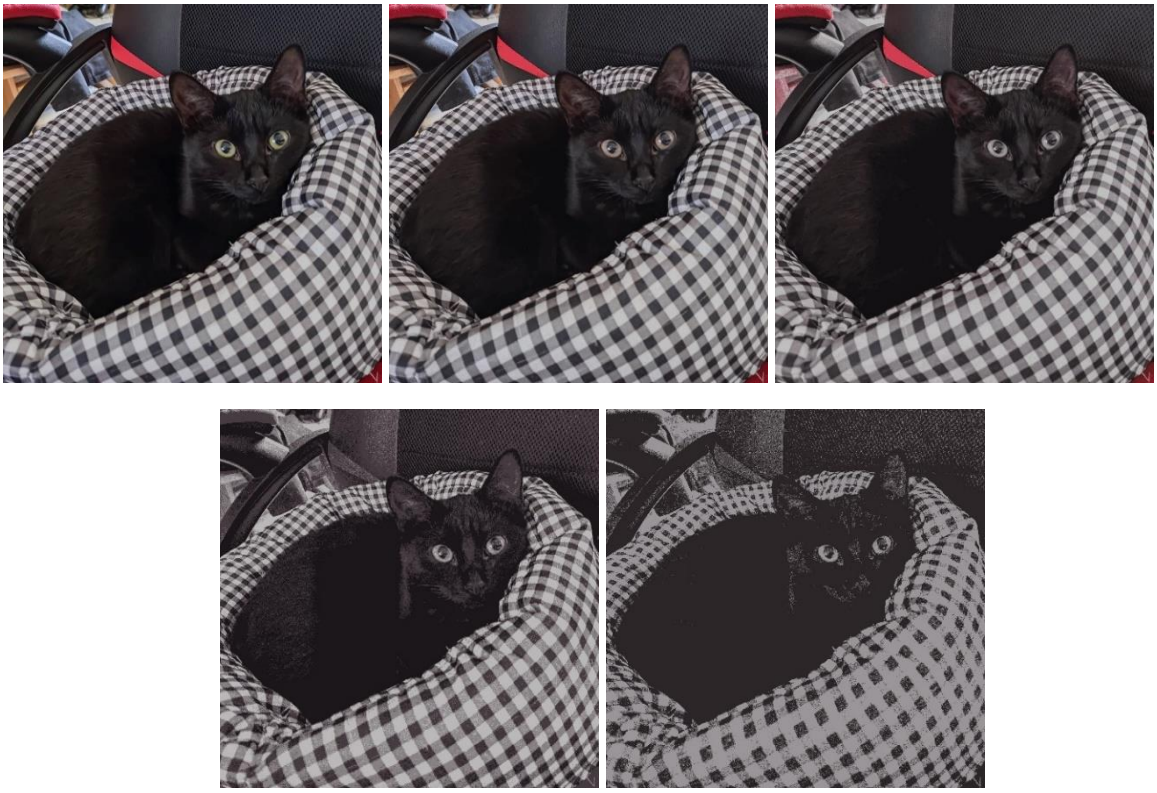
Ostrost obrazu popisuje velikost gradientu na rozmezí dvou kontrastních prvků obrazu. Rozmazání obrazu může být způsobeno několika faktory, nekvalitně zaostřeným objektivem, pohybem, nestabilitou kamery nebo případně jinými [20].

Digitální obraz lze přiostřit a tím redukovat rozmazanost, avšak ne vždy se docílí takové kvality, jako při odstranění příčin způsobujících rozostření (například správné zaostření objektivem). Algoritmy zvyšující ostrost obrazu jsou také náročné na výpočetní výkon. Ostření, podobně jako detekce hran, zvyšuje množství šumu v obraze, což může způsobit problémy s vyhodnocením obrazu při dalším zpracování [21].

2.3.4 Barevná hloubka

Každý pixel digitálního snímku může nabývat hodnot 2^N úrovní, kde N reprezentuje počet bitů. Pro zachování přijatelné kvality je standartně uložen v 8bitovém formátu, pro který nabývá hodnot 0–255. Barevná hloubka je založena na stejném principu jako jas pixelu s rozdílem, že se aplikuje na celý snímek pro všechny barvy. Redukcí barevné hloubky můžeme zvýraznit oblasti snímku se stejnou barvou. Při uložení všech tří barevných map má pixel tohoto snímku 24 bitů (8 bitů pro každou barvu) [10].

V následujících obrázcích lze vidět rozdíl mezi jednotlivými barevnými hloubkami snímků. Původní barevný obrázek 24bitový se zredukoval na: 18bit, 12bit, 6bit a 3bit snímek, jejich podoba je znázorněna na obrázku 2.18.



Obrázek 2.18 Snímky se sestupnou barevnou hloubkou obrazu

2.4 Zpracování obrazu

U každého získaného obrazu je zapotřebí provést tzv. předzpracování obrazu. Pomocí, kterého lze zlepšit kvalitu, odstranit šum, přiostřit či jinak upravit vstupní obraz a tím redukovat jeho nedostatky [11].

Cílem zpracování obrazu je vytvoření jednoznačnosti v objektech na scéně a usnadnění práce, například při rozpoznávání jednotlivých objektů. Velká část operací zpracování obrazu je protichůdná. Příkladem by mohla být filtrace šumu, kterou se zároveň zredukuje ostrost obrazu a naopak. Výsledný zpracovaný obraz je tedy kompromisem mezi všemi možnými úpravami.

2.4.1 Digitalizace

Digitalizace je proces převodu analogového signálu získaného snímačem na digitální data. Jedná se o převod spojitých veličin na veličiny diskrétní. Umožňuje další číslicové zpracování obrazu pomocí výpočetní techniky.

Vzorkováním obrazové funkce $f(i, j)$, kde i a j jsou souřadnice v prostoru vzniká matice o rozměrech M a N bodů s hodnotami uloženými do K úrovní. Úrovně jednotlivých prvků digitálního obrazu jsou vždy uloženy v 2^N formátu, kde N představuje počet bitů. Často 2^8 bit, tedy může nabývat hodnot 0-255**.** Při vzorkování platí Shannonova věta, která požaduje dvojnásobnou vzorkovací frekvenci, než je frekvence vzorkovaného signálu [12].

Základním parametrem digitálního obrazu je rozlišení, které udává velikost vzniklé matice obrazu. Je úměrné kvalitě, nebo také kvantitě, získaných informací. Často se vyjadřuje ve velikosti počtu pixelů [px] ale také i jako hustoty rozlišení na jednotku plochy např. PPI [Pixel per inch]. Při digitalizaci musíme zvážit velikost rozlišení digitálního obrazu, při nízkém rozlišení totiž dochází k velké ztrátě informací analogového signálu snímače. Přičemž pro digitalizaci do velkého rozlišení potřebujeme velký výpočetní výkon [10].

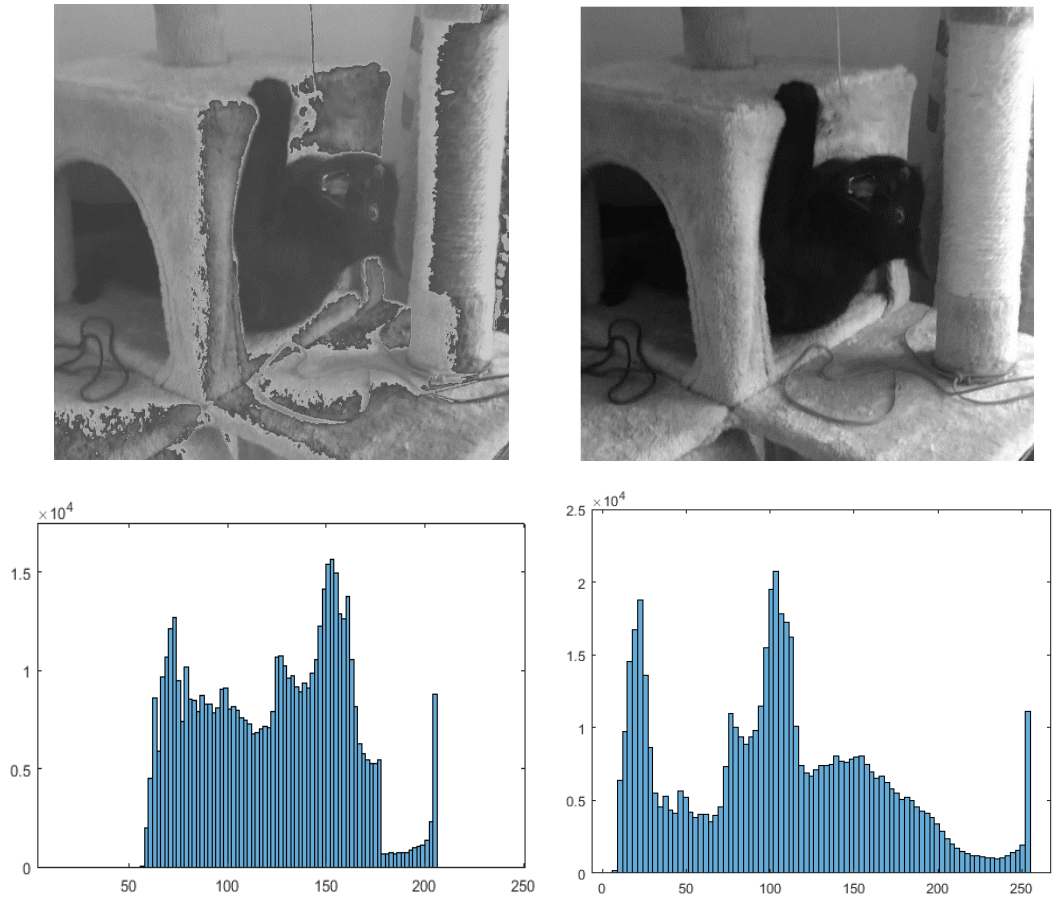
Nejčastěji mají jednotlivé prvky digitálního obrazu čtvercovou základnu, avšak v některých aplikacích se využívá také hexagonální. Čtvercová základna je vhodná na jednoduché zpracování pomocí výpočetní techniky, umožňuje mimo jiné také Laplaceovu transformaci, která není hexagonální základny možná, ale poskytuje lepší přesnost měření v obraze [12].

2.4.2 Histogram a ekvalizace histogramu

Každý digitální obraz je možné reprezentovat pomocí tzv. histogramu. Ten představuje funkci úrovně jasu na četnosti hodnoty v obrazové matici. Pomocí histogramu se dále zjišťuje například kontrast, světlost nebo tmavost scény [11].

Ekvalizací histogramu se myslí normalizace rozložení hodnot napříč celým histogramem. Umožňuje zvětšení kontrastu či saturace v barevném obraze, a tím i detekci jednotlivých předmětů.

Příklad použití ekvalizace histogramu je zobrazena v obrázku 2.19.



Obrázek 2.19 Princip ekvalizace histogramu

2.4.3 Prahování

Je proces rozlišení požadovaných objektů, popředí od pozadí. Prahováním vznikají dvě či více části v histogramu obrazu, dle kterých lze snadno rozeznat mezi chtěným objektem a pozadím. Počet nastavených prahů má dopad na počet částí v histogramu obrazu. Avšak správné nastavení hodnoty prahu může být náročné [11].

V obrázku 2.20 je zobrazeno využití jednoho prahu v obraze. Prahováním vzniká binární obraz, kdy popředí či chtěný objekt označujeme hodnotou 1 a zbytek obrazu hodnotou 0.

Obrázek 2.20 Princip prahování obrazu

2.4.4 Filtrace šumu

Filtrace ve zpracování digitálního obrazu se využívá především k odstranění šumu, který může vznikat několika způsoby. Hlavním zdrojem šumu může být například snímač, u kterého je způsoben fyzikální podstatou snímače (často je nutné snímač chladit, a tak tento fyzikální šum redukovat). Nebo také dalším zpracováním signálu ze snímače, kdy se přidává šum elektrický, který může být několikrát vyšší než šum způsobený snímačem. Je nutné zmínit, že každý digitální obraz obsahuje určité množství šumu. Přístup k filtraci digitálního obrazu může být různorodý, záleží totiž na množství a druhu šumu v daném snímku. [13].

Průměrový filtr

Nejčastěji používaný filtr je průměrování hodnot v rámci masky, typicky o rozměrech 3x3. Výhodou tohoto filtru je jeho jednoduchost a rychlost. Avšak velkou nevýhodou je ztráta detailu hran a celkové „zamlžení“ výsledného snímku. U filtru využívající průměrování se využívá konvoluce neboli průměrování z okolních hodnot obrazu [19].

V případě úvahy konvoluční matice o velikostech 3x3 by platila podoba

$$\begin{pmatrix} 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \end{pmatrix}, \tag{2.3}$$

kde se jednotková matice násobí převrácenou hodnotou druhé mocniny rozměru matice.

Obrázek 2.21 Příklad filtrace šumu pomocí průměrování

Mediánový filtr

Na rozdíl od filtru průměrového se hledá střední hodnota posloupnosti čísel. Například v maticové masce o rozměrech 3x3 se hledá takové číslo, jenž je ve středu posloupnosti čísel od nejmenšího po největší (nebo naopak) [11].

Pro demonstraci můžeme uvažovat matici $\boldsymbol{H}$:

$$\boldsymbol{H} = \begin{pmatrix} 3 & 14 & 8 \\ 6 & 11 & 10 \\ 2 & 7 & 12 \end{pmatrix} \tag{2.4}$$

Vytvořením vzestupné posloupnosti čísel v matici získáme: 2, 3, 6, 7, **8**, 10, 11, 12, 14, kdy číslo 8 je námi hledaná střední hodnota konvoluční masky. Tímto způsobem hledáme mediány skrze celý obraz [11]. Ukázka filtrování pomocí mediánového filtru je v obrázku 2.22.

Obrázek 2.22 Příklad filtrace šumu pomocí mediánu

Gaussovský filtr

Jedná se o rozšíření průměrového filtru o Gaussovské rozložení. Toto rozložení musí být upraveno hranicemi, jelikož pravé Gaussovo rozložení je nekonečné. Aplikuje se pomocí konvoluční masky na jednotlivé body obrazu. Na rozdíl od průměrového filtru nedochází k tak velké ztrátě informace. Výpočet hodnoty pixelu Gaussovského filtru [19]

$$G(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2*\pi}*\sigma^2} * e^{-\frac{x^2+y^2}{2*\sigma^2}}, \tag{2.5}$$

kde σ ovlivňuje sílu filtru. Filtrování Gaussovským filtrem je znázorněno v obrázku 2.23.

Obrázek 2.23 Příklad redukce šumu Gaussovským filtrem

2.4.5 Detekce hran obrazu

Hrany jsou jedny z nejdůležitějších informacích v digitálním obraze. Pomocí hran jsme schopni detekovat různé části scény nebo případně detekovat požadovaný objekt. Hrana v obraze je v principu místo s velkým gradientem obrazové funkce, tj. místo s nenulovou derivací. Jelikož je obraz dvojrozměrný, hrany mají různé směry v obrazové funkci, k detekci hran odlišných směrů se proto musí obrazová funkce parciálně derivovat dle směru, který hledáme [14].

Detekci hran lze také chápat jako vysokofrekvenční filtr, kdy právě hrany obrazu představují místa s vysokou frekvencí v obraze [14].

Velký problém při detekci hran představuje šum, který podobně jako hrana má nenulovou derivaci obrazové funkce. Tudíž při detekci hran zároveň detekujeme šum v obraze. Což nám při detekci objektu může způsobovat nechtěné problémy [14].

V následujícím obrázku 2.24 jsou znázorněny detekce hran z původního obrázku. Nejprve v ose x, v ose y a v obou osách zároveň [14].

Obrázek 2.24 Princip detekce hran v obraze

2.5 Transformace obrazu

S dvourozměrným signálem lze pracovat podobně jako s běžným jednorozměrným signálem. Pro obraz (2D reprezentace) je možné použit všechny běžné transformace, tak jako u jednorozměrného signálu. Jedná se například o Fourierovu, Hartleyovu, Houghovu, Haarovu, Radonovu transformaci, případně další. Všechny z těchto transformací ovlivňují obraz jako celek, nespecifikuje se u nich tedy žádná oblast v obraze, jsou proto známy pod názvem globální operace. [31]

2.5.1 Geometrická transformace obrazu

Jak už z názvu transformace vyplývá jedná se o druh transformace, která nám upravuje pozici informace v obraze. Pro představu jedná se o přibližování, posouvání, otáčení, zkosení, zaoblení a další optické úpravy obrazu. Variant, jakým způsobem obraz upravit je několik. Jednotlivé úpravy mohou být realizovány pomocí funkce, která udává formu vstupně-výstupní transformace. [31]

$$X_0' = X_0; Y_0' = Y_0 \Rightarrow \mathrm{g}[X_0, Y_0] = \mathrm{f}[X_0', Y_0'] = \mathrm{f}[X_0, Y_0] , \tag{2.6}$$

$$X_0' = aX_0; Y_0' = bY_0 \Rightarrow \mathrm{g}[X_0, Y_0] = \mathrm{f}[M_x\, X_0, M_y\, Y_0] , \tag{2.7}$$

$$X_0' = -X_0; Y_0' = -Y_0 \Rightarrow \mathrm{g}[X_0, Y_0] = \mathrm{f}[-X_0, -Y_0] , \tag{2.8}$$

Tyto rovnice popisují matematickou podstatu geometrických úprav obrazu. Pro ukázku byla zvolena identická transformace, rovnice 2.6, která původní obraz nijak nemění. Důležitou transformací, pro naši aplikaci, je změna měřítka, vycházející z rovnice 2.7. Tato transformace bude později využita pro zpracování obrazu z řádkové kamery. Rovnici 2.8 lze využít pro otočení obrazu o 180°. Ostatní druhy geometrických transformací pro účely 3D měření nebudou používána.

Geometrické transformace narážejí na dva zásadní problémy. Jedním z nich je spojitost transformační funkce v diskrétním obraze. Je tedy zásadní, aby pro nejpřesnější aproximaci chtěné transformace měl obraz co největší rozlišení. Při nižším rozlišení může docházet k velkým odchylkám. Dalším je odstranění částí obrazu mimo scénu. K tomuto může docházet například při přiblížení obrazu, kdy část z původní scény může ležet mimo zobrazovanou plochu obrazu. Je třeba si uvědomit, že při takovéto úpravě nadobro ztrácíme všechny data ležící mimo zobrazovanou plochu obrazu a není způsob, jak tyto data získat zpět. Proto je důležité zachovat původní soubor a veškeré modifikace dělat až jeho kopiím. [32]

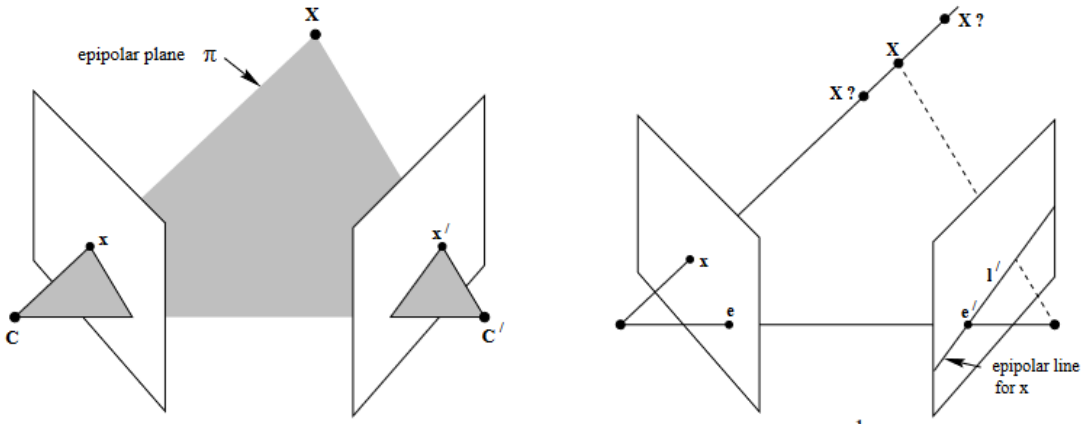
2.6 Epipolární geometrie a fundamentální matice

Při vytvoření 3D modelu na počítači, ať už se jedná o model v počítačové hře, nebo modelovacím software jako je například Blender, se musí daný 3D model převést na 2D průmět. Tento převod není nijak výpočetně ani matematicky náročný, lze využít poznatků deskriptivní geometrie, přičemž ve světě počítačů je zapotřebí znát pouze rotaci a pozici plátna, na které se daný model promítá.

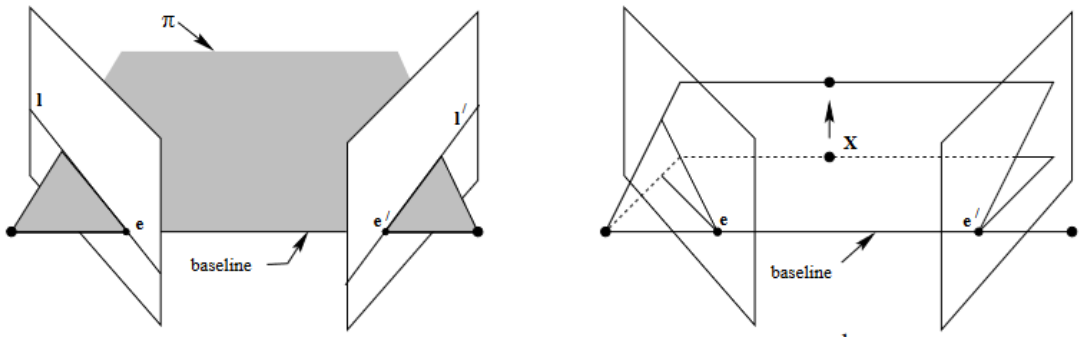
2.6.1 Epipolární geometrie

Epipolární geometrie se zabývá přesně opačnou problematikou, tj. jak získat hloubku obrazu (třetí rozměr) z dvou 2D snímků, zvaných stereo pár. Získání hloubky je realizováno hledáním stejných prvků v stereo páru a následným porovnáním jejich pozice. Prvky v obraze mohou být dvojice bodů, hrany, případně jiné. Všeobecně platí, že čím větší množství prvků je v obraze nalezeno, tím přesnější bude informace o jeho hloubce. [34]

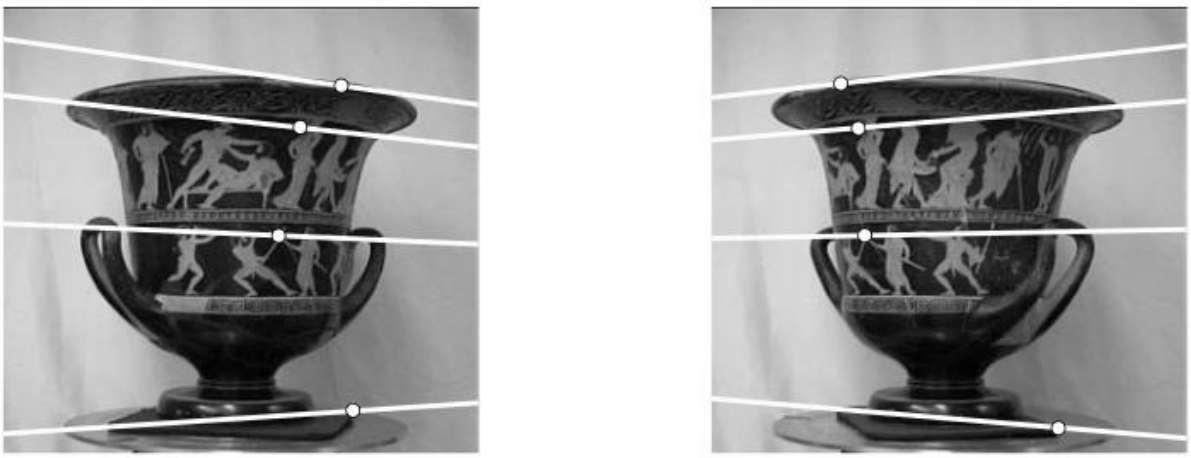
Pro zjednodušení lze uvažovat nalezení páru bodů v obou snímcích obrazu. Tyto dva body, které můžeme nazvat body x pro první scénu a x‘ pro scénu druhou a adekvátně e a e‘ pro druhý bod. Při proložení těchto bodů přímkou l v prvním obraze a přímkou l‘ v obraze druhém lze uvažovat vytvoření společné roviny π mezi oběma snímky. Nutným předpokladem je, že středy kamer C a C‘ jsou kolmé k průmětnám obrazu. V případě, že je třeba detekovat daný prvek v prvním obraze, který se nachází mezi body l a e, je tak jisté, že se musí nacházet někde mezi body l‘ a e‘ v obraze druhém. Právě samotná diference pozice v druhém obraze nám udává informaci o jeho hloubce. [34]



Obrázek 2.25 Epipolární plocha π [33]



Obrázek 2.26 Náklon epipolární roviny π [33]



Obrázek 2.27 Detekce similarit ve stereo páru [33]

2.6.2 Fundamentální matice

Fundamentální matice popisuje vztah mezi průmětem bodu v prvním snímku a jeho pozicí ve snímku druhém na epipolární přímce. Prvním krokem k získání fundamentální matice je zapotřebí zjištění homografie H_π, která popisuje mapování libovolného bodu z první kamery do druhého, ležícího na stejné rovině. Platí:

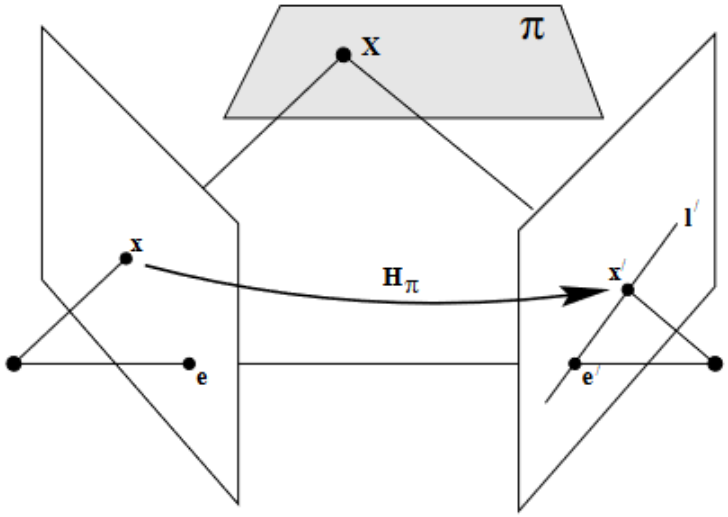
$$F = e' * H_\pi \,, \tag{2.9}$$

kde *F* je fundamentální matice a *e'* je bod v druhém obraze.

Zároveň platí, že:

$$x'^T * F_x = 0 \,, \tag{2.10}$$

Tato podmínka zaručuje, že dva body ležící na epipolární přímce referují na jeden stejný prvek v prostoru.

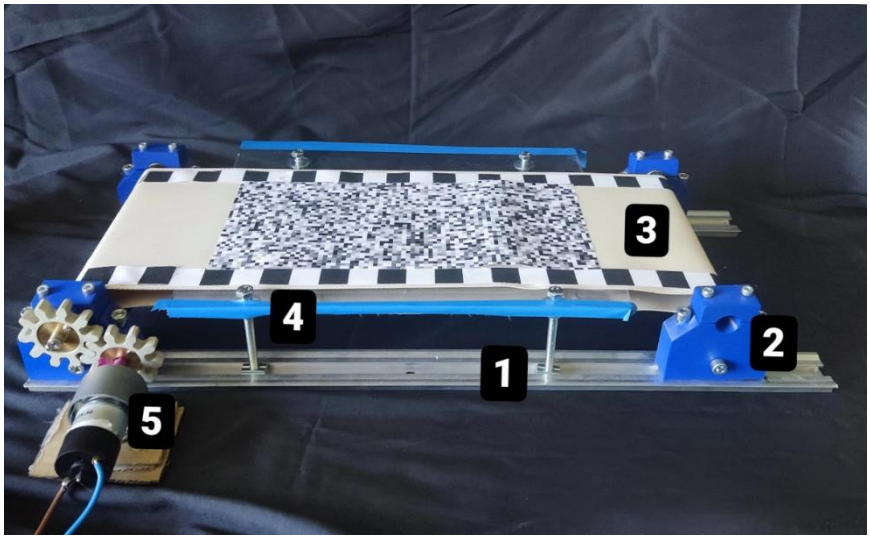


Obrázek 2.28 Homografie epipolární roviny π [33]

3. 3D MĚŘENÍ POMOCÍ ŘÁDKOVÝCH KAMER

3.1 Vytvoření testovacího pracoviště

K zajištění kvality snímků jsem se inspiroval praktickým využitím řádkových kamer, a to na dopravníkových pásech při kontrole kvality výrobků. Proto byl vyroben model dopravníkového pásu.



Obrázek 3.1 Model dopravníkového pásu

Pás se skládá z pěti hlavních částí označených čísly na obrázku 3.1:

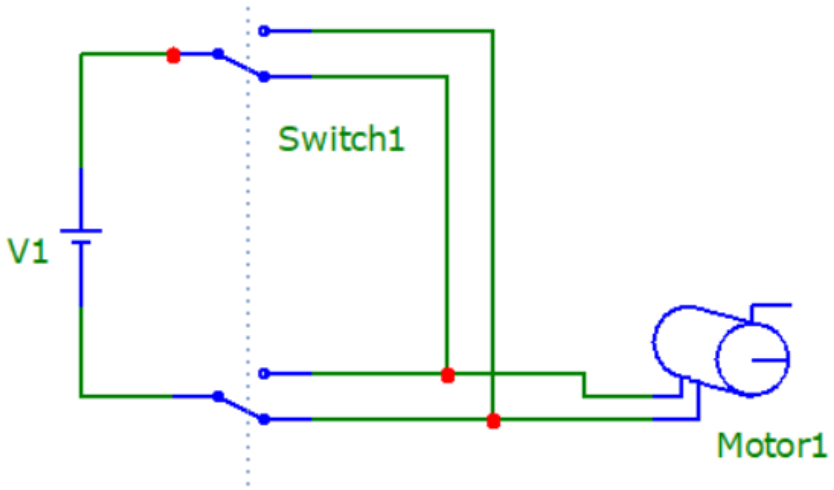
[1] Kolejnice, která umožňuje napnutí pásu a nastavení orientace pásu, aby při běhu nesjížděl do stran.

[2] Nosníky, které byly modelovány v programu Fusion 360 a vytisknuty na 3D tiskárně. Válce s ložisky, využity z balícího stroje. Přičemž ložiska zapadají do vykrojení na nosnících. Ložiska jsou drženy podobně jako ojnice na hřídeli spalovacího motoru – shora 3D výtisky ve tvaru „U“.

[3] Samotný pás z PVC materiálu o dostatečné délce mezi dva válce. Pás bylo potřeba ze spodní strany kvalitně prošít k zajištění potřebného napnutí. Při propnutí by totiž docházelo ke zkreslení měření poklesem měřeného předmětu. Kvůli nízkému jasu prvních snímků byl pás nasvícen LED světlem. Pro budoucí měření by bylo vhodné vyměnit světlo za průmyslové, ideálně nějaké speciální pro řádkové kamery. I přes veškeré úsilí pás nasvítit byly získané snímky vcelku tmavé, což však nemělo zásadní vliv na měření.

[4] Akrylová podložka, která byla doplněna po několika měřeních pod vrchní část pásu, k zajištění nulového propadnutí předmětu běžícího na páse. V provozu toto bývá zajištěno větším množstvím válců pod pásem.

[5] 24 V DC motor s ozubenými koly, který byl využit k pohonu pásu. Při měření byl napájen počítačovým zdrojem 12 V. Celý obvod byl ještě doplněn o přepínač směru otáčení, který po přepnutí obrací polaritu motoru. Schéma zapojení je znázorněno na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2 Model dopravníkového pásu

3.2 Snímání pomocí řádkových kamer

Při snímání scény kamerami bylo zapotřebí zajistit minimální vliv jejich geometrického nastavení. Proto kamery byly uchyceny na třínohé kamerové stativy. Řádkové kamery měly na těle několik připravených závitů k uchycení do průmyslových kamerových stojanů. Pro náš případ byly proto vytištěny redukce na 3D tiskárně pro možnost použití klasické kamerové redukce do stativu – rychloupínací destičky.

Pomocí stativů byly kamery umístěny do požadovaných poloh a sklonů. Po několika kontrolních měřeních bylo potřeba upravit jejich pozice k minimalizaci chyb měření.

Řádkové kamery Basler používané při měření využívají GigE komunikace, byly tedy připojeny pomocí LAN kabelu. Jelikož základní deska stolního počítače měla pouze jeden LAN port bylo nutné druhou kameru připojit redukcí z GigE na USB. Toto zapojení nebylo ideální, avšak při správném nastavení IP adres kamer nedocházelo k žádným problémům s připojením ke kamerám. Pro kontrolu funkce kamer se využíval program Pylon Viewer. Ten umožňuje kontrolu IP adres kamer podprogramem Pylon IP Configurator a jejich případné přenastavení. Při komunikaci přes GigE připojení je zapotřebí nastavit každou kameru na různou IP adresu, to slouží k jejich odlišení a možnosti snímání buďto jednou kamerou, kterou si uživatel vybere, nebo oběma zároveň. Ke stabilnímu připojení je také zapotřebí nakonfigurovat nastavení sítě každé kamery. [35]

Řádkové kamery nám poskytují v rámci programu Pylon Viewer dvě možnosti zobrazení. Lze získat buď jednotlivý snímek z kamery nebo živý přenos videa z kamery. Pomocí programu

Matlab se současným využitím Computer Vision, Image Processing, Image Acquisition toolboxů byla výstupní data kamery dále zpracovávána.

3.3 Získání snímků k měření

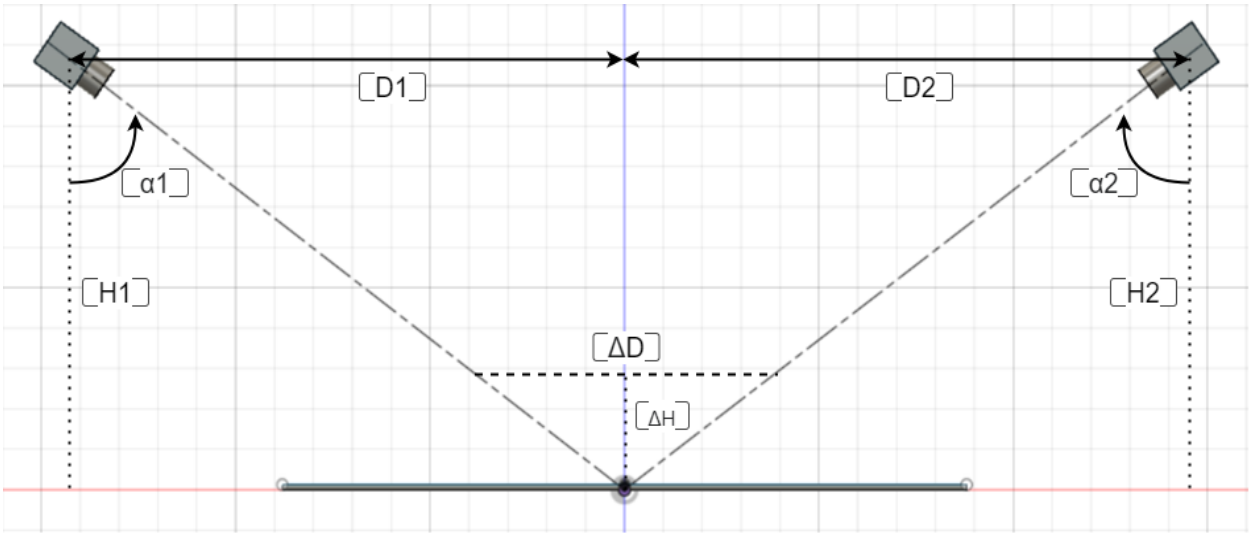
Základním formátem řádkových kamer Basler je video. Každý snímek videa má rozlišení 256x6144 px. Přičemž čip řádkové kamery skutečně snímá pouze 1x6144 px, avšak ze zásobníku posílá snímky s 256 řádky. V našem případě bylo využíváno osmibitového černobílého videa, k minimalizaci přenášeného objemu dat. Kamery Basler umožňují i jiné formáty nahrávání videa, jako například mono 12 packet a mono 12 – oba dvanáctibitové formáty. [35] Řádkové kamery, které byly využívány pro zisk snímků neumožňují barevné video, pokud by uživatel tento formát videa požadoval musel by si zvolit jiný model kamery.
K zobrazování živého přenosu obrazu z kamery bylo využito programu Pylon Viewer, který se využíval především pro živý přenos videa, při nastavování kamer vůči pásu, například aby byly kamery kolmé na pás a nezkreslovaly tak měření. Ostatní problematika zisku a snímání kamer byla realizována pomocí Matlabu.
Jelikož i při dobře nasvíceném páse měly snímky, bez úprav nastavení kamery, velmi nízký kontrast, musely se upravit vnitřní parametry kamery. Především doba expozice pod položkou *ExposureTimeRaw* a nastavení jasu *GainRaw*. Tato nastavení lze provést několika způsoby, a to *Image Acqusition toolboxem* nebo konfigurací vnitřních proměnných kamer. Po úpravách parametrů kamery měly snímky dostačující kvalitu k našemu měření. Pás byl snímán frekvencí 30 snímků za vteřinu po dobu 5ti až 8mi sekund, v závislosti na rychlosti pásu. Všechny tyto nastavení a zisk videa z kamer byl realizován pomocí skriptu *FrameMergeV2.m*
Z nasnímaného videa bylo zapotřebí vytvořit snímek. Proto jsem vytvořil skript v programu Matlab *GetFrame.m*. Pro usnadnění práce a rychlosti generování snímků jsem snížil kvalitu původního videa, respektive snímku, o 60 %. Přičemž i s touto redukcí měly získané snímky dostatečné rozlišení pro přesné měření. Zároveň byla vybrána oblast zájmu neboli oblast, ze které se bude měřit. Oblast zájmu se nastavuje šířkou do jednotlivých směrů od středu snímku a pořadím začátku a konce snímků z videa. Při zpracování se například vybíral 70. – 140. snímek videa, v tomto okně se právě nacházel námi měřený předmět. Po upřesnění oblasti zájmu se spouští algoritmus skládání jednotlivých řádků videa pod sebe k zisku výsledného snímku. Algoritmus prochází oblast zájmu a do nové matice ukládá hodnoty pixelů s danými souřadnicemi. Tento proces je nejzdlouhavějším z celého zpracování dat, řádově trvá až desítky minut. Pro optimalizaci tohoto algoritmu by bylo vhodné použít například paralelní programování, které by dokázalo vykreslovat různé části snímku zároveň. Výsledný snímek získaný proložením řádků vybrané oblasti je poté uložen v *.mat* souboru pro další zpracování.
Snímek získaný skriptem *GetFrame.m* je dále potřeba upravit, zejména jeho poměr stran k normalizaci měřítka v jednotlivých osách snímku. K daným úpravám využívám skriptu *Resize.m*. V první části kódu se upravuje snímek s poměrem stran 3:4 z důvodu snazšího vyhledávání hran, případně koleček v obraze. Poté se hledají rohy dvou postranních čtverců na páse, u kterých je známý poměr stran 1:1. Po zjištění lokace rohů se vypočítá korekce poměru,

která se aplikuje na snímek. Výsledný rozdíl v měřítku jednotlivých os by se neměl projevit na kvalitě výsledků, jelikož se při měření vychází pouze z jedné osy v obraze.
Pro další zpracování obrazu, konkrétně nalezení referenční linie obou kamer pro měření, byl vytvořen skript *GetCorners.m,* který hledá dva rohy postranních čtverců v obraze. Po nalezení rohů se ukládají jejich souřadnice v obraze a dochází k vykreslení referenční linie v každém snímku. Referenční linie se pro lepší orientaci v obraze vybrala na začátku předmětu. Důležitým faktem je aby referenční linie vycházela ze společného místa pro oba snímky.
Samotné měření v obraze je realizováno aplikací *Calculate_FindCircles.m*, která plní účel detekce koleček na předmětu, uložení jejich pozice a výpočet diference bodů mezi snímky a tím i výšky předmětu. Tato problematika je vysvětlena v kapitole 3.4.
Tento postup je zapotřebí udělat pro data každé kamery zvlášť. Výsledky jednotlivých skriptů jsou k nahlédnutí v příloze D.

3.4 Princip 3D měření pomocí řádkových kamer

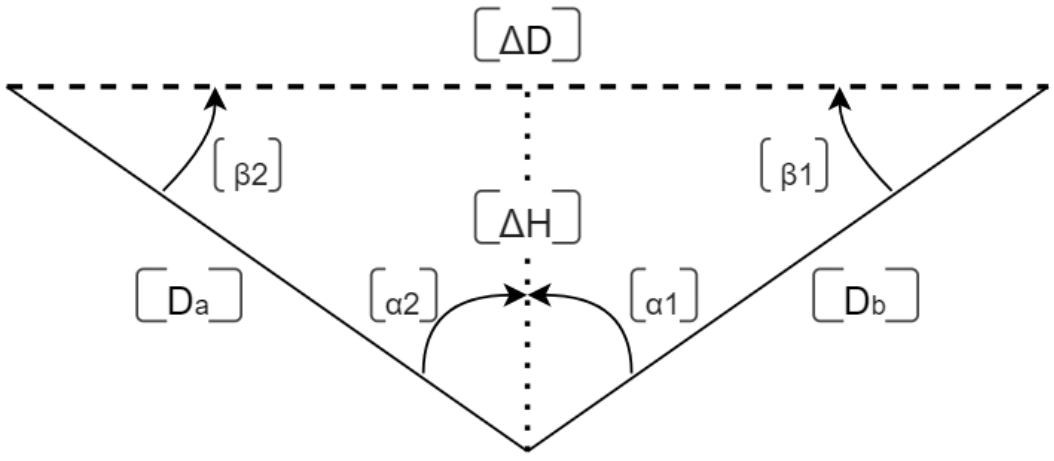
Řádkové kamery na rozdíl od klasických kamer plošných snímají pouze úzký řádek scény. Z tohoto důvodu nám řádková kamera vytváří minimální zkreslení, a to pouze v řezu snímání. Perspektivu podobnou jako kamery plošné můžeme tedy částečně zanedbat. Jsme ale stále závislí na několika faktorech.
Prvním faktorem hrajícím roli při měření je úhel natočení kamery vůči běžícímu pásu. Pokud kamera není přesně kolmá vůči pásu dochází ke zkreslování nasnímaných snímků a zároveň k nepřesnostem měření. Dalším faktorem ovlivňujícím přesnost snímání je rychlost dopravníkového pásu. V ideálním případě požadujeme rychlost konstantní, jelikož i frekvence snímání kamery není proměnná. Při nekonstantní rychlosti pásu by tak mohlo docházet ke zkreslení snímku. Budeme-li uvažovat předmět jedoucí na páse určitou rychlostí, tak při jejím zvětšení by se objekt jevil menší, než ve skutečnosti je. Naopak při jejím zpomalení by se předmět roztáhl přes celý snímek. Pro zachování informace o měřítku na páse se využívají postranní značky, u kterých víme jejich skutečné rozměry a jsme tak schopni zkreslení snímku detekovat, případně i provést jejích korekci.
Pro standardizaci dat bylo zapotřebí najít způsob, jak přepočítat vzdálenost v obraze v pixelech na milimetry. V kapitole 3.6 jsou využívány různé metody přepočtu snímaného předmětu v pixelech na rozměry reálného předmětu v milimetrech. Pro zjednodušení implementace přepočtu vzdáleností v obraze na rozměry ve skutečnosti byly kamery nastaveny do specifických orientací. Pro optimalizaci měření by bylo zapotřebí brát v úvahu jakékoliv odchylky od požadované orientace a pozice kamer a tím redukovat velikost vzniklé chyby. Jednou z metod je stanovení převodu pomocí vzdálenosti dvou koleček v obraze. Kolečka mají mezi sebou stejné rozestupy s definovanou známou vzdáleností, na jejichž základě stanovíme, kolik pixelů v obraze odpovídá jednomu milimetru ve skutečnosti. Pro druhou metodu přepočtu byly využívány postranní čtvercové značky se stejným postupem jako u koleček. Ty se nakonec ukázaly být přesnějším způsobem, jak standardizovat měřené výsledky ze snímků na milimetry.
Speciálním případem bylo měření výseku elipsoidu v kapitole 3.6.4 kdy se měřítko zjišťovalo

z poměrů stran postranních čtverců na páse, tato metoda se ukázala být velice nepřesná a způsobila tak velké odchylky měření.



Obrázek 3.3 Trigonometrie měření

Princip měření řádkové kamery vyplývá z geometrie měřícího aparátu znázorněné na obrázku 3.3. Při měření je zapotřebí znát polohu kamer, konkrétně jejich výšku *H* vůči pásu a vzdálenost od středu pásu *D*. Z těchto parametrů lze zjistit úhel kamery vůči pásu *α*. Z obrazu je poté zapotřebí zjistit velikost *ΔD*, která je lineárně závislá na výšce předmětu. Tento parametr se zjistí změřením vzdálenosti bodu na předmětu od referenční linie ležící na podstavě (páse) a následným odečtením jednotlivých vzdáleností ze snímků. Pro zjištění výšky předmětu je zapotřebí vycházet z trojúhelníku znázorněném na obrázku č. 3.4.



Obrázek 3.4 Trigonometrie měření

Pro obecný trojúhelník platí sinova věta ve vzorci 3.1, pomocí které jsme schopni vypočítat výšku předmětu.

$$\alpha_{1,2} = \alpha_1 + \alpha_2 \,, \tag{3.1}$$

$$\frac{\Delta D}{\sin \alpha_{1,2}} = \frac{D_a}{\sin \beta_1} = \frac{D_b}{\sin \beta_2} \text{, dále platí:} \tag{3.2}$$

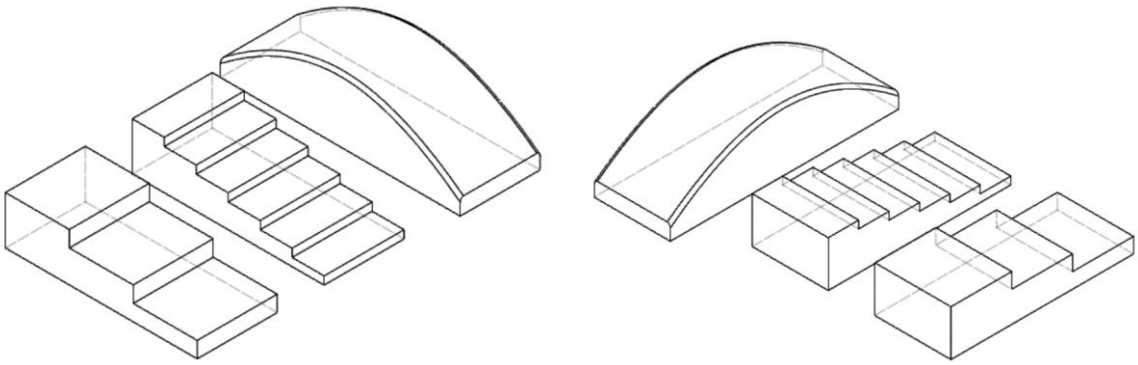
$$\cos \alpha_1 = \frac{\Delta H}{D_2} \wedge \cos \alpha_2 = \frac{\Delta H}{D_1} \text{, z čehož se } \Delta H \text{ vypočítá:} \tag{3.3}$$

$$\Delta H = \frac{1}{2}(D_b \cos \alpha_1 + D_a \cos \alpha_2) \text{ , po úpravě:} \tag{3.4}$$

$$\Delta H = \frac{1}{2} \frac{\Delta D}{\sin \alpha_{1,2}} (\sin \beta_1 \cos \alpha_1 + \sin \beta_2 \cos \alpha_2) \tag{3.5}$$

3.5 Měřené předměty

Pro kontrolu měření se využívalo několik typů různých geometrických předmětů. U prvních pokusů byly používány dřevěné destičky s přibližným rozměrem 51 x 117 mm, z důvodu větší přesnosti referenčního měření pomocí posuvného měřítka byly pro další měření modelovány další předměty využitím software Autodesk Fusion 360. Tyto předměty byly vytisknuty pomocí 3D tiskárny.



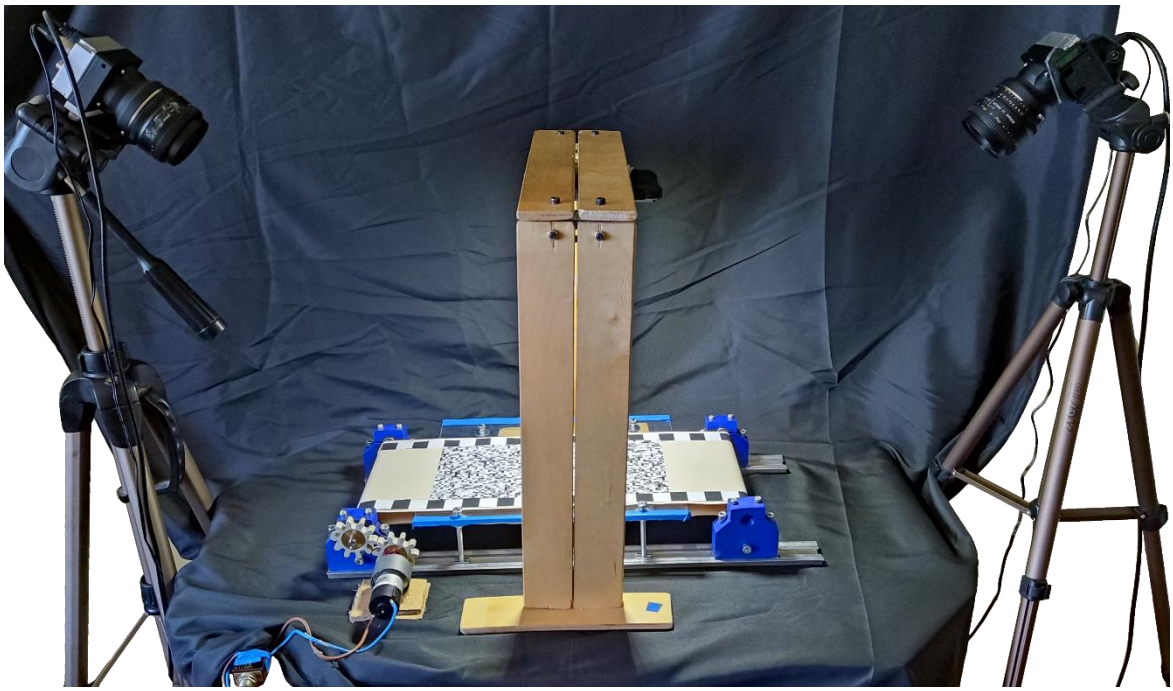
Obrázek 3.5 Modely měřených předmětů z programu Fusion 360

Dva druhy schodišť, které mají společnou maximální výšku 30 mm přičemž se liší velikostí schodů a to 5 a 10 mm. Obě schodiště mají základnu o rozměrech 50 x 120 mm. Dále byl vytisknutý výsek elipsoidu pro ověření měření výšky spojitých předmětů. Výsek elipsoidu má proměnnou výšku od 10 do 40 mm jeho podstava má rozměry 50 x 150 mm.
Důvodem, proč byly předměty vytisknuty na 3D tiskárně je zajištění neměnných rozměrů. Při použití měkčího materiálu, jako například výseku z PET lahve by mohlo docházet k různým

výsledkům měření způsobených prohnutím materiálu při pohybu po páse. Zároveň při použití kovových materiálů by váha mohla začít ovlivňovat plynulost pohybu pásu.
Pro detekci jednotlivých bodů měření byl vytištěn tečkovaný papír, který byl nalepen na plochu každého předmětu. Hustota teček na předmětu má dopad na počet měřících míst, tedy i na kvalitu rozlišení tvaru předmětu. Tohoto faktu se využívalo především u třetího předmětu, elipsoidu, u kterého se měřil sloupec všech teček zároveň a výjimečně i ostatních předmětů k získání většího počtu měřených bodů, více v kapitole 3.6.4.

3.6 Měření s rozložením kamer do roviny V

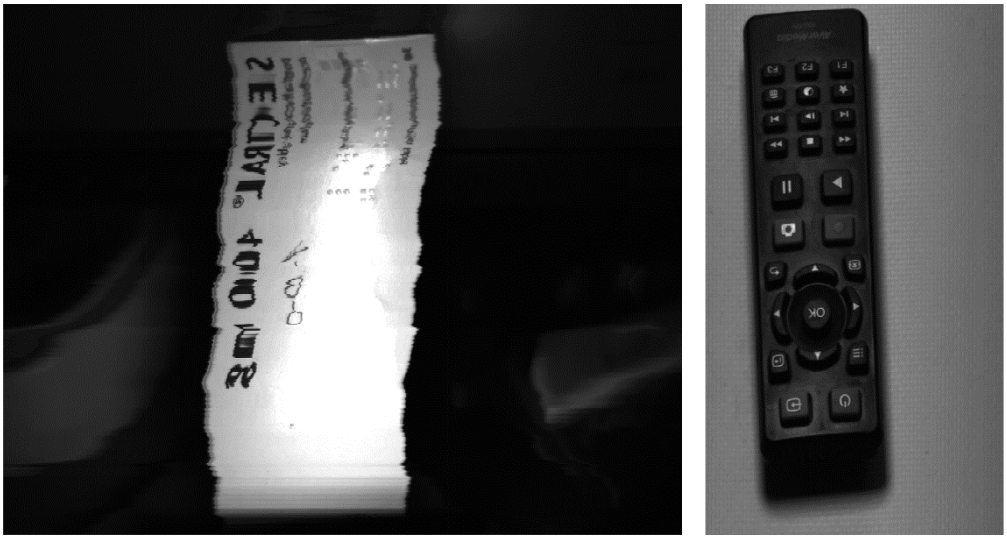
Při tomto měření byly kamery umístěny kolmo ke směru chodu pásu, přičemž první kamera mířila směrem k chodu pásu a druhá proti. Tento druh rozložení kamer byl využíván při prvních pokusech o získání snímků, je tedy dle mého uvážení přesnější a více odladěný než měření v kapitole 3.7. s kamerami ve společné rovině. V obrázku 3.6 je vyfocena sestava kamer pro toto měření.



Obrázek 3.6 Nastavení měřícího pracoviště s rozložením kamer do roviny V

3.6.1 První snímky řádkových kamer

První snímek řádkové kamery byl získán nasnímáním videa ručním pohybem kamery. Po proložení snímků videa pod sebe aplikací *GetFrame.m* vznikl tento snímek krabičky prášků.



Obrázek 3.7 První snímky pomocí řádkové kamery

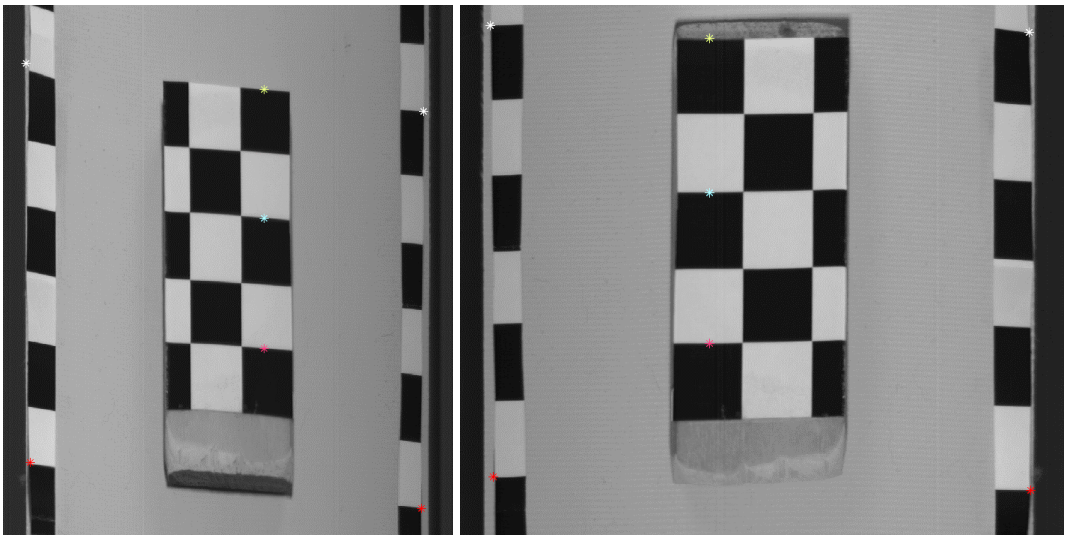
Pro další snímky bylo používáno měřící stanoviště – dopravníkový pás pro stabilitu nasnímání snímku. Touto metodou bylo nasnímáno několik druhů ovladačů, obr. 3.7, tužek, a i další měření v následujících kapitolách.

3.6.2 První měření na páse

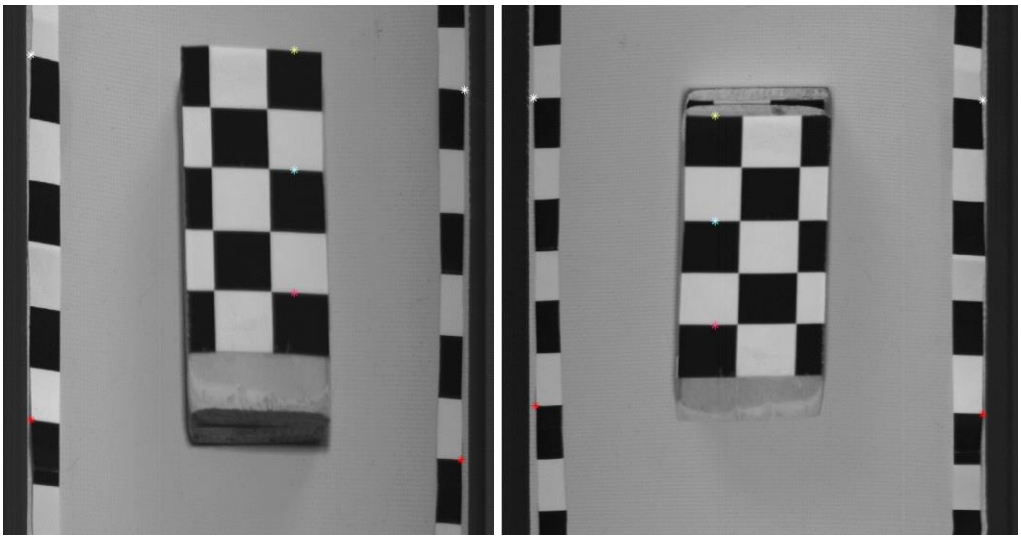
První měření pomocí řádkových kamer bylo testováno na dřevěných destičkách, které byly polepeny šachovnicí k detekci rohů. Tato metoda se při měření neosvědčila, jelikož se rohy šachovnice nedaly snadno detekovat. Proto bylo u dalších vzorků využíváno koleček, pro které má Matlab připravenou funkci *imfindcircles*, která nám vrací jejich polohu v obraze a průměr detekovaného kolečka. Této funkce se využívalo v kapitolách 3.6.3 a 3.6.4. V kapitole 3.6.5. se využilo metody detekci okraje koleček z důvodu snazší detekce většího počtu bodů v obraze.
Při pohledu na obrázky 3.8 – 3.10 je znatelná deformace snímků jejich natočením. Tento efekt způsobuje nepřesné nastavení kamer vůči pásu. Jak už bylo zmíněno v ideálním případě by bylo požadováno, aby přímka senzoru v kameře byla kolmá na běh pásu, pokud tato podmínka není splněna vznikají tak parazitní vlivy a s nimi spojené nepřesnosti měření. Pro další optimalizaci měření by bylo zapotřebí vycházet z komplikovanější matematiky systému a brát v úvahu orientaci kamery vůči pásu, tím by byly částečně eliminovány již zmíněné parazitní vlivy při měření.
Pro výpočet relativní chyby měření bylo zapotřebí získat skutečný rozměr, sloužící jako referenční hodnota, ta byla naměřena posuvným měřítkem. Relativní chyba měření se vypočítala:

$$\delta_R = \frac{X_N - X_S}{X_S} * 100\ [\%] \tag{3.6}$$

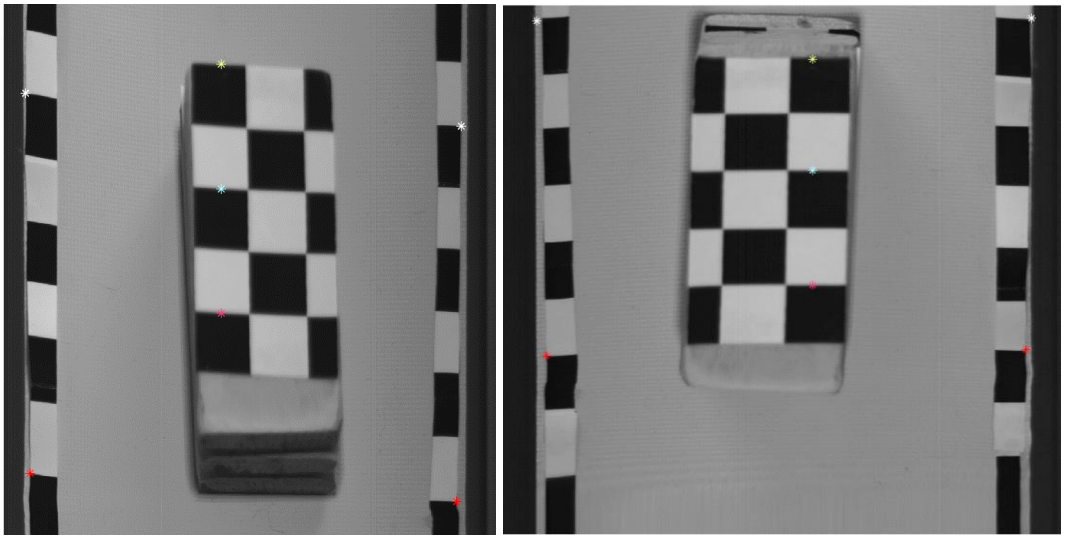
, kde X_N je naměřená hodnota a X_S je hodnota referenční



Obrázek 3.8 Výsledky prvního měření: Jedna destička

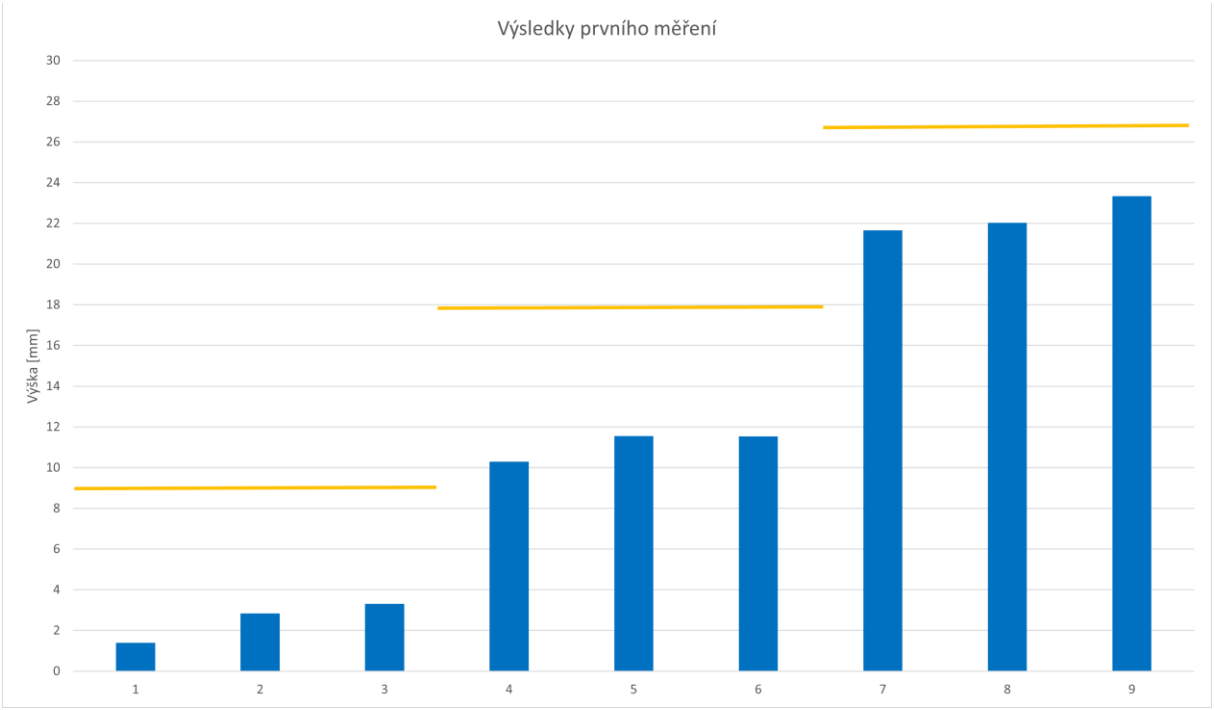


Obrázek 3.9 Výsledky prvního měření: Dvě destičky



Obrázek 3.10 Výsledky prvního měření: Tři destičky

Na obrázcích 3.8 – 3.10 jsou získané snímky používané pro měření. Z důvodu špatné orientace kamery vůči pásu a velké diference mezi snímky jednotlivých kamer docházelo k vysokým chybám měření. Nejmenší chybu měly pouze snímky z obrázku 3.10 a to s 13,55% relativní chybou. Každá destička má referenční výšku 9 mm, což odpovídá referenční výšce měření v obrázku 3.8. Dvě destičky mají společnou výšku 18 mm a tři destičky 27 mm.
V následujícím grafu jsou shrnuty výsledky těchto tří měření reprezentovány modrými sloupci. Pro každou destičku platí tři sloupce v grafu, reprezentující tři detekované body shora dolů na předmětu. Žlutou barvou je znázorněna skutečná výška jednotlivých destiček při daných měřeních. Měřené body jsou znázorněny na obrázcích 3.8 – 3.10.



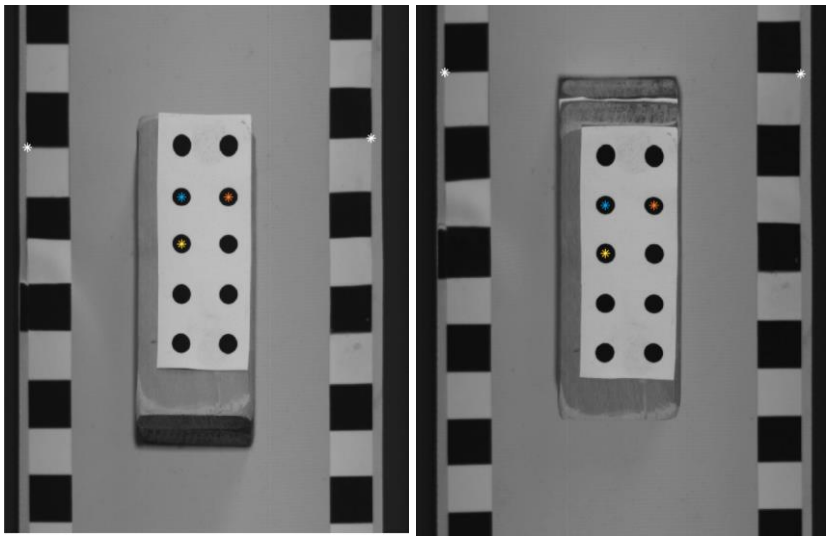
3.6.3 První zlepšení měření

Pro zvětšení přesnosti jsem se rozhodl nalepit na destičky místo šachovnice již zmíněná kolečka, které lze v obraze jednodušeji vyhledat využitím funkce *imfindcircles* ve vybraném regionu, která vrací souřadnice středu a průměr každého kolečka detekovaného v obraze.

Tabulka 1 Nastavení kamer vůči měřícímu aparátu

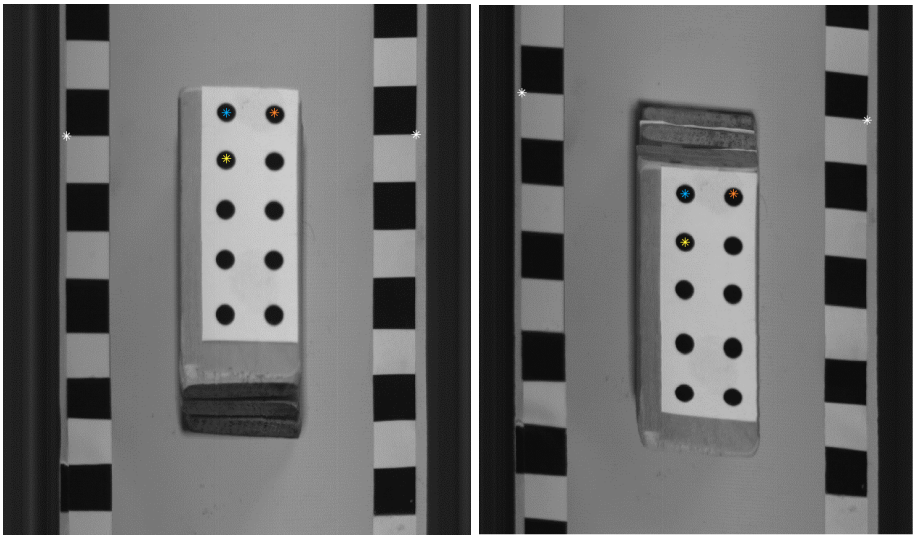
	První kamera	Druhá kamera
Výška od pásu	42 cm	42 cm
Vzdálenost od středu pásu	34 cm	34 cm

V tabulce č.1 jsou uvedeny hodnoty nastavení kamer při měření vůči měřícímu aparátu. Výsledkem měření byla výška předmětu 19,21 mm s relativní chybou 6,7 % vůči referenční výšce 18 mm.



Obrázek 3.11 Měření dvou destiček s kolečky

Při dalším měření se jedna z kamer neúmyslně posunula. Pozice kamer se při měření nezměnila, pouze její orientace natočením kamery. Z tohoto měření byla zjištěna výška 28,15 mm s 4,2 % relativní chybou vůči referenční výšce 27 mm.



Obrázek 3.12 Měření třech destiček s kolečky

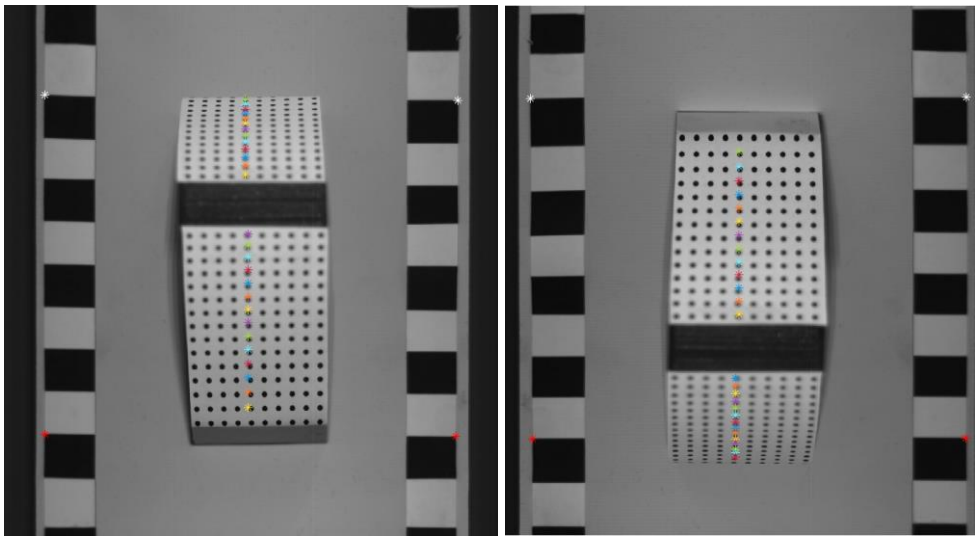
3.6.4 Optimalizované měření

Při následujícím měření jsem se pokoušel neměnit pozici kamery vůči pásu a zároveň namířit kamery kolmo na běh pásu k minimalizaci parazitních vlivů při měření. U tohoto a následujícího měření v kapitole 3.6.5 byly využívány testovací předměty – výsek elipsoidu, tři schody a šest schodů, zmíněné v kapitole 3.5.

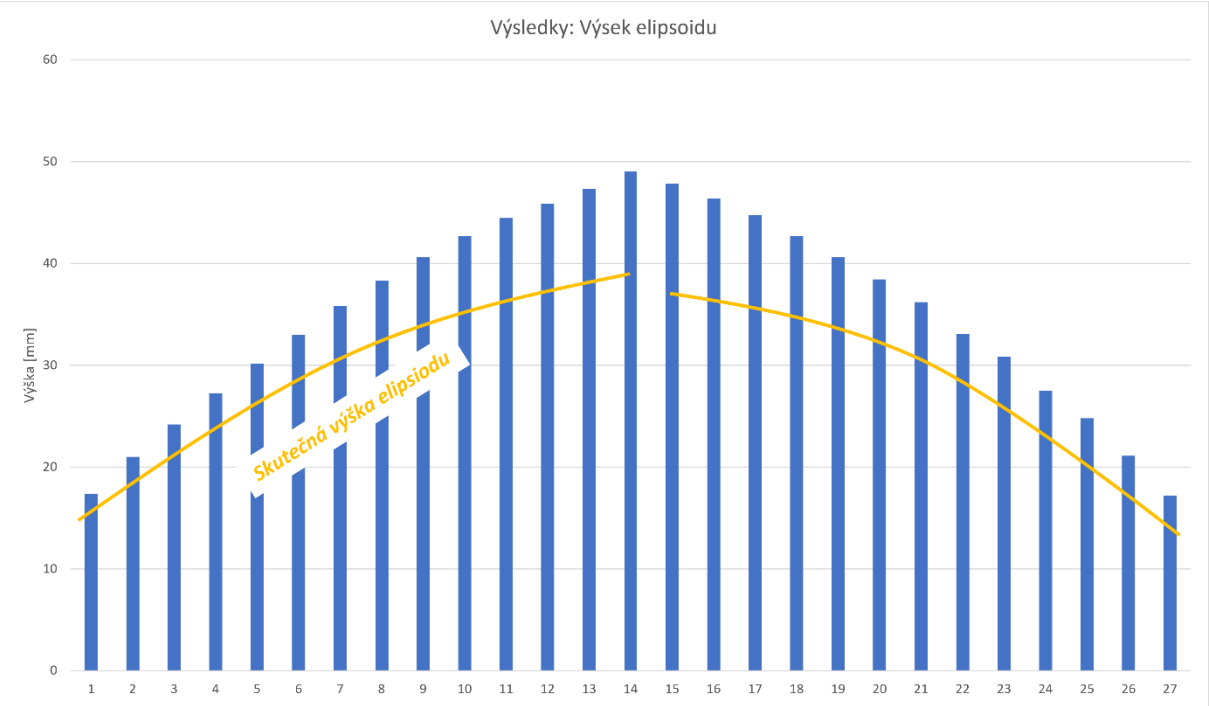
Tabulka 2 Nastavení kamer vůči měřícímu aparátu

	První kamera	Druhá kamera
Výška od pásu	48 cm	45,5 cm
Vzdálenost od středu pásu	34 cm	31 cm

Pozice kamer je shrnuta v tabulce č.2.

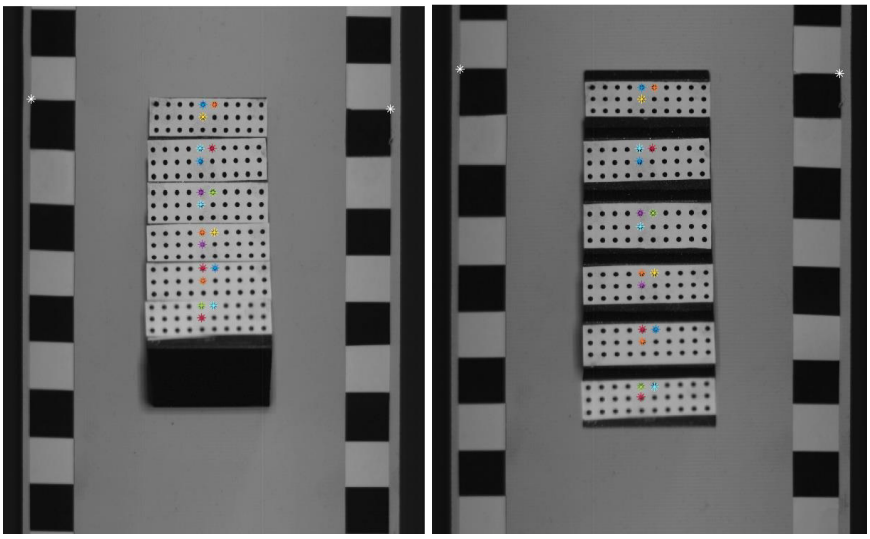


Obrázek 3.13 Snímky měření výseku elipsoidu bez podkladu

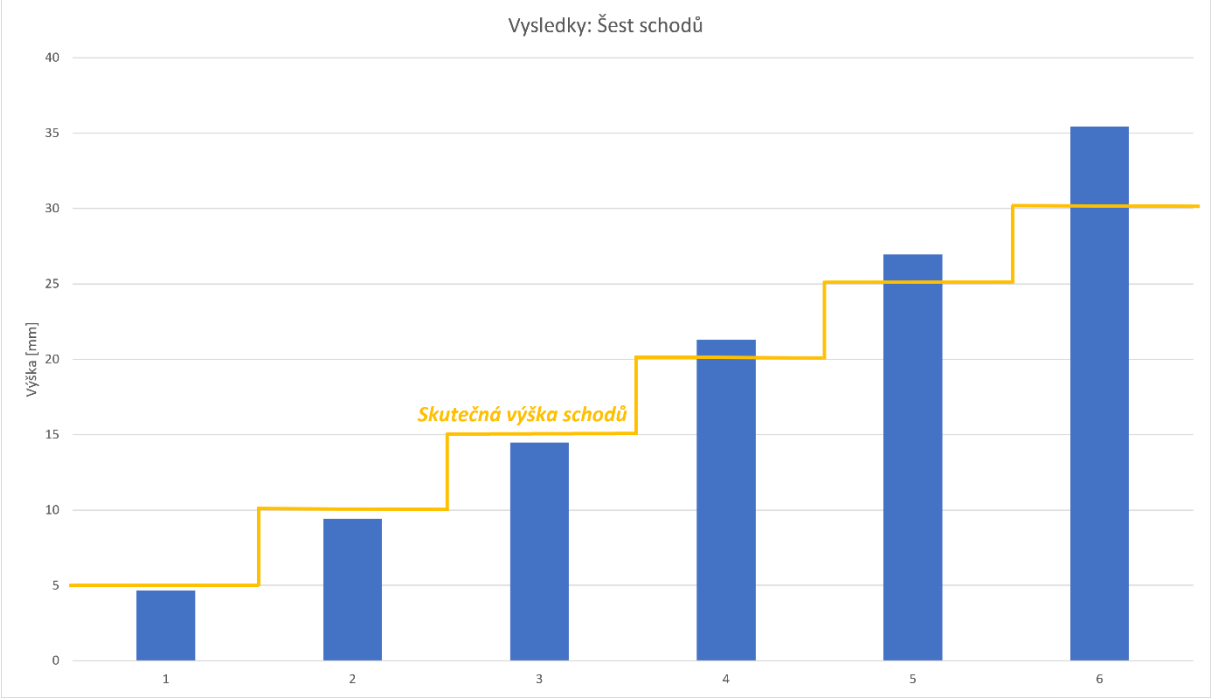


Z grafu je patrný profil měřeného předmětu. Nespojitost profilu je způsobena nepřesným nalepením referenčního papíru s kolečky na předmětu. Chyba měření se pohybuje v rozmezí 16 – 24,5 %, kdy velká část této chyby je způsobena převodem z počtu pixelů na milimetry. Při tomto měření se totiž původně vycházelo z rozměrů dvou postranních čtverečků v obraze, které neměly stejné měřítko v jednotlivých osách. K této chybě pravděpodobně došlo ve skritpu *Resize.m.* Při porovnání poměru stran čtverečku, tedy i měřítka, dostáváme 20% rozdíl mezi výškou a šířkou čtverečku což přibližně odpovídá velikosti relativní chyby měření – převodu na milimetry.

Měření šesti schodů:

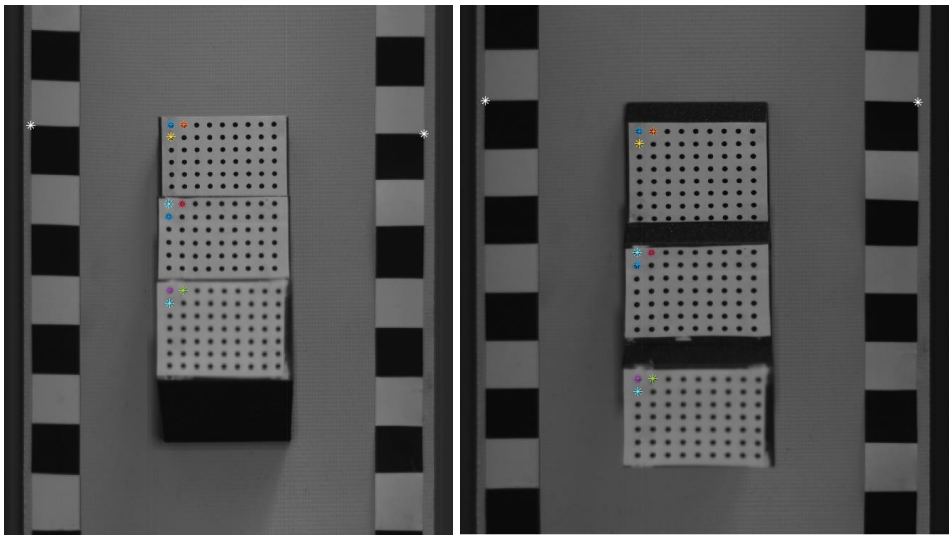


Obrázek 3.14 Snímky měření šesti schodů bez podkladu

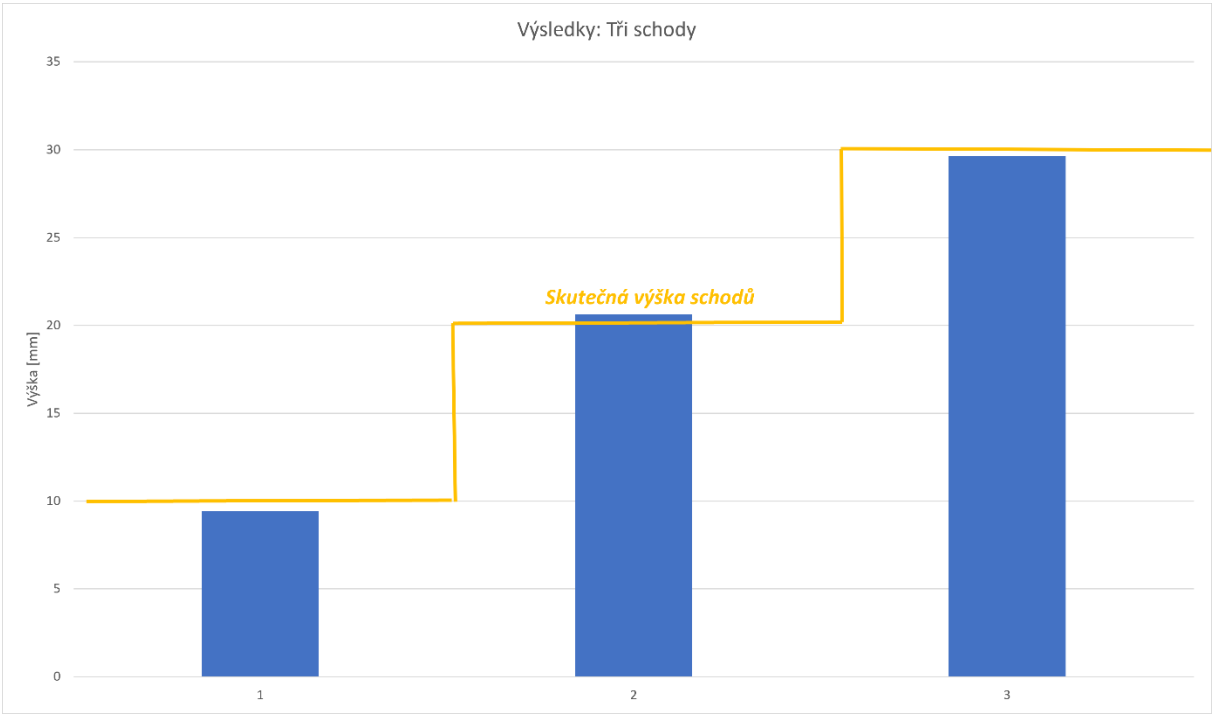


Při měření šesti schodů je z grafu patrný profil předmětu. Relativní chyba tohoto měření se zvyšovala společně s rostoucí výškou schodu. Lze uvažovat, že mohla být způsobena změnou měřítka každého schodu, jelikož se měřítko mění společně s výškou předmětu. Při měření se vycházelo z měřítka podstavy. Nebo případně rozostřením předmětu, které je způsobeno malou hloubkou ostrosti kamery. Minimální relativní chyba měření byla 3,46 % pro třetí schod, maximální 18 % pro nejvyšší schod – šestý

Měření tří schodů:
Při měření tří schodů se podařilo poprvé relativní chybu měření snížit pod 6% hranici, jelikož se podařilo nejpřesněji upravit poměr stran v obraze a tím přesněji normalizovat převod pixelů na milimetry. Detekce poměru stran v obraze se zde prováděla porovnáním vzdáleností středu koleček v jednotlivých osách, tato metoda byla využita i u měření šesti schodů. Před další optimalizací zpracování dat v kapitole 3.6.5 bylo toto měření nejpřesnější ze všech prozatím provedených.



Obrázek 3.15 Snímky měření tří schodů bez podkladu



Z jednotlivých měření v kapitolách 3.6.2 – 3.6.4 je znatelný výrazný vliv chyby způsobené převodem jednotek. Pro minimalizaci této chyby jsem se rozhodl standardizovat převod pixelů na milimetry detekcí dvou přímek v obraze pomocí postranních značek na páse. Tato metoda byla použita v kapitole 3.6.5.

3.6.5 Optimalizované měření s podkladem

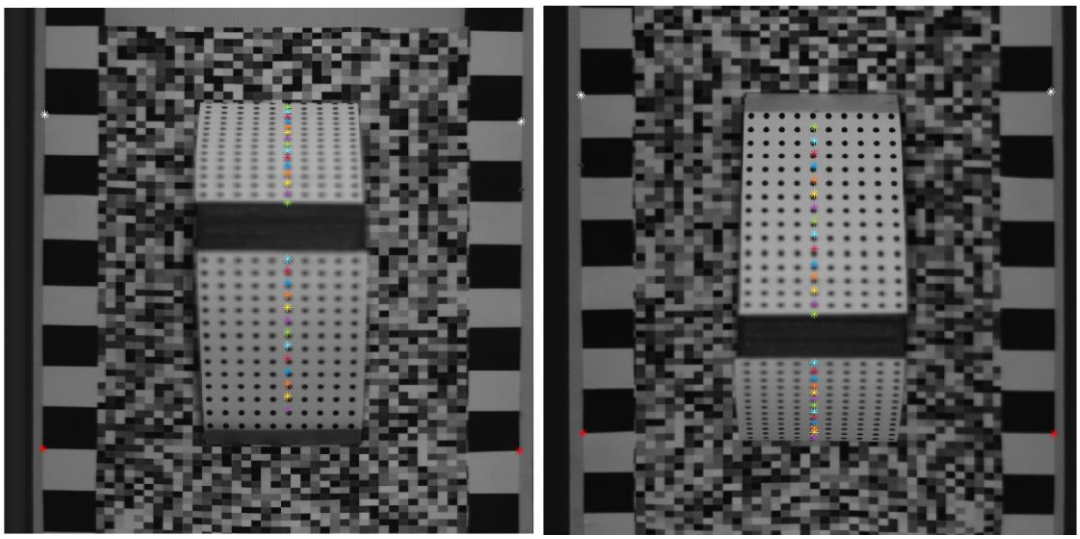
Na měřící pás byla z důvodu tvorby mapy disparity a následného 3D modelu v kapitole 3.9 nalepena náhodná šachovnice s různými stupni šedi generována Matlabem. Disparita uvádí velikost rozdílu umístění daného bodu pro jednotlivé kamery. Její využití je popsáno v již zmíněné kapitole. Zároveň byl upraven způsob detekce bodů, který byl převzatý z kapitoly 3.6.4 při měření výseku elipsoidu. Detekují se hrany všech bodů v jedné ose na měřeném předmětu. Tato změna byla zvolena kvůli zvětšení počtu detekovaných bodů a k eliminaci náhodné chyby měření. Zároveň se změnil princip standardizace pixelů na milimetry využitím postranních čar.

Tabulka 3 Nastavení kamer vůči měřícímu aparátu

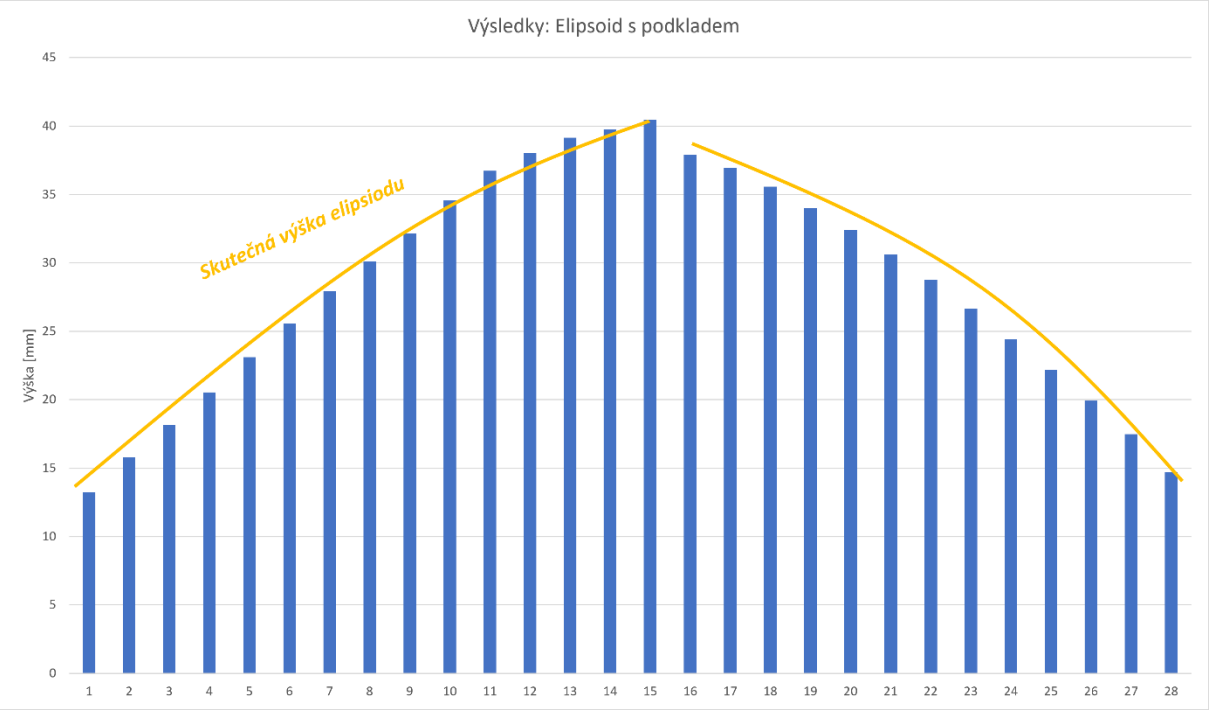
	První kamera	Druhá kamera
Výška od pásu	41 cm	40 cm
Vzdálenost od středu pásu	33 cm	31 cm

Tabulka č.3 popisuje vzájemnou pozici kamer při tomto měření.

Měření výseku elipsy:

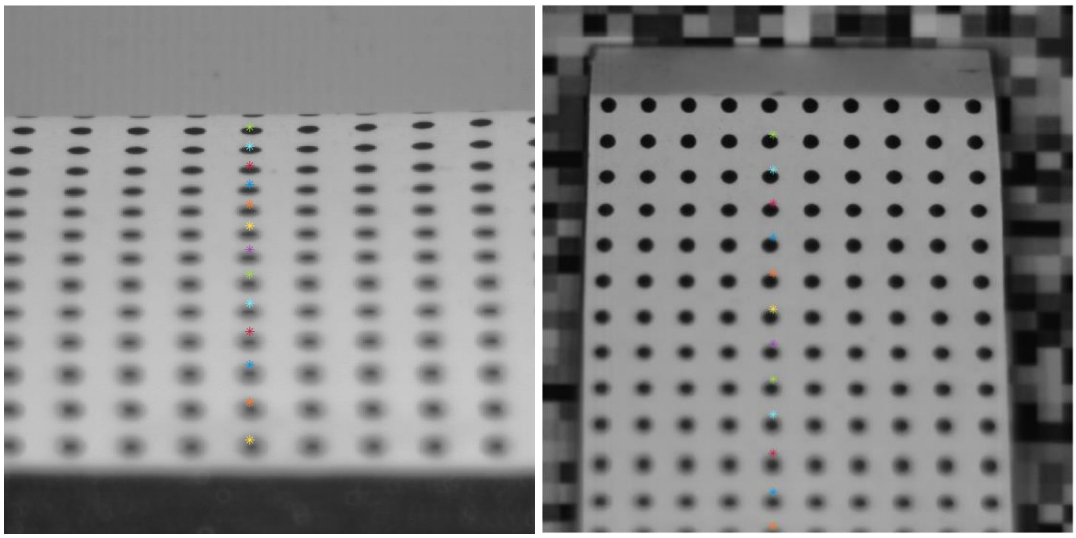


Obrázek 3.16 Snímky měření výseku elipsoidu s podkladem



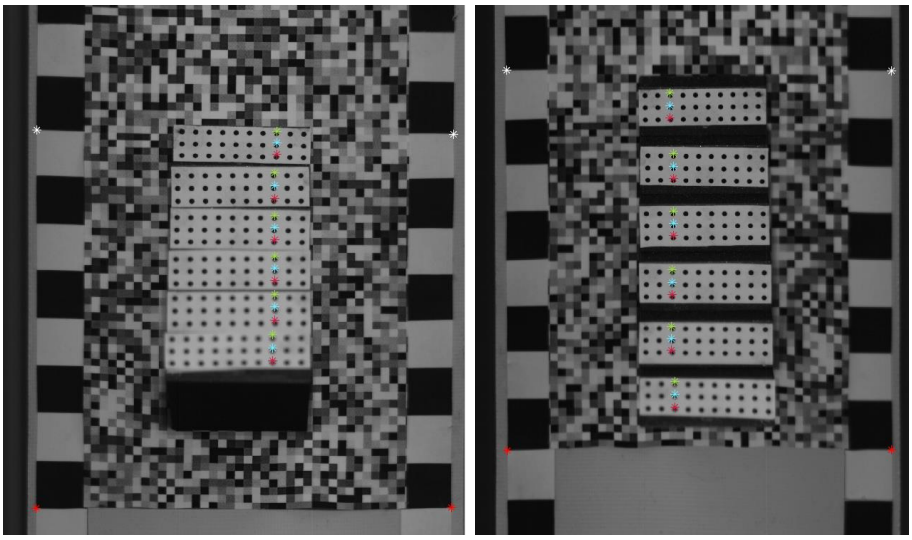
Při porovnání s měřením výseku elipsoidy v kapitole 2.6.4 je znatelné zvýšení přesnosti měření. Poprvé se podařilo část relativní chyby měření dostat pod 1% hranici. Přičemž maximální chyba je při měření 8,05 % pravděpodobně způsobenou detekcí okraje kolečka. Detail detekce okraje kolečka je znázorněn v obrázku 3.17. Při detekci okraje kolečka dochází k chybám vzniklými rozostřením kolečka. Využití funkce *imfindcircles* podobně jako u předchozích měření by tento vliv mohlo redukovat, avšak z důvodu efektivity získání bodů v obraze byl vliv této chyby při měření zanedbán.

Průměrná relativní chyba měření se podařila minimalizovat, avšak ne zcela odstranit. Největší část korekce je zapříčiněna změnou metody standardizace dat, již zmíněném v úvodu kapitoly.

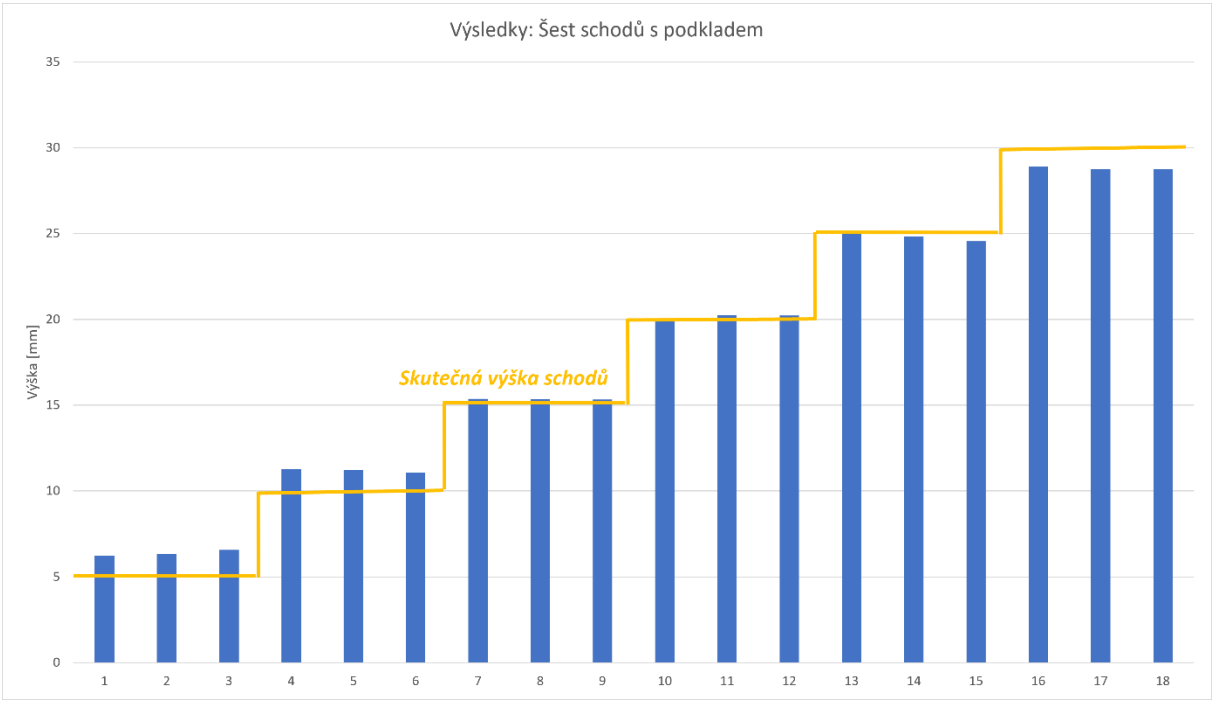


Obrázek 3.17 Detail detekce okraje kolečka

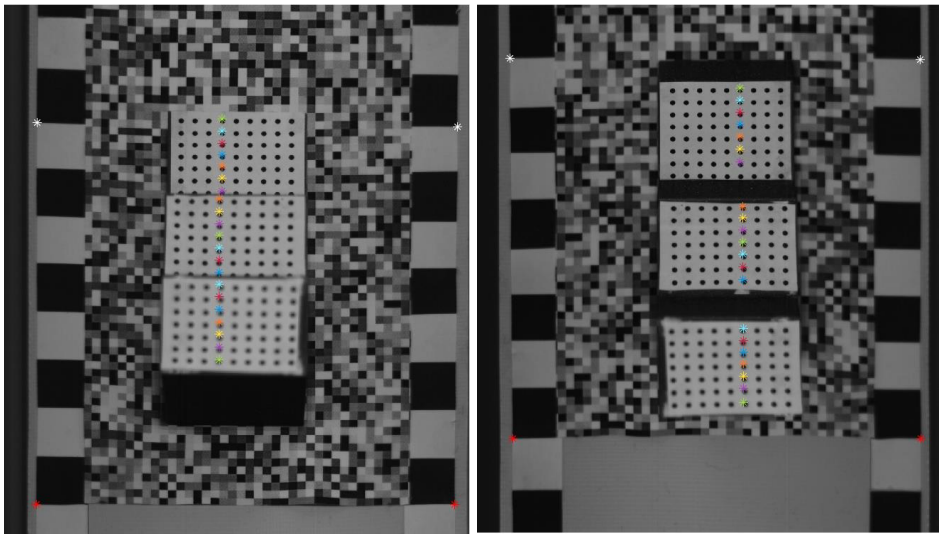
Měření výšky šesti schodů:



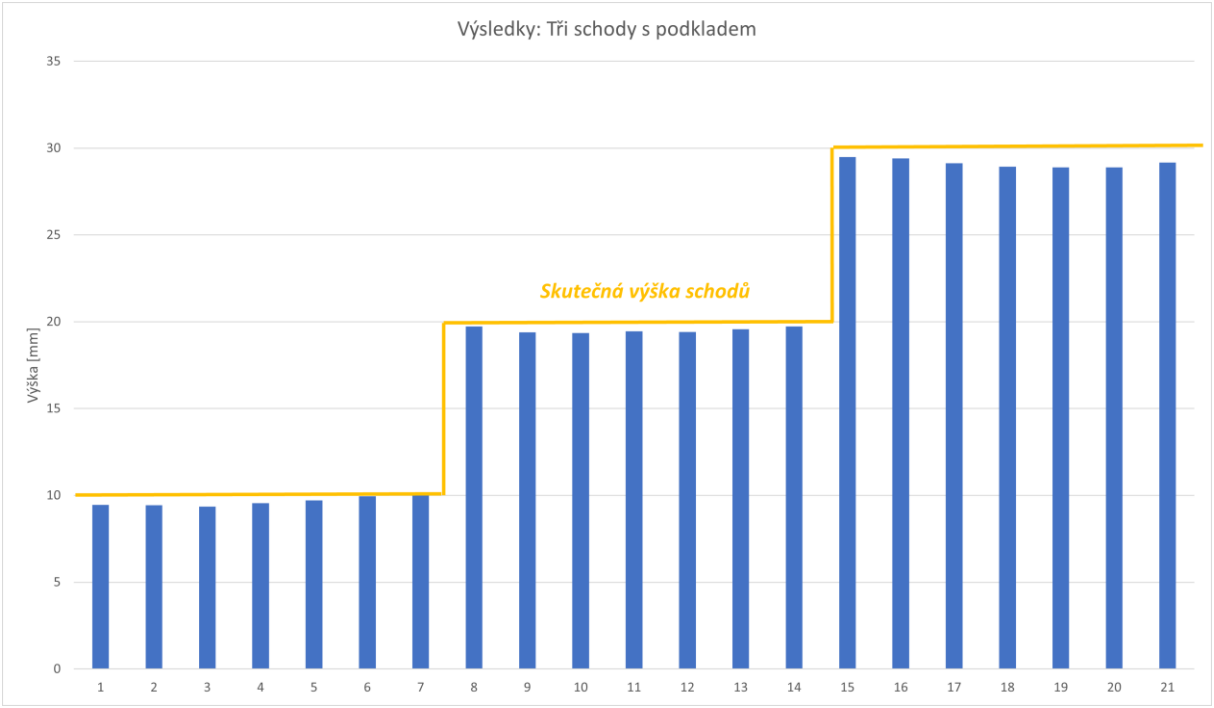
Obrázek 3.18 Snímky měření šesti schodů s podkladem



Měření výšky tří schodů:



Obrázek 3.19 Snímky měření tří schodů s podkladem

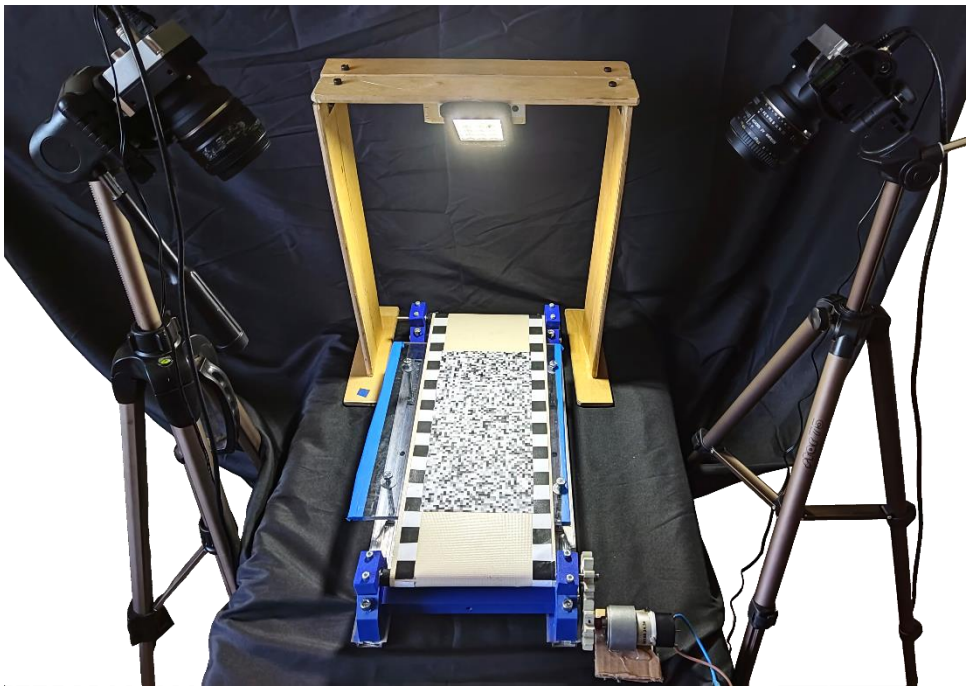


Při měření šesti schodů se podařilo pro všechny detekované body získat relativní odchylku pod 5% hranicí. Nejvyšší odchylka měření byla detekována u prvních dvou schodů předmětu. Podobná relativní chyba byla znatelná i u měření tří schodů, výrazná především u prvního schodu. Lze uvažovat, že mohla být zapříčiněna neplynulým pohybem pásu, nebo případným prohnutím pásu při průjezdem pod kamerou.

K zjištění příčin této chyby by bylo zapotřebí nasnímat větší množství dat. Pro optimalizaci měření by bylo vhodné standardizovat detekci jednotlivých bodů na předmětu, jelikož zbývajících odchylky mohou být způsobeny použitou metodou detekcí okraje kolečka.

3.7 Měření s kamerami ve společné rovině

Při druhé sestavě měřícího pracoviště byly kamery namířeny na pás z boků. Jejich pohledy vytvářely společnou rovinu pro obě kamery, která půlila jedoucí pás. Bylo zapotřebí upravit algoritmy zpracování dat z kamer, konkrétně způsob měření a detekce bodů v obraze. Základní princip měření v obraze byl ponechán stejný jako v kapitole 3.6. Velkou výzvou byl korektní přepočet vzdálenosti v obraze na milimetry. Během tohoto měření byly měřeny namodelované předměty uvedené v kapitole 3.5.

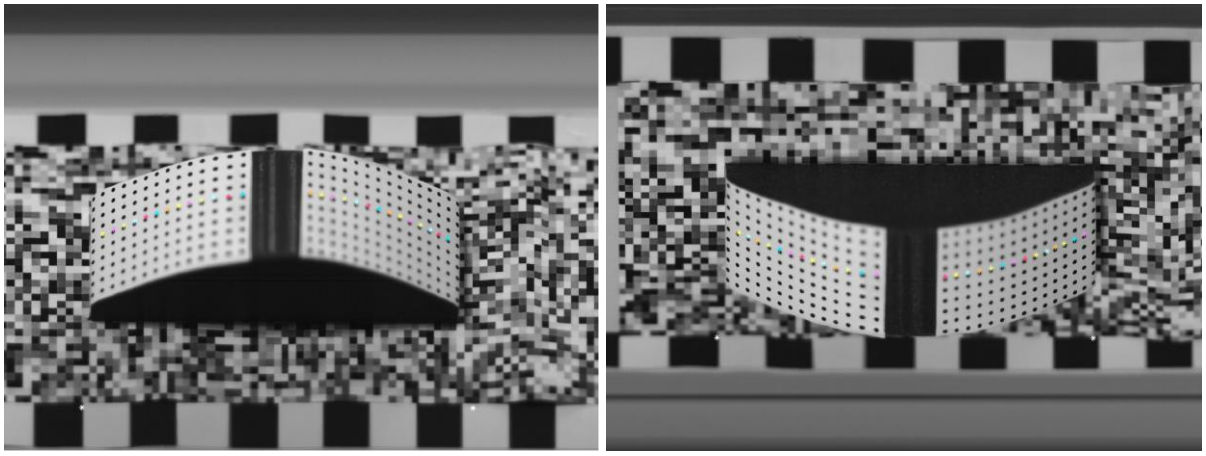


Obrázek 3.20 Nastavení měřícího pracoviště s rozložením kamer ve společné rovině

Měření výseku elipsoidu:
Při měření výseku elipsoidu se detekovaly body v jednom sloupci skrze celý předmět. Ze snímků v obrázku 3.21 je patrné částečné zkreslení pásu pod předmětem způsobené nastavením měřícího pracoviště, konkrétně orientací kamer. Pozice kamer je uvedena v tabulce č.4.

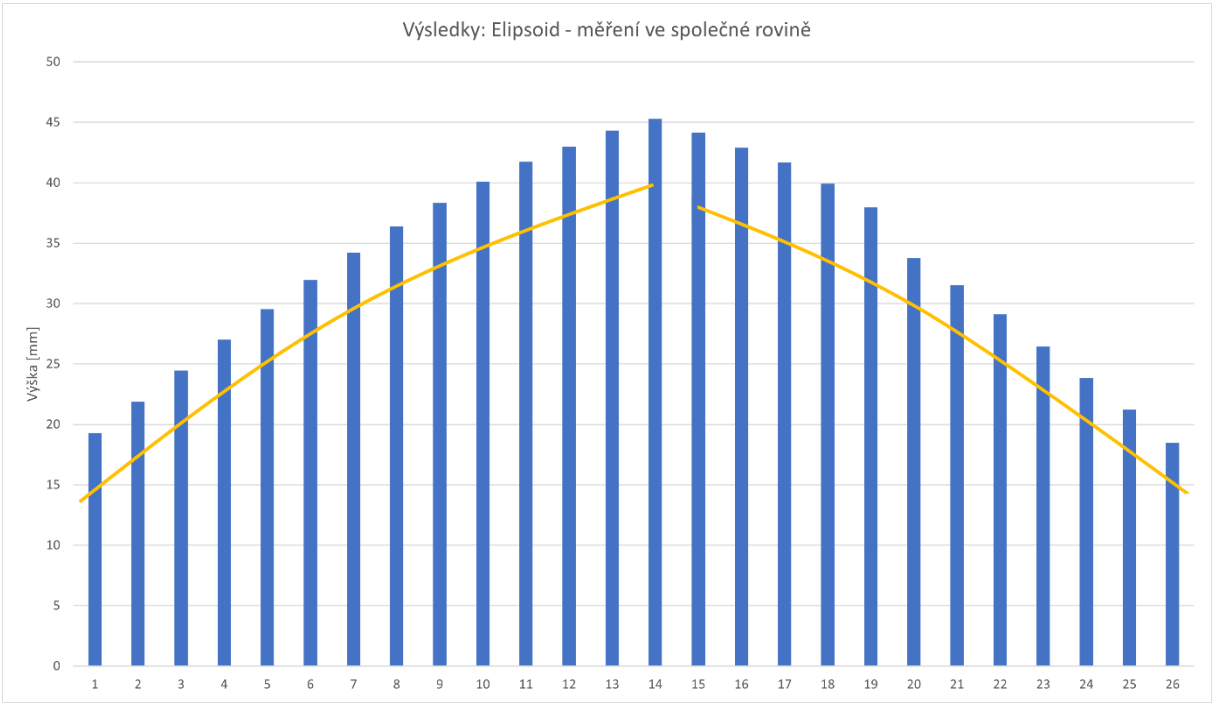
Tabulka 4 Pozice kamer při měření ve společné rovině

	První kamera	Druhá kamera
Výška od pásu	44 cm	42 cm
Vzdálenost od středu pásu	31 cm	28 cm

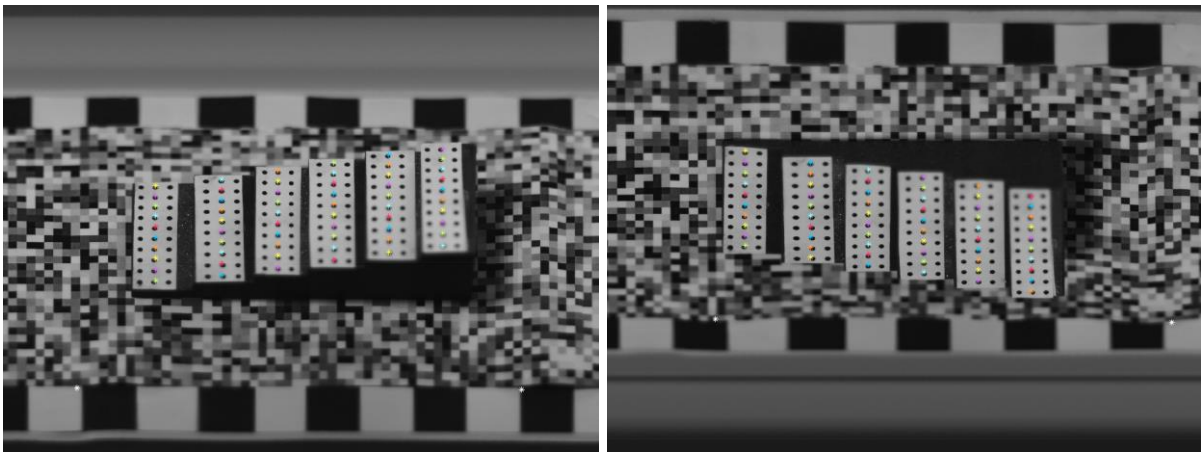


Obrázek 3.21 Snímky měření výseku elipsoidu s kamerami ve společné rovině

V následujícím grafu jsou znázorněny změřené výsledky pro jednotlivé body předmětu. Veškeré změřené výsledky jsou zatíženy aditivní chybou, která byla způsobena standardizací výsledků, stejně jako v kapitole 3.6.4.

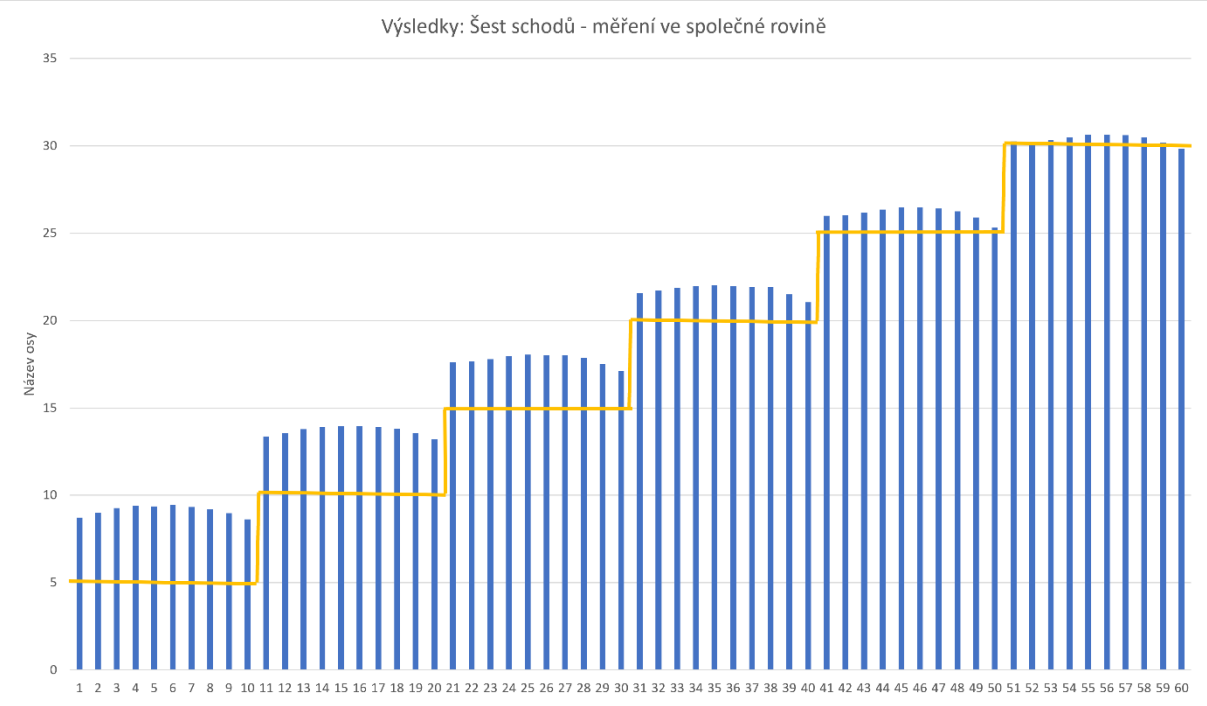


Měření šesti schodů:
Pro další předměty se změnil způsob detekce bodů k odhalení relativní chyby vzniklé zkreslením snímku pro každý schod. Detekovaly se body napříč celým předmětem pro každý schod zvlášť.

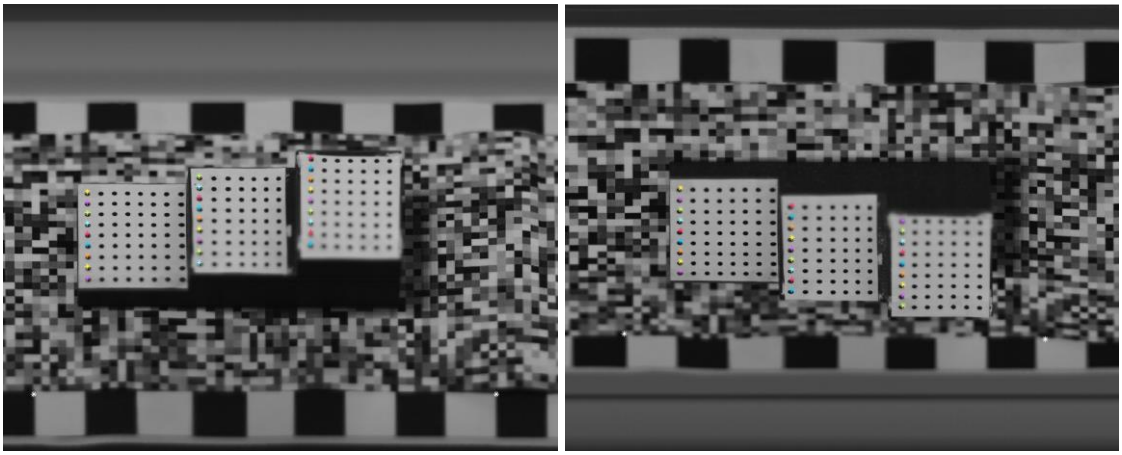


Obrázek 3.22 Snímky měření šesti schodů s kamerami ve společné rovině

V následujícím grafu si můžeme všimnout závislosti výšky předmětu na detekovaném bodě předmětu. Jednou z možných příčin této vzniklé chyby měření může být již zmíněné zkreslení snímku způsobené perspektivou kamery. Možnou variantou redukce této chyby by bylo najít způsob, jak zjistit aktuální měřítko v závislosti na pozici v obraze.
Podobně jako u měření elipsoidu je zde patrná aditivní chyba měření znovu způsobená převodem pixelů v obrazu na milimetry ve skutečnosti.

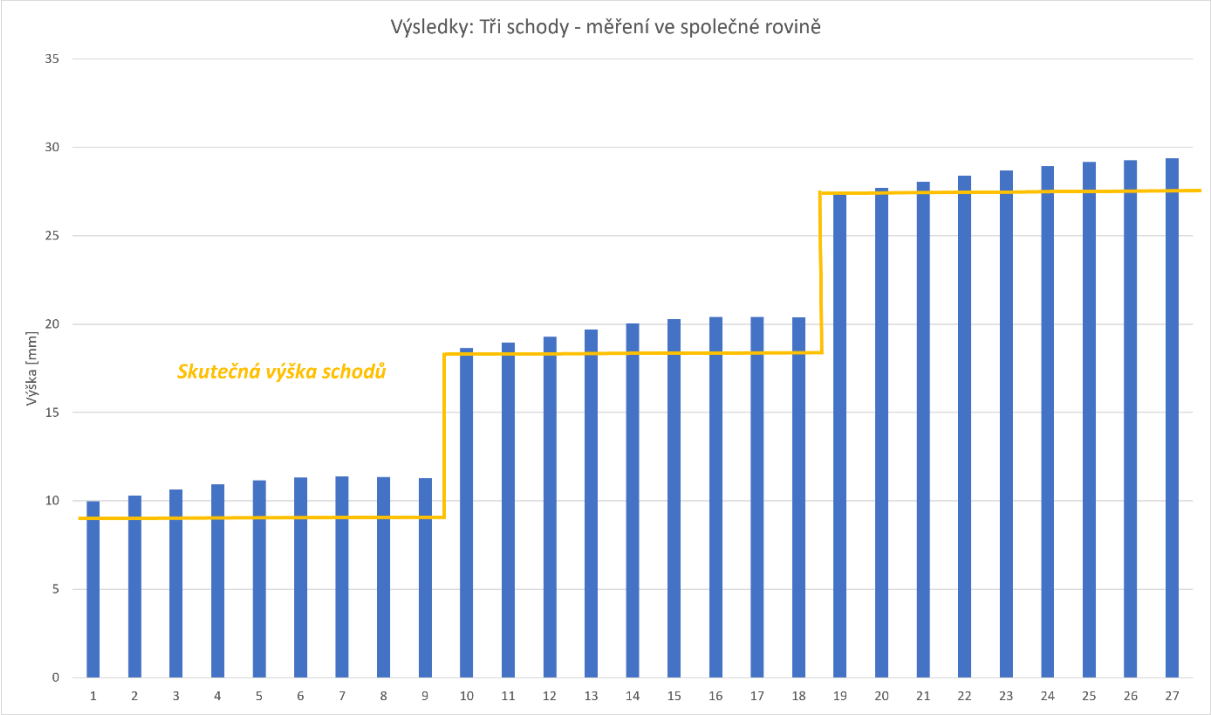


Měření tří schodů:



Obrázek 3.23 Snímky měření tří schodů s kamerami ve společné rovině

Při měření třech schodů je znovu patrné zkreslení výsledků způsobené perspektivou kamer. Při dalších měřeních by bylo vhodné vyzkoušet jiné metody standardizace obrazu na milimetry. U měření s kamerami ve společné rovině je vliv měřítka v jednotlivých osách a vliv perspektivy znatelnější než u měření předešlých. Ideálním řešením by bylo naprogramovat algoritmus, který nalezne aktuální měřítko v závislosti na zkreslení obrazu a pozici v obraze.

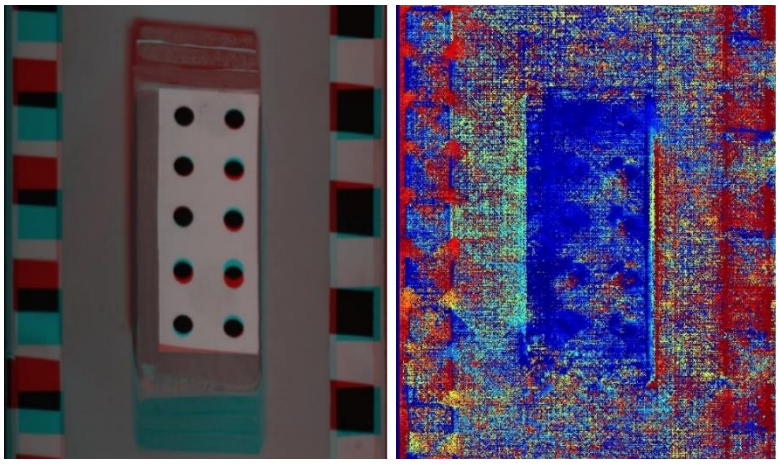


Ze všech obrázků 3.21 – 3.23 je také znát rozostření nejvyššího bodu předmětu, způsobené hloubkou ostrosti objektivu kamery. Toto rozostření zajisté hraje roli při detekci jednotlivých bodů na předmětu a negativně tak ovlivňuje přesnost měření.

Výsledky všech měření modelovaných předmětů jsou shrnuty v příloze A.

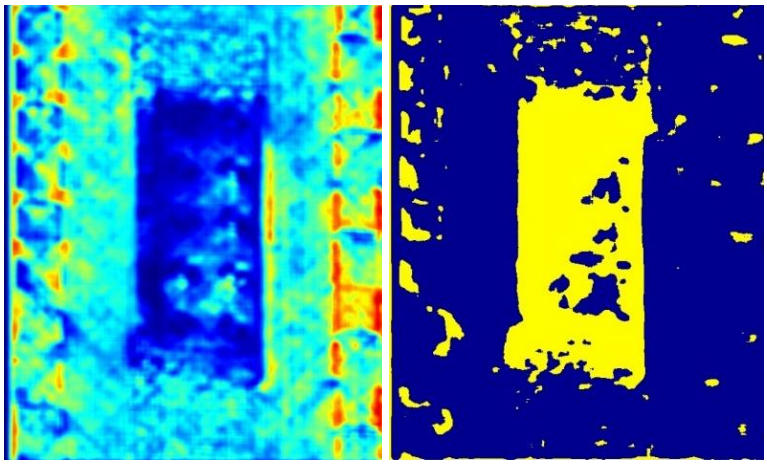
3.8 Tvorba 3D modelu využitím mapy disparity

Pro zpracování výsledků jsem se pokusil vytvořit 3D model měřeného předmětu využitím disparity mezi snímky. K tomuto bylo potřeba vytvořit mapu disparity, ze které lze zjistit výšku předmětu. Pro tento účel byl vytvořen skript *Get3D.m*.
Při tvorbě 3D modelu se vycházelo z měření shrnutém v kapitole 3.6.3

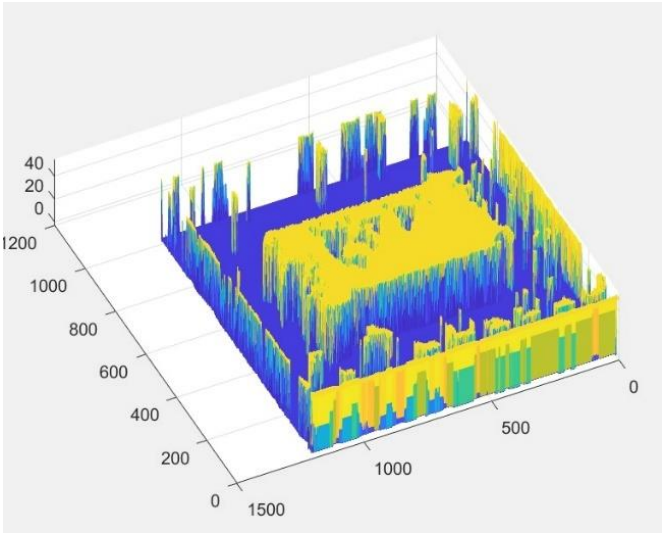


Obrázek 3.24 Proložení jednotlivých snímků k tvorbě mapy disparity

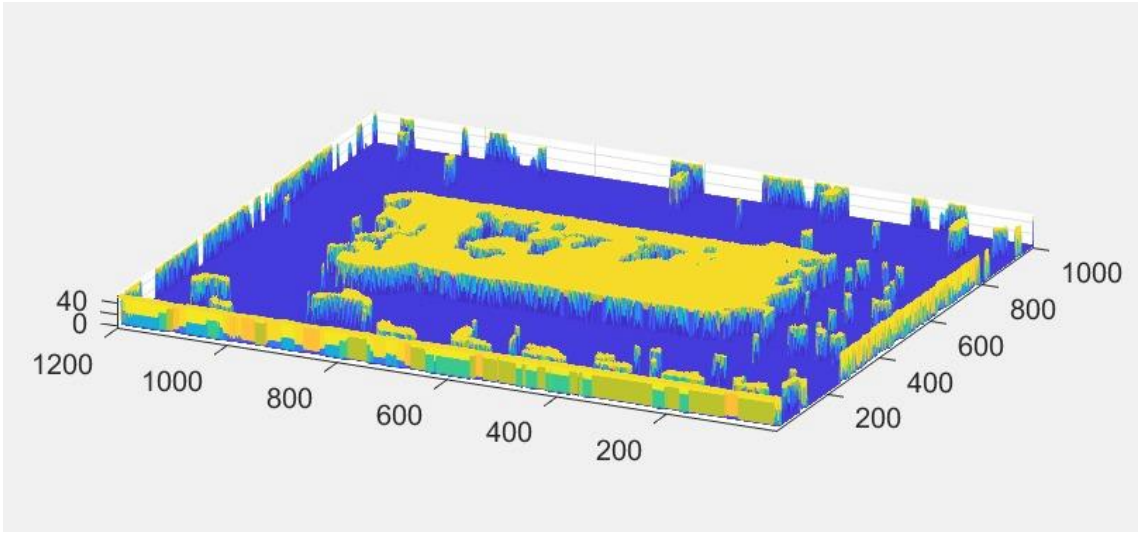
Získaná mapa disparity byla poté filtrována a průměrována pro redukci vlivu podstavy. Z důvodu minimální textury pásu a chybějící textury předmětu se objevily prohlubně uvnitř předmětu. Pro další předměty byla na pás v kapitole 3.6.5 nalepena náhodná šachovnice ve stupních šedi generována Matlabem.
Výsledky prvních pokusů o vytvoření 3D modelu jsou znázorněny v obrázcích 3.25 – 3.28.



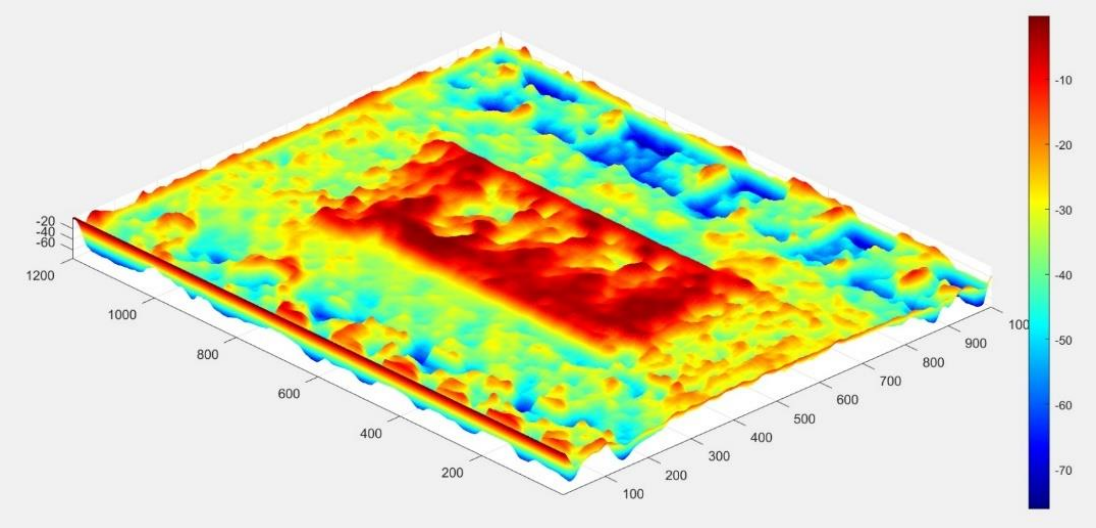
Obrázek 3.25 Průměrování a prahování mapy disparity



Obrázek 3.26 Tvorba 3D modelu z prahové mapy disparity

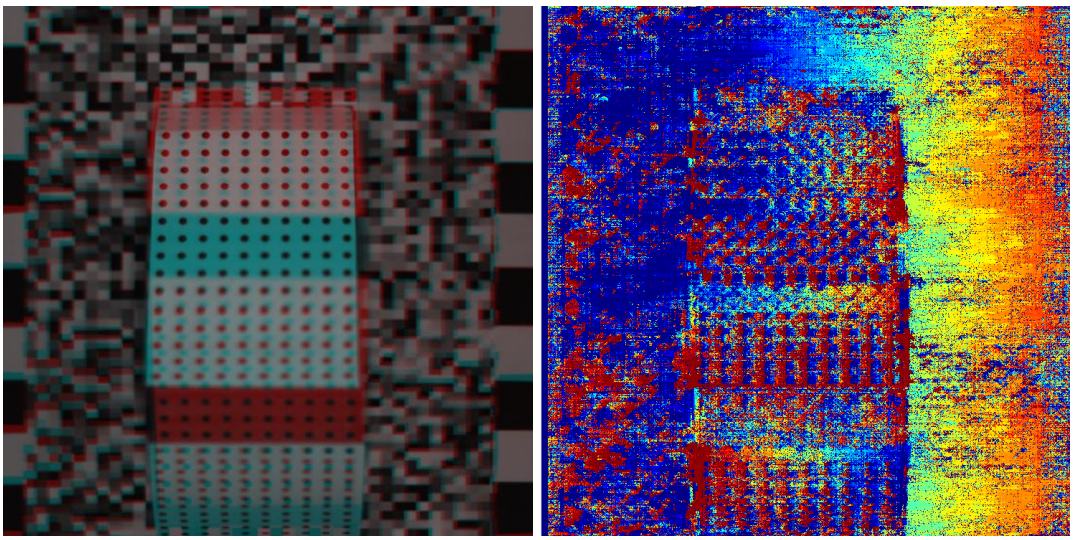


3.27 3D model získaný po průměrování mapy disparity bez prahování

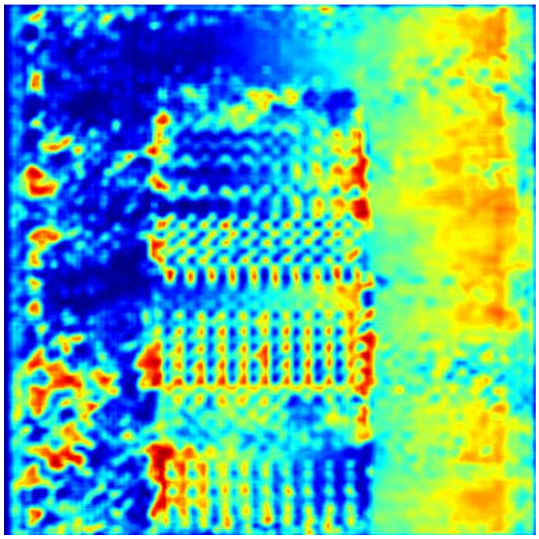


3.28 3D model získaný po průměrování mapy disparity bez prahování

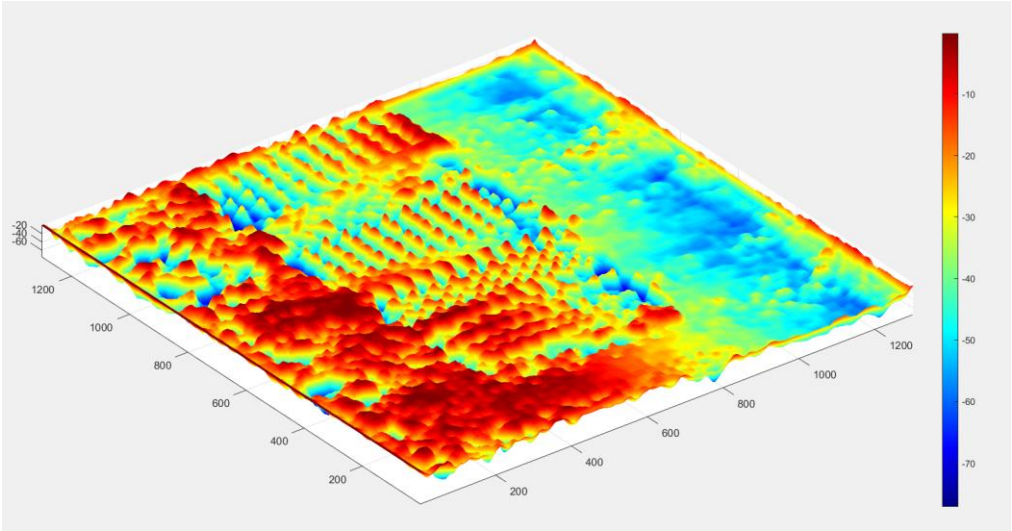
Při měření dalších předmětů s doplněním náhodné šachovnice na páse se nepodařilo získat žádné kvalitní výsledky. Pro tvorbu 3D modelů by bylo vhodné vyzkoušet i jiné způsoby zpracování snímků z kamer. Metoda mapy disparity se ukázala být nespolehlivá. Na následujících obrázcích 3.29 – 3.31 jsou výsledky stejného zpracování pro měření 3.6.5 výseku elipsoidy.



Obrázek 3.29 Proložení jednotlivých snímků a tvorba mapy disparity výseku elipsoidu



Obrázek 3.30 Zprůměrovaná mapa disparity výseku elipsoidu



Obrázek 3.31 3D model výseku elipsoidu získaný po průměrování mapy disparity

4. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zpracovat problematiku 3D měření pomocí řádkových kamer.
V úvodních kapitolách je probrán princip funkce kamery, základní fyzikální principy objektivů k získaní teoretického základu, který přímo ovlivňuje vlastní snímání a měření pomocí řádkové kamery. Dále byly zpracovány kapitoly vlastnosti a získání digitálního obrazu, algoritmy zpracování obrazu, využívané transformace obrazu, které jsem zohlednil při tvorbě skriptů a zpracování měřených dat. Poslední teoretickou kapitolou je epipolární geometrie vhodná pro detekci bodu v třídimenzionálním prostoru za použití dvou kamer. Praktickou částí bakalářské práce bylo vytvoření měřícího aparátu a jeho optimalizace. Pro usnadnění snímání pomocí řádkových kamer byl vytvořen model dopravníkového pásu.
Při měření se využívaly dvě sestavy. V první tvořily pohledy kamer rovinu ve tvaru písmene V, se společnou přímkou na rovině pásu. V druhé ležely pohledy kamer v jedné rovině kolmé na pás i na pohyb pásu.
Základem měření pomocí řádkových kamer bylo zpracování získaného videa z kamery. Několika kroky se z videa vytvořil snímek, ve kterém se detekovaly body na předmětu. K detekci bodů bylo navrhnuto několik algoritmů od využití funkcí Computer Vision Toolboxu. Největší výzvou při měření byla řádná standardizace dat na milimetry. Tento převod způsoboval největší vliv na velikost relativní chyby měření.
Při porovnání výsledků měření v jednotlivých sestavách lze předpokládat snazší implementaci měření při umístění kamer do roviny tvořící písmeno V. To je způsobeno menším vlivem zkreslení scény perspektivou v obraze. Zároveň nám toto sestavení kamer umožňuje kvalitnější nasvícení měřených předmětů. Při měření s kamerami ve společné rovině bylo zapotřebí upravit algoritmy detekce bodů v obraze.
V ideálním případě by bylo vhodné optimalizovat jednotlivé sestavy měření zvlášť a ve finálním měření je propojit s využitím čtyř kamer. Tato metoda by zaručovala jakousi redundanci vůči náhodným chybám při zpracování dat.
V rámci kapitoly 3.8 jsem se pokusil o vytvoření 3D modelu ze získaných snímků kamer metodou disparity pohledů. Využitím této metody se nepodařilo dosáhnout požadovaných výsledků. Pro kvalitní funkci této metody by bylo vhodné mít barevné snímky z kamer, jelikož by uchovávaly větší množství informací o textuře, která je pro tuto metodu zásadní. Zároveň by bylo užitečné využití předmětu a pásu s výraznější texturou. Případně vyzkoušet jiné metody k získání 3D modelu, například vytvářením drátkového modelu.
Bakalářská práce dokazuje, že i při neideálních podmínkách v domácím prostředí lze s využitím specifického nastavení měřícího aparátu a při důsledném zpracování dat získat přesné výsledky o výšce měřeného předmětu. Zároveň je prokázáno, že vytvořené algoritmy lze efektivně využít pro předměty o různých tvarech. Tato problematika by mohla mít různorodé využití v praxi, od detekce a měření předmětů na výrobní lince po vytvoření 3D skenu pohybujícím se kolem měřeného předmětu, a dalších.

LITERATURA

[1] Otto, Havle: Strojové vidění III: Kamery a jejich části [online]. 2008. 2008 C ISSN 1210-9592. Dostupné z: www.automa.cz

[2] DIMITROVA, T. L. a A. WEIS. The wave-particle duality of light: A demonstration experiment. American Journal of Physics [online]. 2008, 76(2), 137-142 [cit. 2021-12-06]. ISSN 0002-9505. Dostupné z: doi:10.1119/1.2815364

[3] Geometrická fyzika. E-fyzika.cz [online]. [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: https://www.e-fyzika.cz/kapitoly/

[4] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Vyd. 1. V Brně: Vysoké učení technické, 2000. s. 328. [cit. 2021-12-08] ISBN 8071962147.

[5] Teledyne DALSA. Understanding Line Scan Camera Applications: Case study. TELEDYNE DALSA [online]. Waterloo Canada, 2014 [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: www.teledynedalsa.com

[6] ŘEŘÁBEK, Martin. Simulace obrazových vad pomocí matlabu [online]. In. s. 8 [cit. 2021-11-13]. Dostupné z: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB06/prispevky/rerabek/rerabek.pdf

[7] VYŠÍN, Ivo a Jan ŘÍHA. Paprsková a vlnová optika: studijní modul [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012 [cit. 2021-12-09]. ISBN 978-80-244-3334-9.

[8] CHEN, Junqing, Kartik VENKATARAMAN, Dmitry BAKIN, Brian RODRICKS, Robert GRAVELLE, Pravin RAO a Yongscen NI. Digital Camera Imaging System Simulatio [online]. In: . Vol 56 no 11. 11.11.2009, s. 10 [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: www.ieee.com

[9] CORELL, Robert. The Different Types of Digital Camera Image Sensors: General (cameras). Dummies: A wiley brand [online]. 2016, 27.3.2016 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: https://www.dummies.com/article/home-auto-hobbies/photography/cameras/general-cameras/the-different-types-of-digital-camera-image-sensors-20211

[10] WALKING, Les. Introduction to Digital Resolution [online]. In: . 02/2011, s. 12 [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: www.leswalking.com

[11] MIKŠÍK, Ondřej. Praktické využití metod digitálního zpracování obrazu [online]. Kroměříž, 2007 [cit. 2021-10-21].

[12] FIŘT, Jaroslav a Radek HOLOTA. Digitalizace a zpracovani obrazu [online]. 1.9.2015, , 5 [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267235327

[13] HOŠEK, Lukáš. Filtrace šumu z digitálních fotografií [online]. Univerzita Karlova v Praze, 2007 [cit. 2021-12-31]. Bakalářská práce. Karlova Univerzita, MFF. Vedoucí práce Pavel Machek.

[14] MCANDREW, Alasdair. An Introduction to Digital Image Processing with Matlab: Notes for SCM2511 Image Processing 1 [online]. School of Computer Science and Mathematics Victoria University of Technology [cit. 2021-10-10].
[15] Abberations. GROSS, Herbert. Handbook of Optical Systems: Vol. 3. Aberration Theory and Correction of Optical Systems. [online]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2007, 29.1 - 29.9 [cit. 2021-11-23]. ISBN 978-3-527-40379-0.
[16] HALÍČEK, Josef. Experiment: Camera obscura – když zatemníte místnost.: Obrázek [online]. [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: https://www.milujemefotografii.cz/experiment-camera-obscura-kdyz-zatemnite-mistnost
[17] WAYNE, Tony. Light - introduction: Obrázek. Mr. Wayne's class [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: https://www.mrwaynesclass.com/lightintro/index03.html
[18] Bopp J, Felsner L, Hu S, et al. Young's Double-Slit Experiment: X-ray Phase Contrast: Research on a Future Imaging Modality [online]. [cit. 2021-12-17]. Dostupné z: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK546148/figure/ch9.fig1
[19] HORÁK, Karel. Počitačové vidění: Počítačové cvičení [online]. Brno: FEKT VUT, 2008 [cit. 2021-11-04].
[20] DE, Kanjar a V. MASILAMANI. Image Sharpness Measure for Blurred Images in Frequency Domain. Procedia Engineering [online]. Elsevier, 2013, 2013, 64, 149-158 [cit. 2021-11-14]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi: 10.1016/j.proeng.2013.09.086
[21] KUMAR, Jayant, Francine CHAN a David DOERMANN. Sharpness Estimation for Document and Scene Images [online]. , 4 [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.363.2130&rep=rep1&type=pdf
[22] Basler. USER'S MANUAL FOR GigE VISION CAMERAS: AW001183 [online]. Version: 02. 2013 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: www.baslerweb.com
[23] DENG, G. a L.W. CAHILL. An adaptive Gaussian filter for noise reduction and edge detection. 1993 IEEE Conference Record Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference [online]. IEEE, 1993, , 1615-1619 [cit. 2021-11-18]. ISBN 0-7803-1487-5. Dostupné z: doi:10.1109/NSSMIC.1993.373563
[24] WINKLER, Jeffery. Snell's Law [online]. In: . 4.2017, s. 2 [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.21517.69609
[25] KRÁLOVÁ, Magda. Vznik otvorové vady u čočky a zrcadla: Obrázek. Techmania [online]. Plzeň, 2007 [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/svetlo/opticke-zobrazovani/vady-optickych-soustav

[26] LOERTSCHER, Miriam L., David WEIBEL, Simon SPIEGEL, Barbara FLUECKIGER, Pierre MENNEL, Fred W. MAST a Christian ISELI. As film goes byte: The change from analog to digital film perception. Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts [online]. 2016, 10(4), 458-471 [cit. 2022-01-01]. ISSN 1931-390X. Dostupné z: doi:10.1037/aca0000082

[27] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Barevná vada Obr.116: Obrazek [online]. 2006 - 2021 [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/482-zobrazovaci-vady-cocek

[28] RENNER, Eric. Pinhole photography: from historic technique to digital application. 4th ed. Boston: Focal Press, c2009. [cit. 2022-02-06] ISBN 978-0-240-81047-8.

[29] ŠETINA, Jan, Bereniia ČERMAKOVÁ a Kateřina LIMBURSKÁ. Fotografování bez fotoaparátu: Obrázek [online]. 2015 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: https://kdf.mff.cuni.cz/tabor_old/2015/odborny/fotografie/dokumentace_Foto_bez_foto.pdf

[30] LANK, Vladimír, a VONDRA Miroslav. Fyzika v kostce: pro střední školy. Praha: Fragment, 2007. Maturita v kostce. [cit. 2022-02-16] ISBN 978-80-253-0228-6.

[31] EASTON Rodger L., Jr. Fundamentals of Digital Image Processing,[online] 2010. [cit. 2022-03-10] Dostupné z: https://www.cis.rit.edu/class/simg361/Notes_11222010.pdf

[32] HLAVÁČ, Václav, Jasové a geometrické transformace, ČVUT.[online] [cit. 2022-03-22] Dostupné z: https://cw.fel.cvut.cz/old/_media/courses/a4m33dzo/18brightgeomtxcz.pdf

[33] HARTLEY, R. I., a ZISSERMAN, A. Multiple View Geometry in Computer Vision. [online] Cambridge University Press, [cit. 2022-04-11] 2004.

[34] ŘÍHA Kamil, a HUJKA Petr, Epipolární geometrie, 2005. [cit. 2022-03-13] Dostupné z: http://www.elektrorevue.cz/clanky/05017/index.html

[35] BASLER, Product Documentation [online]. [cit. 2022-05-01] Dostupné z: https://docs.baslerweb.com/network-configuration-(gige-cameras)

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - VÝSLEDKY MĚŘENÍ 68
PŘÍLOHA B - STRUKTURA ADRESÁŘŮ PŘÍLOHY 81
PŘÍLOHA C - 3D MODELY MĚŘENÝCH PŘEDMĚTŮ 83
PŘÍLOHA D - KROKY ZPRACOVÁNÍ OBRAZU 86

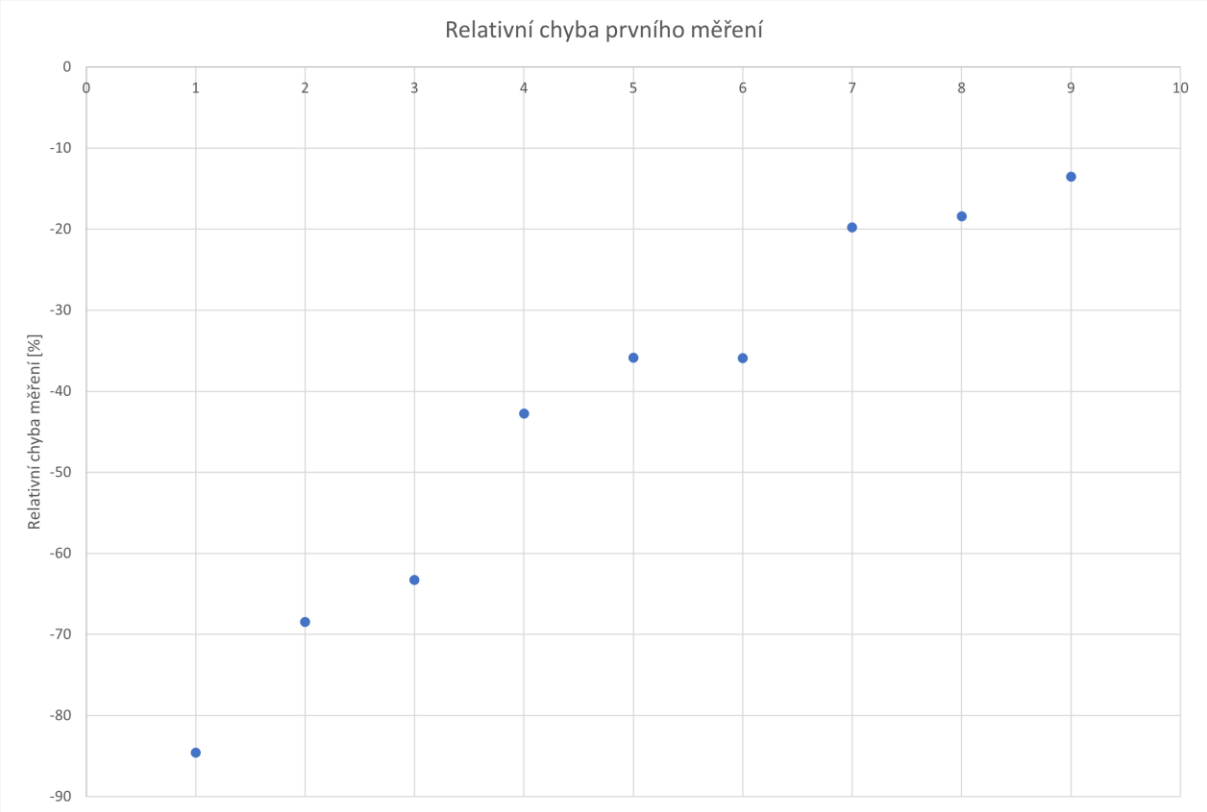
Příloha A - Výsledky měření

A.1 První měření

i. Tabulka výsledků

Referenční výška [mm]	Měřená výška [mm]	Absolutní chyba měření [mm]	Relativní chyba měření [%]
9,00	1,39	-7,61	-84,58
9,00	2,84	-6,16	-68,44
9,00	3,30	-5,70	-63,29
18,00	10,30	-7,70	-42,78
18,00	11,54	-6,46	-35,86
18,00	11,54	-6,46	-35,91
27,00	21,66	-5,34	-19,78
27,00	22,02	-4,98	-18,45
27,00	23,34	-3,66	-13,55

ii. Graf relativní chyby měření

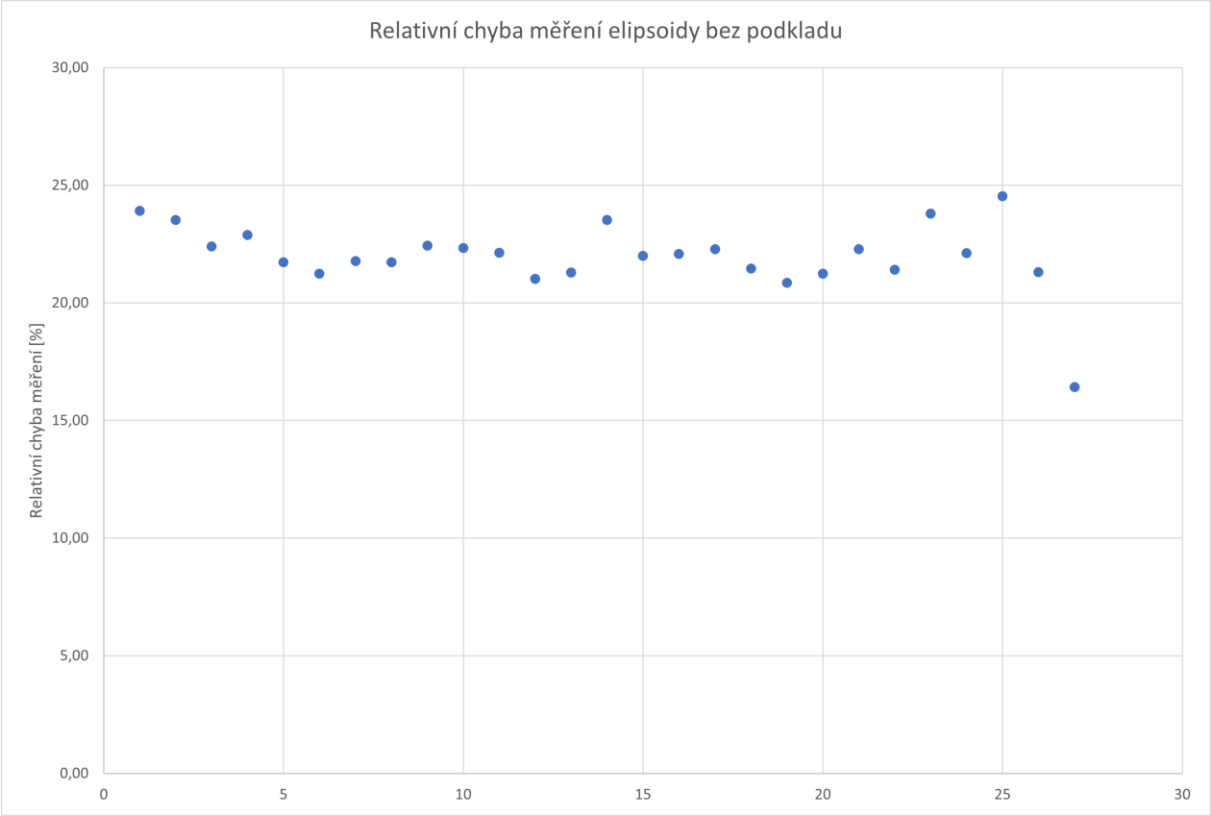


A.2 Měření v rovině V bez podkladu

i. Tabulka měření výseku elipsoidu

Referenční výška [mm]	Měřená výška [mm]	Absolutní chyba měření [mm]	Relativní chyba měření [%]
14,00	17,35	3,35	23,91
17,00	21,00	4,00	23,52
19,75	24,17	4,42	22,39
22,20	27,28	5,08	22,89
24,75	30,13	5,38	21,73
27,20	32,98	5,78	21,24
29,40	35,80	6,40	21,78
31,50	38,35	6,85	21,73
33,15	40,58	7,43	22,43
34,90	42,69	7,79	22,33
36,40	44,45	8,05	22,13
37,90	45,87	7,97	21,02
39,00	47,30	8,30	21,29
39,70	49,04	9,34	23,53
39,20	47,82	8,62	22,00
38,00	46,39	8,39	22,08
36,60	44,76	8,16	22,29
35,15	42,69	7,54	21,46
33,60	40,61	7,01	20,85
31,70	38,43	6,73	21,24
29,60	36,19	6,59	22,28
27,25	33,09	5,84	21,41
24,90	30,82	5,92	23,79
22,50	27,48	4,98	22,12
19,90	24,78	4,88	24,53
17,40	21,11	3,71	21,31
14,75	17,17	2,42	16,43

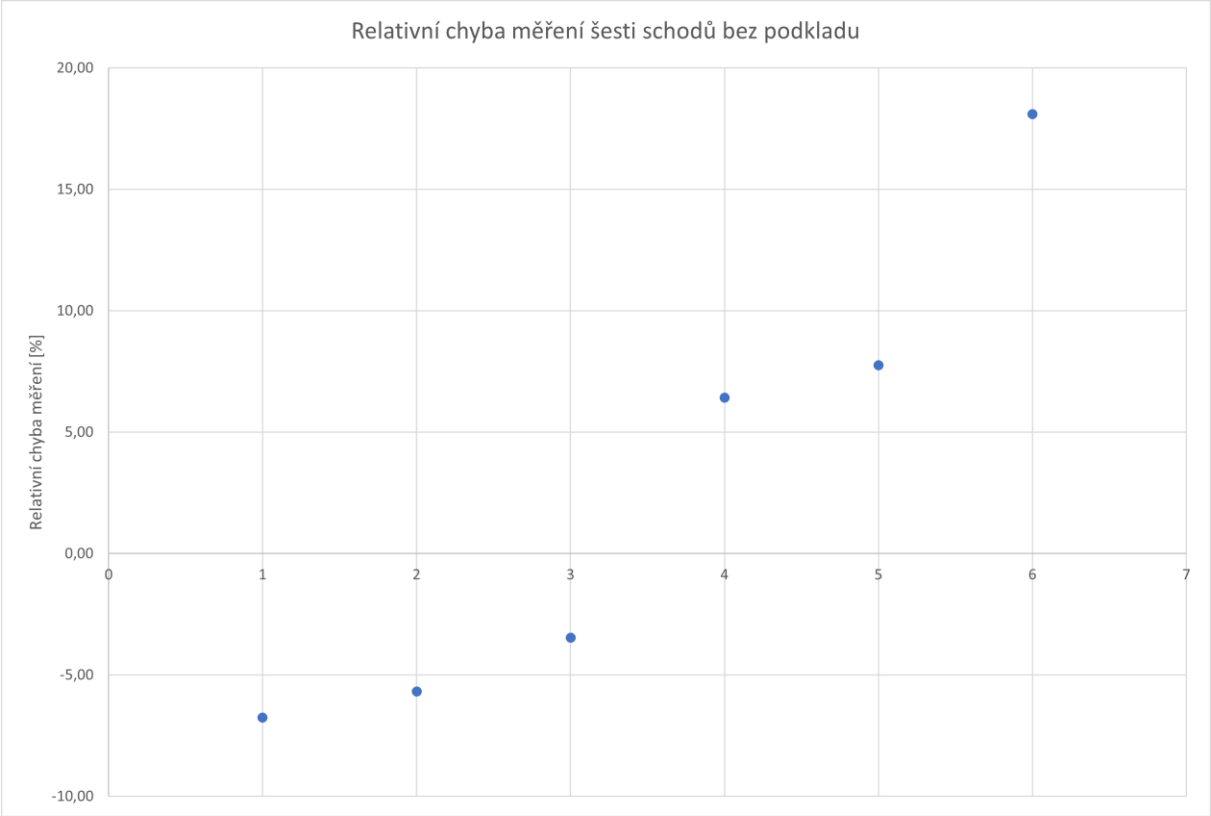
ii. Graf měření výseku elipsoidu



iii. Tabulka měření šesti schodů

Referenční výška [mm]	Měřená výška [mm]	Absolutní chyba měření [mm]	Relativní chyba měření [%]
5	4,66	-0,34	-6,75
10	9,43	-0,57	-5,67
15	14,48	-0,52	-3,46
20	21,28	1,28	6,42
25	26,94	1,94	7,76
30	35,43	5,43	18,10

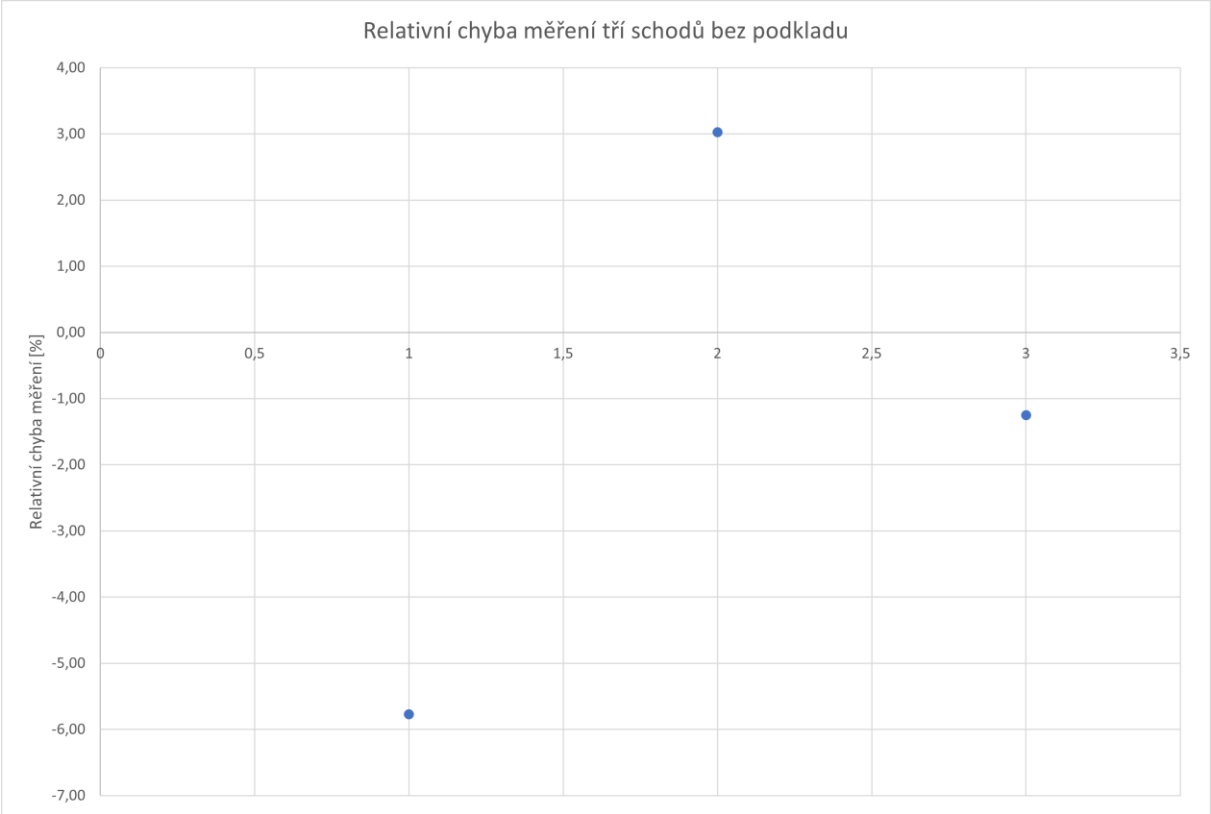
iv. Graf měření šesti schodů



v. Tabulka měření tří schodů

Referenční výška [mm]	Měřená výška [mm]	Absolutní chyba měření [mm]	Relativní chyba měření [%]
10,00	9,42	-0,58	-5,77
20,00	20,60	0,60	3,02
30,00	29,63	-0,37	-1,25

vi. Graf měření tří schodů



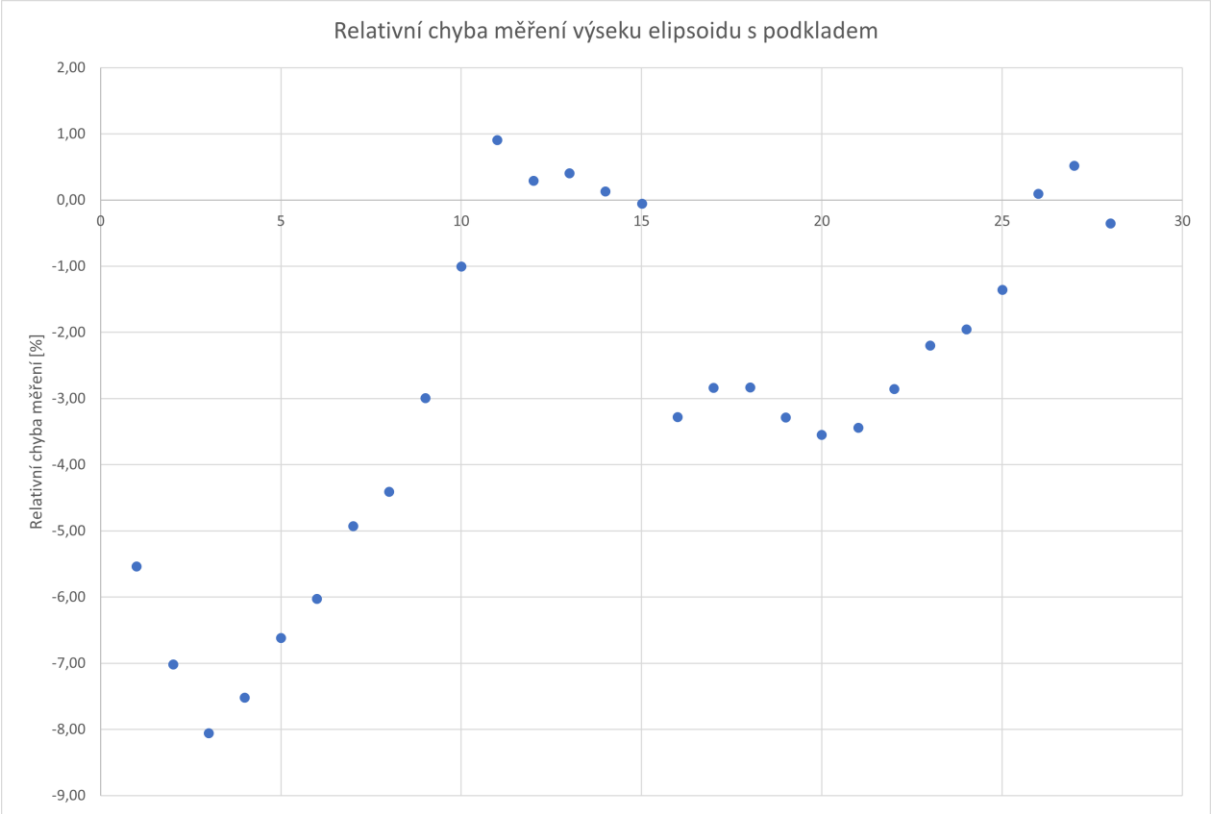
A.3 Měření v rovině V s podkladem

i. Tabulka měření elipsoidu s podkladem

Referenční výška [mm]	Měřená výška [mm]	Absolutní chyba měření [mm]	Relativní chyba měření [%]
14,00	13,22	-0,78	-5,54
17,00	15,81	-1,19	-7,02
19,75	18,16	-1,59	-8,06
22,20	20,53	-1,67	-7,52
24,75	23,11	-1,64	-6,62
27,20	25,56	-1,64	-6,03
29,40	27,95	-1,45	-4,93
31,50	30,11	-1,39	-4,41
33,15	32,16	-0,99	-2,99
34,90	34,55	-0,35	-1,01
36,40	36,73	0,33	0,90
37,90	38,01	0,11	0,29
39,00	39,16	0,16	0,40
39,70	39,75	0,05	0,13
40,50	40,48	-0,02	-0,06
39,20	37,91	-1,29	-3,28
38,00	36,92	-1,08	-2,84

36,60	35,56	-1,04	-2,83
35,15	33,99	-1,16	-3,29
33,60	32,41	-1,19	-3,55
31,70	30,61	-1,09	-3,44
29,60	28,75	-0,85	-2,86
27,25	26,65	-0,60	-2,20
24,90	24,41	-0,49	-1,96
22,50	22,19	-0,31	-1,36
19,90	19,92	0,02	0,09
17,40	17,49	0,09	0,51
14,75	14,70	-0,05	-0,36

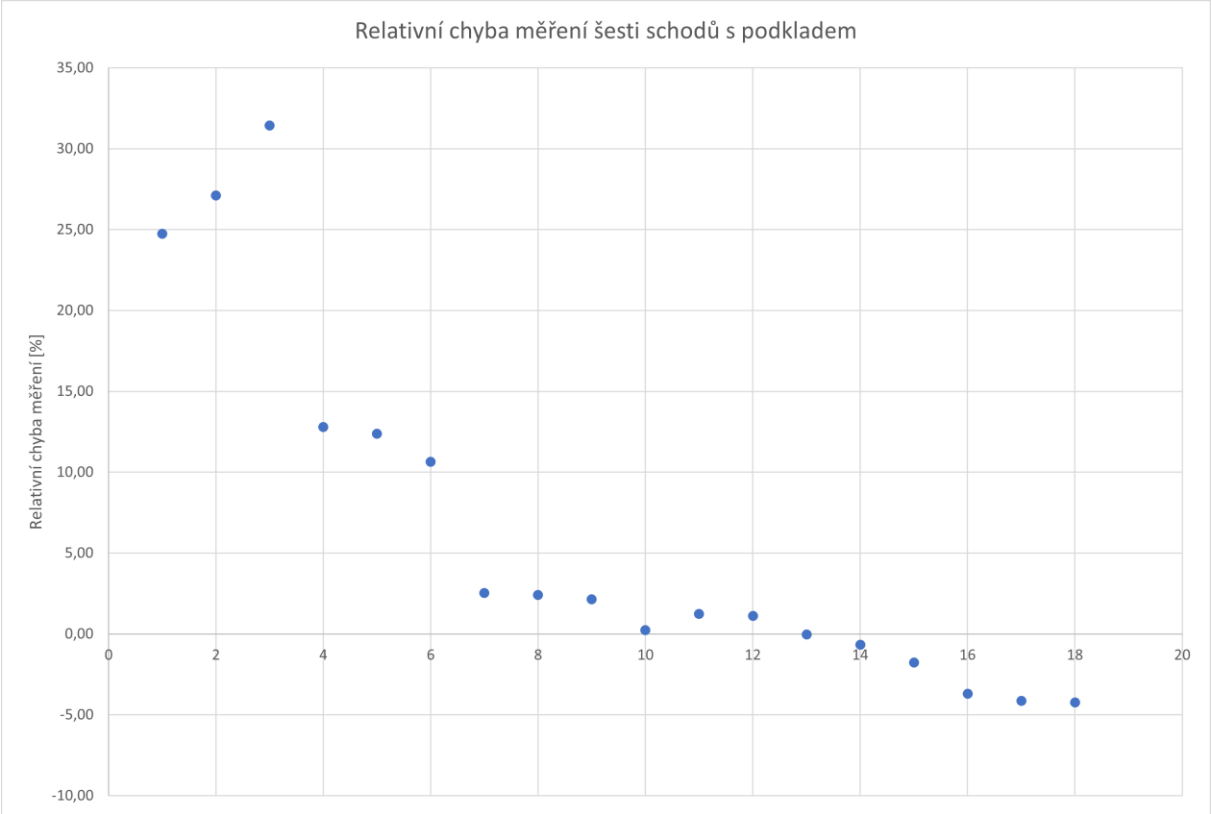
ii. Graf měření elipsoidu s podkladem¨



iii. Tabulka měření šesti schodů s podkladem

Referenční výška [mm]	Měřená výška [mm]	Absolutní chyba měření [mm]	Relativní chyba měření [%]
5,00	6,24	1,24	24,77
5,00	6,36	1,36	27,12
5,00	6,57	1,57	31,44
10,00	11,28	1,28	12,80
10,00	11,24	1,24	12,41
10,00	11,06	1,06	10,64
15,00	15,38	0,38	2,53
15,00	15,36	0,36	2,40
15,00	15,32	0,32	2,14
20,00	20,05	0,05	0,24
20,00	20,25	0,25	1,23
20,00	20,23	0,23	1,13
25,00	24,99	-0,01	-0,03
25,00	24,84	-0,16	-0,66
25,00	24,56	-0,44	-1,76
30,00	28,90	-1,10	-3,68
30,00	28,76	-1,24	-4,14
30,00	28,74	-1,26	-4,20

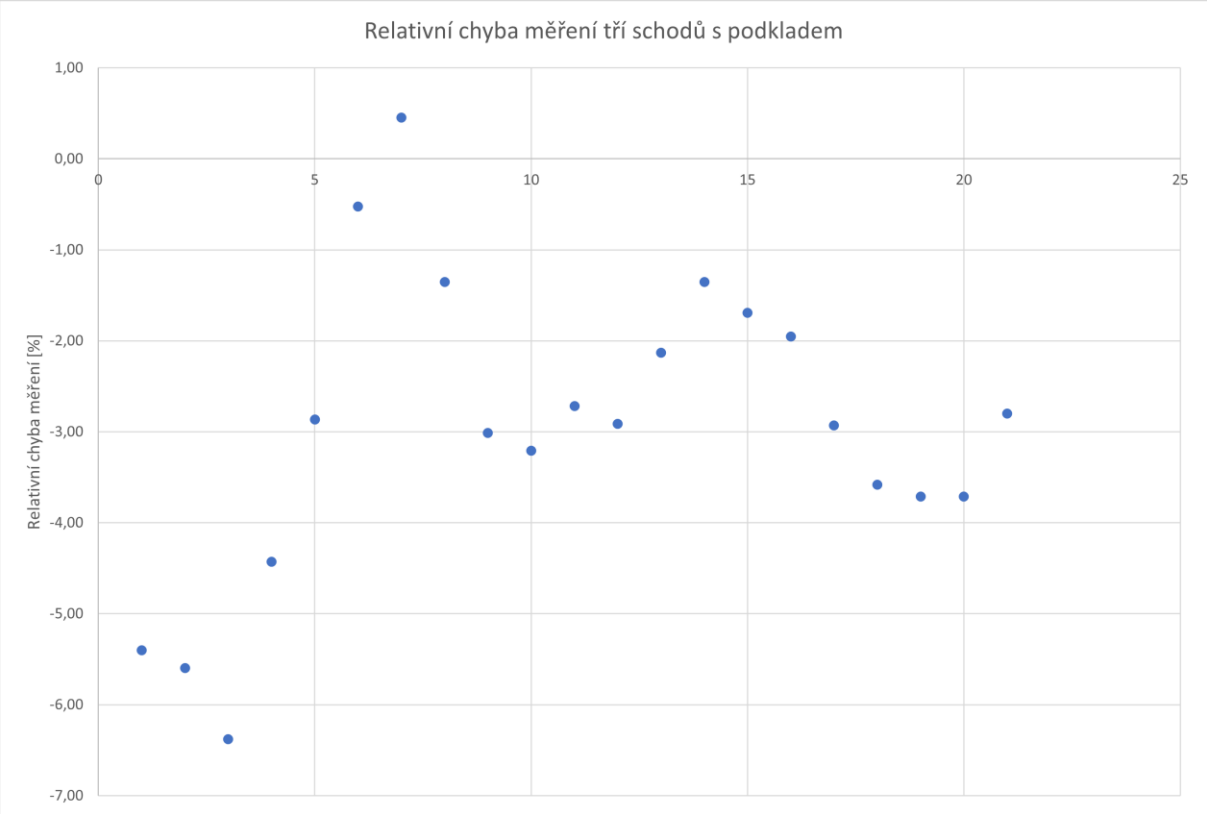
iv. Graf měření šesti schodů s podkladem



v. Tabulka měření tří schodů s podkladem

Referenční výška [mm]	Měřená výška [mm]	Absolutní chyba měření [mm]	Relativní chyba měření [%]
10,00	9,46	-0,54	-5,40
10,00	9,44	-0,56	-5,60
10,00	9,36	-0,64	-6,38
10,00	9,56	-0,44	-4,43
10,00	9,71	-0,29	-2,87
10,00	9,95	-0,05	-0,52
10,00	10,05	0,05	0,46
20,00	19,73	-0,27	-1,35
20,00	19,40	-0,60	-3,01
20,00	19,36	-0,64	-3,21
20,00	19,46	-0,54	-2,72
20,00	19,42	-0,58	-2,91
20,00	19,57	-0,43	-2,13
20,00	19,73	-0,27	-1,35
30,00	29,49	-0,51	-1,69
30,00	29,41	-0,59	-1,95
30,00	29,12	-0,88	-2,93
30,00	28,93	-1,07	-3,58
30,00	28,89	-1,11	-3,71
30,00	28,89	-1,11	-3,71
30,00	29,16	-0,84	-2,80

vi. Graf měření tří schodů s podkladem



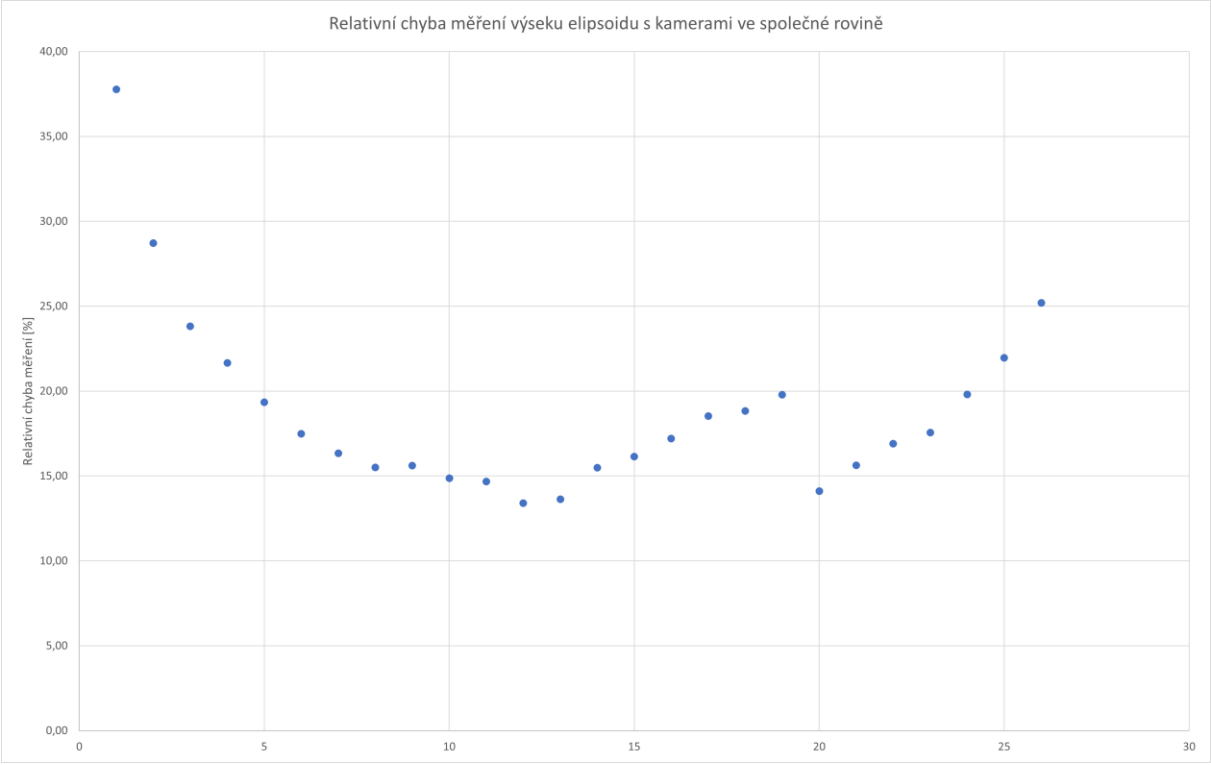
A.4 Měření ve společné rovině

i. Tabulka měření výseku elipsoidu

Referenční výška [mm]	Měřená výška [mm]	Absolutní chyba měření [mm]	Relativní chyba měření [%]
14,00	19,29	5,29	37,77
17,00	21,88	4,88	28,71
19,75	24,46	4,71	23,82
22,20	27,01	4,81	21,66
24,75	29,54	4,79	19,35
27,20	31,96	4,76	17,49
29,40	34,21	4,81	16,34
31,50	36,39	4,89	15,51
33,15	38,33	5,18	15,61
34,90	40,09	5,19	14,87
36,40	41,74	5,34	14,68
37,90	42,98	5,08	13,41
39,00	44,32	5,32	13,63
39,20	45,27	6,07	15,49
38,00	44,13	6,13	16,13
36,60	42,90	6,30	17,20

35,15	41,66	6,51	18,53
33,60	39,93	6,33	18,83
31,70	37,97	6,27	19,79
29,60	33,77	4,17	14,10
27,25	31,51	4,26	15,62
24,90	29,11	4,21	16,90
22,50	26,45	3,95	17,56
19,90	23,84	3,94	19,81
17,40	21,22	3,82	21,96
14,75	18,47	3,72	25,20

ii. Graf měření výseku elipsoidu

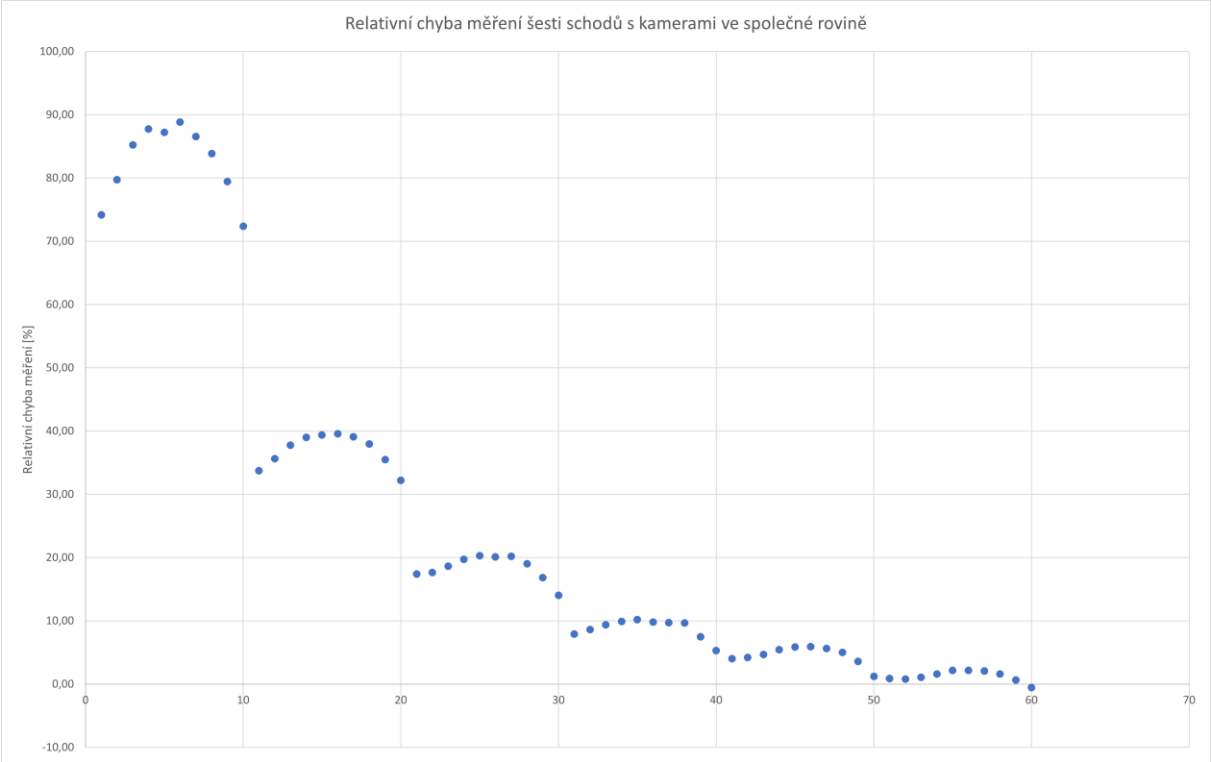


iii. Tabulka měření šesti schodů

Referenční výška [mm]	Měřená výška [mm]	Absolutní chyba měření [mm]	Relativní chyba měření [%]
5,00	8,71	3,71	74,17
5,00	8,99	3,99	79,71
5,00	9,26	4,26	85,25
5,00	9,39	4,39	87,75
5,00	9,36	4,36	87,21
5,00	9,44	4,44	88,85
5,00	9,33	4,33	86,57
5,00	9,19	4,19	83,87

5,00	8,97	3,97	79,42
5,00	8,62	3,62	72,37
10,00	13,37	3,37	33,74
10,00	13,56	3,56	35,64
10,00	13,78	3,78	37,76
10,00	13,90	3,90	39,01
10,00	13,94	3,94	39,40
10,00	13,96	3,96	39,56
10,00	13,91	3,91	39,08
10,00	13,79	3,79	37,94
10,00	13,55	3,55	35,50
10,00	13,22	3,22	32,19
15,00	17,61	2,61	17,38
15,00	17,65	2,65	17,64
15,00	17,79	2,79	18,61
15,00	17,96	2,96	19,74
15,00	18,04	3,04	20,28
15,00	18,02	3,02	20,10
15,00	18,03	3,03	20,21
15,00	17,85	2,85	19,02
15,00	17,52	2,52	16,81
15,00	17,10	2,10	14,03
20,00	21,58	1,58	7,90
20,00	21,73	1,73	8,63
20,00	21,87	1,87	9,37
20,00	21,98	1,98	9,88
20,00	22,04	2,04	10,18
20,00	21,97	1,97	9,83
20,00	21,94	1,94	9,70
20,00	21,93	1,93	9,67
20,00	21,49	1,49	7,47
20,00	21,05	1,05	5,27
25,00	26,01	1,01	4,03
25,00	26,05	1,05	4,18
25,00	26,17	1,17	4,68
25,00	26,36	1,36	5,44
25,00	26,46	1,46	5,86
25,00	26,48	1,48	5,92
25,00	26,41	1,41	5,64
25,00	26,25	1,25	5,01
25,00	25,90	0,90	3,60
25,00	25,31	0,31	1,24
30,00	30,26	0,26	0,87
30,00	30,23	0,23	0,78
30,00	30,32	0,32	1,05
30,00	30,48	0,48	1,61
30,00	30,65	0,65	2,18
30,00	30,65	0,65	2,16
30,00	30,62	0,62	2,07
30,00	30,49	0,49	1,62
30,00	30,20	0,20	0,66
30,00	29,84	-0,16	-0,52

iv. Graf měření šesti schodů

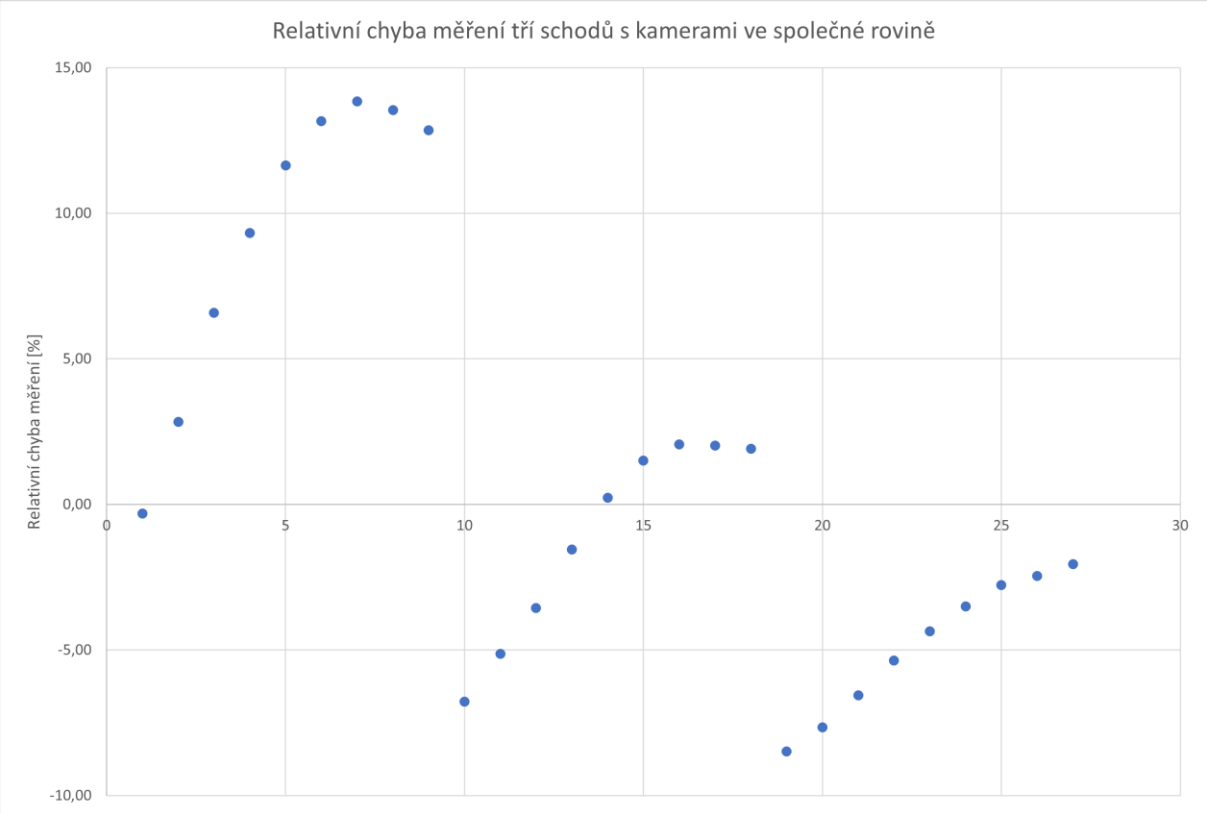


v. Tabulka měření tří schodů

Referenční výška [mm]	Měřená výška [mm]	Absolutní chyba měření [mm]	Relativní chyba měření [%]
10,00	9,97	-0,03	-0,32
10,00	10,28	0,28	2,83
10,00	10,66	0,66	6,58
10,00	10,93	0,93	9,32
10,00	11,16	1,16	11,64
10,00	11,32	1,32	13,16
10,00	11,38	1,38	13,85
10,00	11,35	1,35	13,54
10,00	11,29	1,29	12,85
20,00	18,64	-1,36	-6,78
20,00	18,97	-1,03	-5,13
20,00	19,29	-0,71	-3,55
20,00	19,69	-0,31	-1,55
20,00	20,05	0,05	0,23
20,00	20,30	0,30	1,51
20,00	20,41	0,41	2,06
20,00	20,41	0,41	2,03
20,00	20,38	0,38	1,91
30,00	27,46	-2,54	-8,48
30,00	27,70	-2,30	-7,65
30,00	28,03	-1,97	-6,55
30,00	28,39	-1,61	-5,36
30,00	28,69	-1,31	-4,36

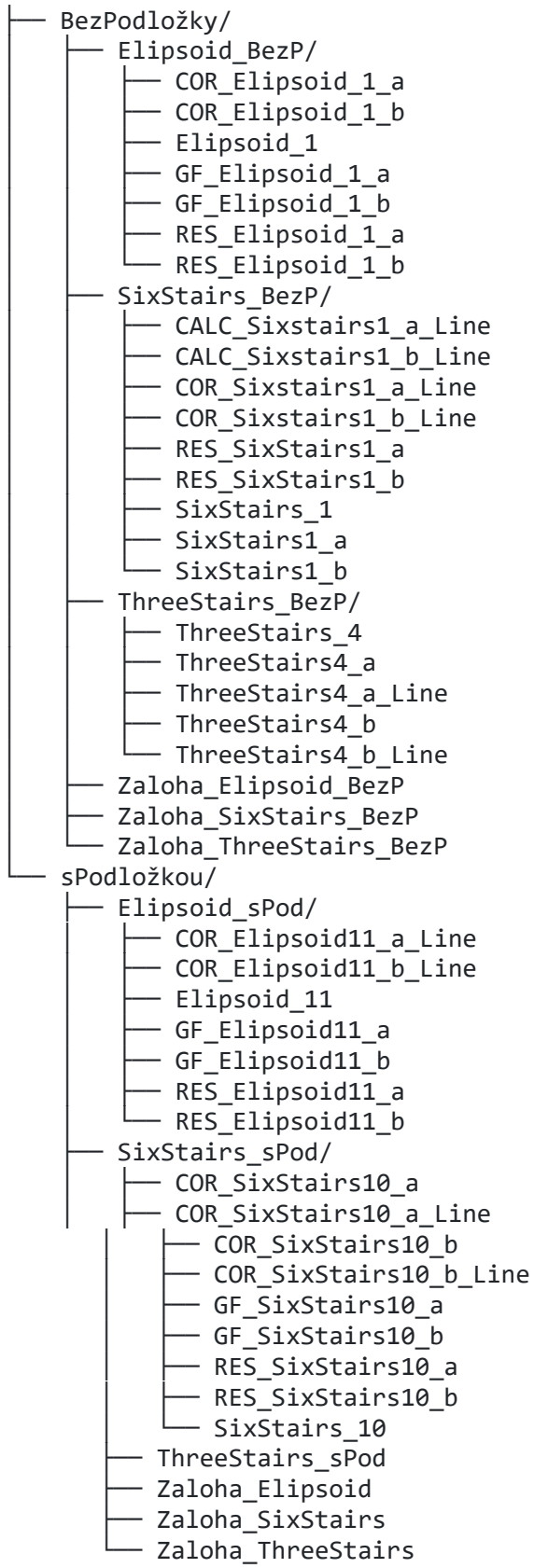
30,00	28,95	-1,05	-3,50
30,00	29,17	-0,83	-2,78
30,00	29,26	-0,74	-2,45
30,00	29,39	-0,61	-2,05

vi. Graf měření tří schodů



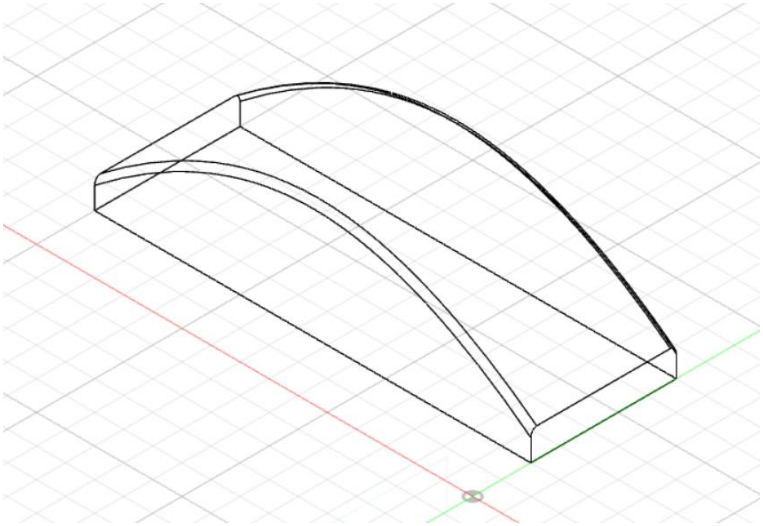
Příloha B - Struktura adresářů přiloženého DVD

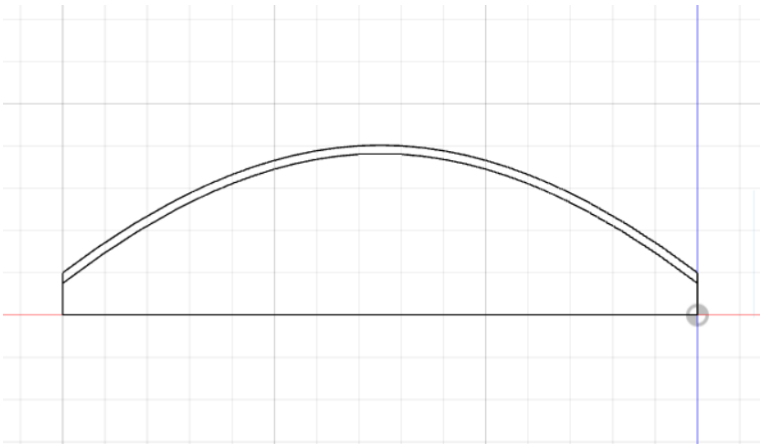
```
.
└── Příloha/
    ├── README
    ├── Skripty/
    │   ├── Semestrální_Práce/
    │   │   ├── Barevna_hloubka
    │   │   ├── Filtry
    │   │   ├── Hist
    │   │   ├── Pics
    │   │   ├── Pics_Col
    │   │   └── Pics_Contrast
    │   ├── Calculate_Elipsoid
    │   ├── Calculate_FindCircles
    │   ├── CircleDetection
    │   ├── CornerDetection
    │   ├── CornerDetectionV2
    │   ├── FrameMerge256
    │   ├── FrameMergeV2
    │   ├── Get3D
    │   ├── GetCorners
    │   ├── GetFrame
    │   └── Resize
    └── Zálohy/
        ├── VeSpolecneRovine/
        │   ├── Rovina/
        │   │   ├── Calculate_Elipsoid
        │   │   ├── Calculate_FindCircles
        │   │   ├── COR_I_Elipsoid1_a
        │   │   ├── COR_I_Elipsoid1_b
        │   │   ├── COR_I_SixStairs1_a
        │   │   ├── COR_I_SixStairs1_b
        │   │   ├── COR_I_Threestairs1_a
        │   │   ├── COR_I_Threestairs1_b
        │   │   ├── GF_I_Elipsoid1_a
        │   │   ├── GF_I_Elipsoid1_b
        │   │   ├── GF_I_SixStairs1_a
        │   │   ├── GF_I_SixStairs1_b
        │   │   ├── GF_I_Threestairs1_a
        │   │   ├── GF_I_Threestairs1_b
        │   │   ├── I_Elipsoid1
        │   │   ├── I_SixStairs1
        │   │   ├── I_ThreeStairs1
        │   │   ├── RES_I_Elipsoid1_a
        │   │   ├── RES_I_Elipsoid1_b
        │   │   ├── RES_I_SixStairs1_a
        │   │   ├── RES_I_SixStairs1_b
        │   │   ├── RES_I_Threestairs1_a
        │   │   └── RES_I_Threestairs1_b
        │   ├── ZALOHA_Rovina_Elipsoid
        │   ├── ZALOHA_Rovina_SixStairs
        │   └── ZALOHA_Rovina_ThreeStairs
        └── VeVRovine/
```

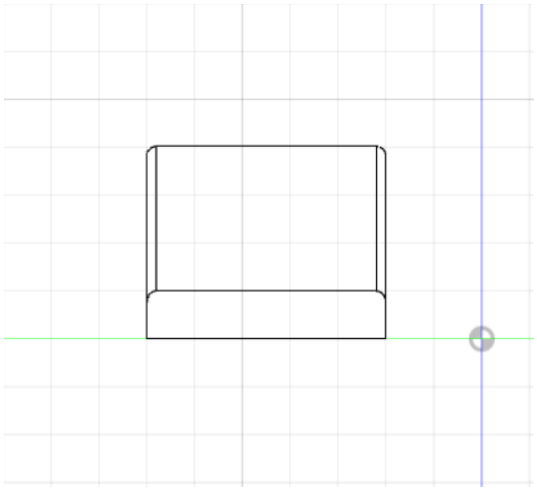

BezPodložky/
Elipsoid_BezP/
COR_Elipsoid_1_a
COR_Elipsoid_1_b
Elipsoid_1
GF_Elipsoid_1_a
GF_Elipsoid_1_b
RES_Elipsoid_1_a
RES_Elipsoid_1_b
SixStairs_BezP/
CALC_Sixstairs1_a_Line
CALC_Sixstairs1_b_Line
COR_Sixstairs1_a_Line
COR_Sixstairs1_b_Line
RES_SixStairs1_a
RES_SixStairs1_b
SixStairs_1
SixStairs1_a
SixStairs1_b
ThreeStairs_BezP/
ThreeStairs_4
ThreeStairs4_a
ThreeStairs4_a_Line
ThreeStairs4_b
ThreeStairs4_b_Line
Zaloha_Elipsoid_BezP
Zaloha_SixStairs_BezP
Zaloha_ThreeStairs_BezP
sPodložkou/
Elipsoid_sPod/
COR_Elipsoid11_a_Line
COR_Elipsoid11_b_Line
Elipsoid_11
GF_Elipsoid11_a
GF_Elipsoid11_b
RES_Elipsoid11_a
RES_Elipsoid11_b
SixStairs_sPod/
COR_SixStairs10_a
COR_SixStairs10_a_Line
COR_SixStairs10_b
COR_SixStairs10_b_Line
GF_SixStairs10_a
GF_SixStairs10_b
RES_SixStairs10_a
RES_SixStairs10_b
SixStairs_10
ThreeStairs_sPod
Zaloha_Elipsoid
Zaloha_SixStairs
Zaloha_ThreeStairs

Příloha C - 3D modely měřených předmětů

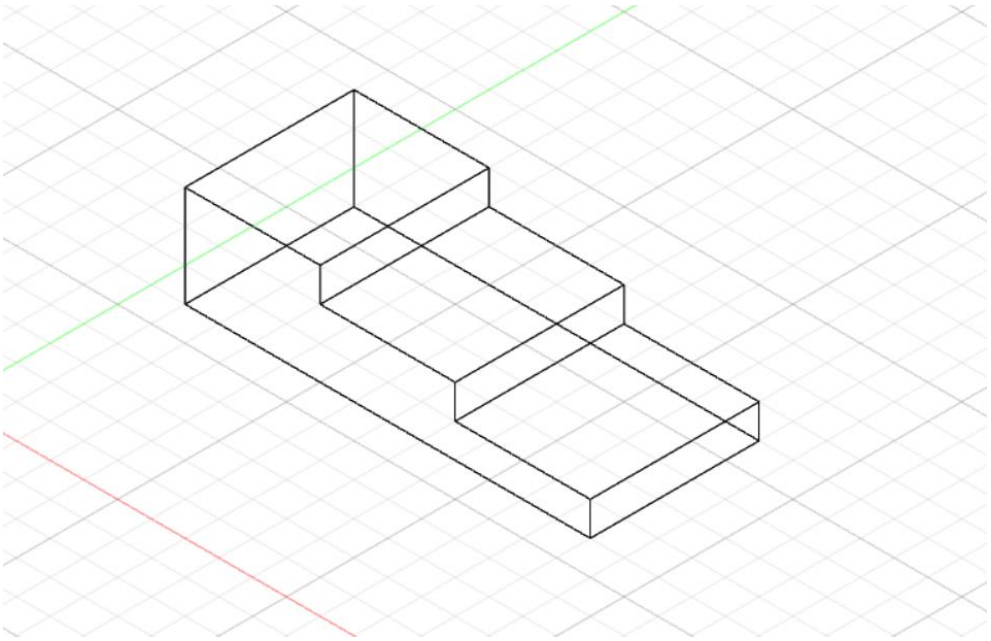
C.1 Výsek elipsoidu

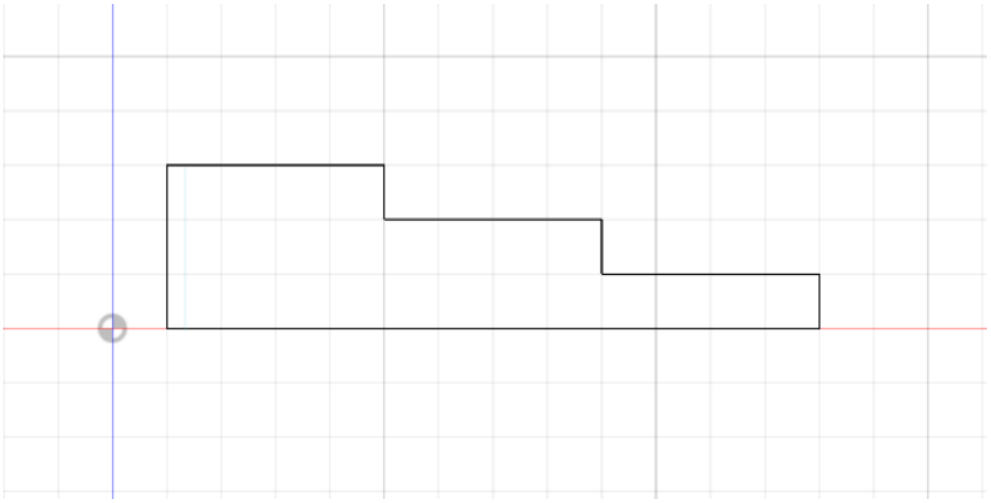


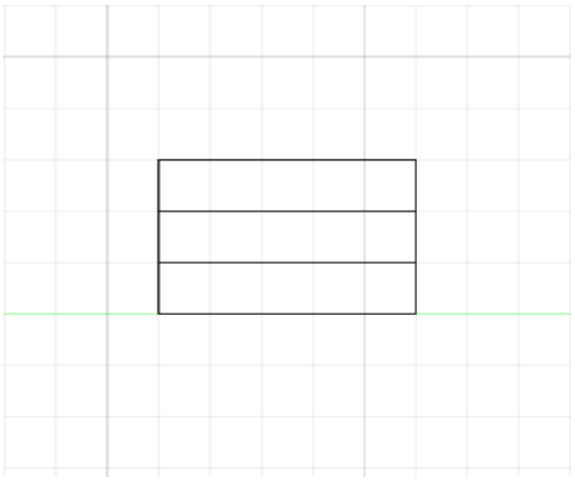




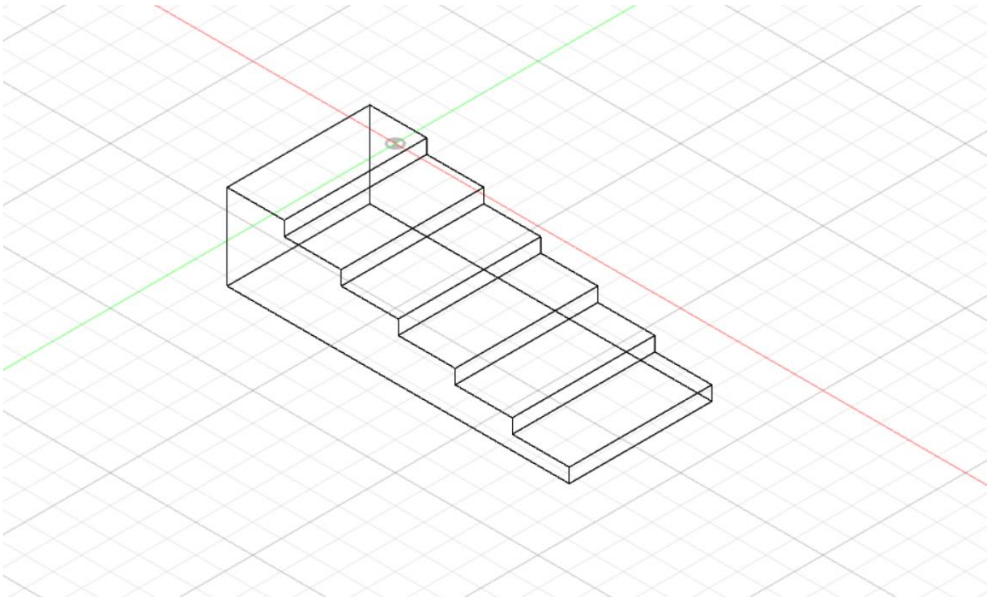
C.2 Tři schody

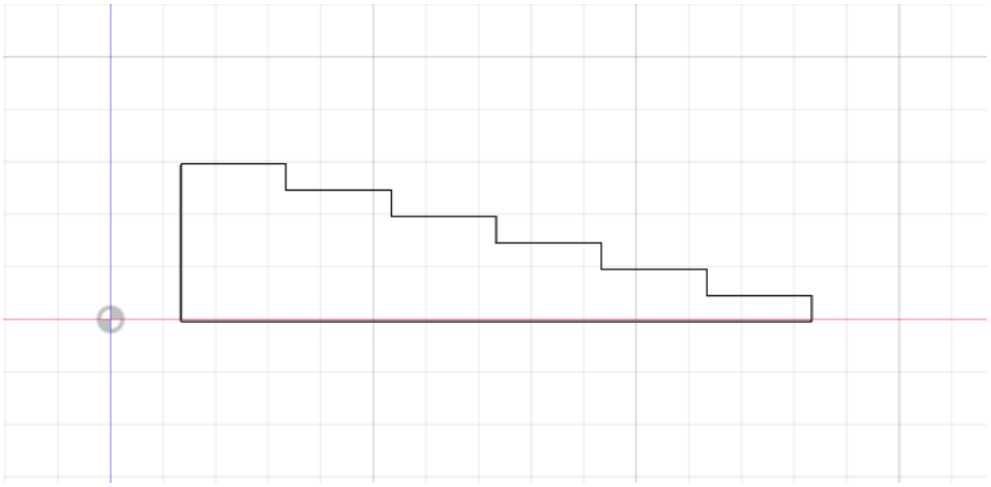


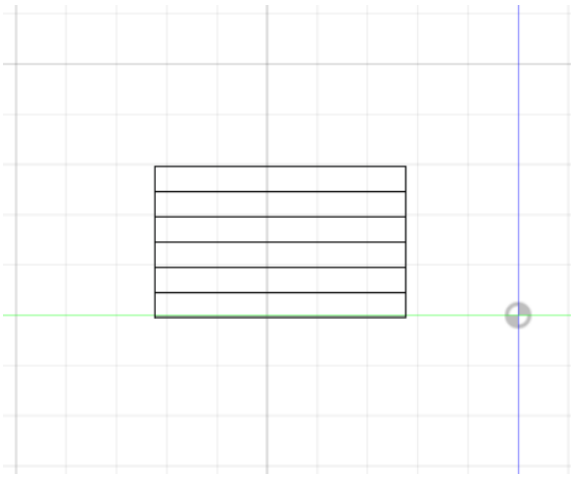


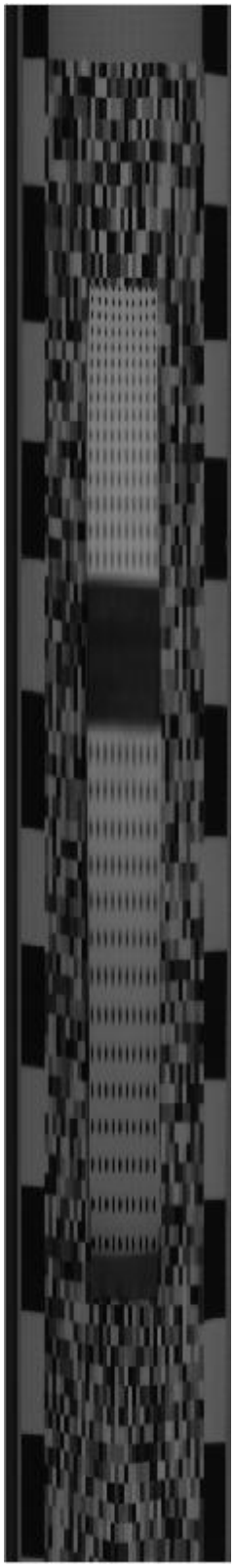
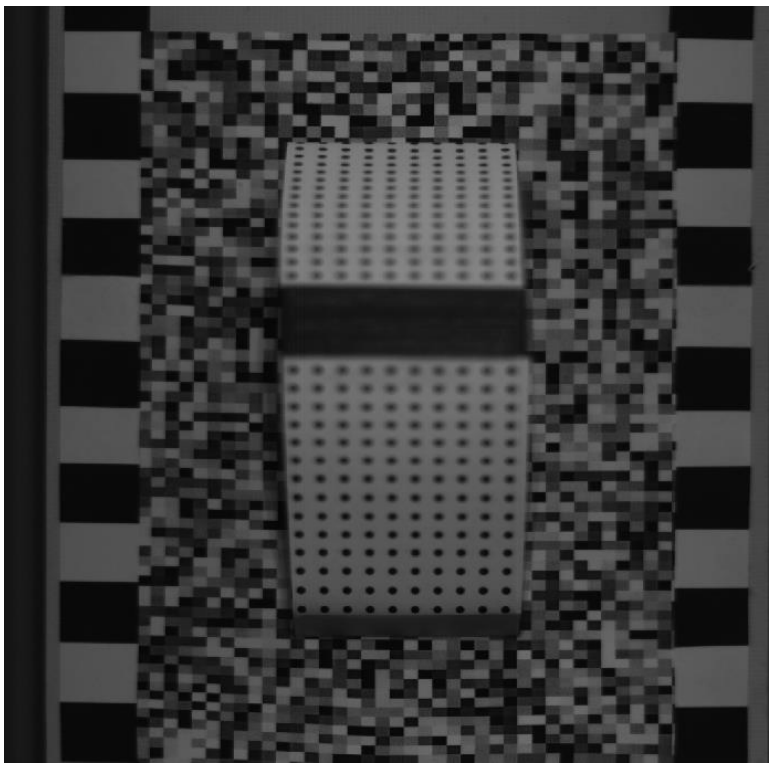
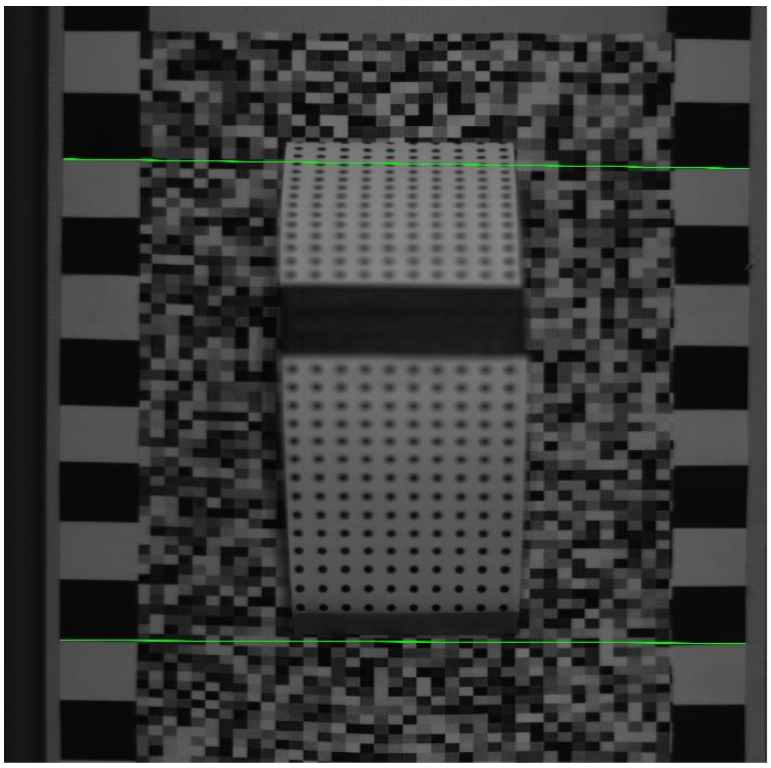


C.3 Šest schodů







Příloha D - Kroky zpracování obrazu

D.1 Výsledky jednotlivých skriptů – elipsoid