



## Zadání bakalářské práce

<b>Název:</b>	Měření rozměrů a tvarů bižuterních diamantů
<b>Student:</b>	Justýna Frommová
<b>Vedoucí:</b>	Ing. Jakub Novák
<b>Studijní program:</b>	Informatika
<b>Obor / specializace:</b>	Webové a softwarové inženýrství, zaměření Počítačová grafika
<b>Katedra:</b>	Katedra softwarového inženýrství
<b>Platnost zadání:</b>	do konce letního semestru 2022/2023

### Pokyny pro vypracování

Cílem práce je měřit velikost, rozměry a celkový tvar bižuterních diamantů o průměrné velikosti několik jednotek mm.

Výroba bižuterních diamantů se vyznačuje velkou dávkou preciznosti zpracování, která je ještě umocněna velikostí jednotlivých kamenů. Práce se zaměřuje na metody měření a hodnocení přesnosti s použitím metod zpracování obrazu. Práce předpokládá využití pokročilých optických prvků a osvětlení (např. telecentrický objektiv, koaxiální světlo, apod.)

Úkoly:

- 1) Proveďte rešerši v oblasti metod snímání podobných materiálů a jejich měření pomocí zpracování obrazu.
- 2) Sestavte měřicí kamerový systém pro snímání materiálu.
- 3) Vytvořte metodiku měření včetně specifikace měřených vlastností materiálu.
- 4) Navrhněte algoritmy měření a hodnocení pomocí metod zpracování obrazu.
- 5) Otestujte výsledky navržených algoritmů a zhodnoťte úspěšnost.
- 6) Vizualizujte výsledky algoritmu na obrazových datech.





**FAKULTA  
INFORMAČNÍCH  
TECHNOLÓGIÍ  
ČVUT V PRAZE**

Bakalářská práce

## Měření rozměrů a tvarů bižuterních diamantů

*Justýna Frommová*

Katedra aplikované matematiky  
Vedoucí práce: Ing. Jakub Novák

13. května 2021



---

## Poděkování

Ráda bych velice poděkovala Ing. Jakubu Novákovi za nesmírnou ochotu, cenné rady, konstruktivní připomínky a přátelský přístup. Dále bych ráda poděkovala celému Improlabu za vypůjčení techniky esenciální pro vytvoření práce a pomoc během celého procesu snímání.



---

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů, zejména skutečnost, že České vysoké učení technické v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 citovaného zákona.

V Praze dne 13. května 2021

.....

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta informačních technologií

© 2021 Justýna Frommová. Všechna práva vyhrazena.

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí a nad rámec oprávnění uvedených v Prohlášení na předchozí straně, je nezbytný souhlas autora.*

### **Odkaz na tuto práci**

Frommová, Justýna. *Měření rozměrů a tvarů bižuterních diamantů*. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, 2021.



---

# Abstrakt

Tato práce se zabývá měřením rozměrů bižuterních kamenů na základě počítačového vidění a zpracování obrazu. Kvalita bižuterních šatonů je kontrolována pomocí velikosti kružnice opsané, kružnice vepsané, kružnice vepsané tabulce diamantu, míry vyleštění a vyosení středu diamantu. V rámci vlastní realizace byly sestaveny tři snímací soustavy z monochromatické kamery, telecentrického objektivu, koaxiálního světla a specifických difuzorů na světla kruhová a pruhová. Byly implementovány čtyři algoritmy, které využívají Canny-Otsu detektor, Otsuovo prahování a watershed algoritmus segmentace. Algoritmy měří velikosti kružnic s přesností 0,0098 mm, odchylka velikostí stejných kamenů v závislosti na poloze ve snímku se pohybuje v rozmezí 0,0028 mm až 0,0040 mm.

**Klíčová slova** počítačové vidění, bižuterní kameny, měření rozměrů, snímací soustava, zpracování obrazu, kontrola vlastností, canny-otsu detektor, watershed

---

# Abstract

The focus of this thesis is on the size measurement of jewelry stones based on computer vision and image processing. The quality of jewelry stones is inspected by the size of its circumscribed and inscribed circle, the size of the circumscribed circle of the diamond's table, level of polish and center offset. Three acquisition systems and four algorithms are presented. The acquisition system is composed of a monochromatic camera, a telecentric lens, a coaxial light and a specific bar diffuser and ring diffuser. Algorithms are implemented using the Canny-Otsu detector, Otsu thresholding and watershed segmentation. The accuracy of the measurements is 0,0098 mm, size deviation related to the position in the image oscillates within a range of 0,0028 mm and 0,0040 mm.

**Keywords** computer vision, jewelry stones, size measurement, acquisition system, image processing, features check, canny-otsu detector, watershed

---

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Rešerše</b>	<b>3</b>
1.1 Snímací soustava . . . . .	3
1.2 Předzpracování obrazu . . . . .	3
1.3 Měření bižuterních kamenů . . . . .	4
<b>2 Teoretické zázemí</b>	<b>7</b>
2.1 Snímací soustava . . . . .	7
2.1.1 Kamera . . . . .	7
2.1.2 Objektiv . . . . .	8
2.1.3 Osvětlení . . . . .	9
2.2 Zpracování obrazu . . . . .	11
2.2.1 Segmentace . . . . .	11
2.2.2 Filtrace . . . . .	13
2.2.3 Detektory hran . . . . .	13
2.2.4 Morfologické operace . . . . .	14
2.2.5 Kontury . . . . .	15
<b>3 Analýza</b>	<b>17</b>
3.1 Bižuterní kameny . . . . .	17
3.2 Snímací soustava . . . . .	19
3.3 Metodika snímání . . . . .	21
3.3.1 Nasvícení tabulky koaxiálním světlem . . . . .	21
3.3.2 Nasvícení tabulky kruhovým světlem s difuzorem . . . . .	22
3.3.3 Nasvícení šatonu . . . . .	24
<b>4 Realizace</b>	<b>27</b>
4.1 Data . . . . .	27
4.2 Algoritmus měření DTV . . . . .	28

4.2.1	Tabulka jako bílá plocha . . . . .	28
4.2.2	Tabulka jako černá plocha . . . . .	31
4.3	Algoritmus měření DO . . . . .	33
4.4	Algoritmus měření DV . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Výsledky</b>	<b>39</b>
5.1	Měření vepsané kružnice tabulky šatonu . . . . .	39
5.1.1	Tabulka jako bílá plocha . . . . .	39
5.1.2	Tabulka jako černá plocha . . . . .	41
5.1.3	Porovnání . . . . .	42
5.2	Měření opsané kružnice a vizualizace kružnice vepsané šatonu .	43
<b>6</b>	<b>Diskuze</b>	<b>53</b>
	<b>Závěr</b>	<b>55</b>
	<b>Bibliografie</b>	<b>57</b>
<b>A</b>	<b>Seznam použitých zkratk</b>	<b>61</b>
<b>B</b>	<b>Obsah přiloženého paměťového média</b>	<b>63</b>

---

## Seznam obrázků

1.1	Kroky předzpracování obrazu a metriky brambory . . . . .	4
1.2	Úhel nasvícení vůči kameře a objektu . . . . .	5
2.1	Kamera Basler acA2500-60um . . . . .	8
2.2	Paprsky procházející telecentrickým objektivem . . . . .	9
2.3	Schéma předního nasvícení . . . . .	10
2.4	Geometrie koaxiálního osvětlení . . . . .	10
2.5	Geometrický náskres světél . . . . .	11
2.6	Porovnání přístupu růstu zaplavených oblastí . . . . .	12
2.7	Příklad distanční transformace . . . . .	12
2.8	Konvoluce . . . . .	13
2.9	Morfologické operace . . . . .	15
2.10	Vliv velikosti a tvaru strukturního elementu . . . . .	15
3.1	Náskres šatonu s tabulkou . . . . .	17
3.2	Nosič s šatony . . . . .	18
3.3	Profil vad mikroreliefu . . . . .	19
3.4	Měřené rozměry šatonu . . . . .	19
3.5	Šířka stojky nosiče pod šatonem . . . . .	21
3.6	Nasvícení tabulky koaxiálním světlem . . . . .	22
3.7	Snímací soustava č. 1 . . . . .	23
3.8	Nasvícení šatonu - tabulka . . . . .	23
3.9	Difuzor pro kruhové světlo . . . . .	24
3.10	Snímací soustava č. 2 . . . . .	24
3.11	Difuzor pro pruhové světlo . . . . .	25
3.12	Snímací soustava č. 3 . . . . .	25
4.1	Barevné snímky šatonů . . . . .	28
4.2	Typy snímků ze snímacích soustav . . . . .	29
4.3	Diagram algoritmu měření DTV - bílá tabulka . . . . .	30
4.4	Obrázkový diagram algoritmu měření DTV - bílá tabulka . . . . .	30

4.5	Dvojice vrcholů pro výpočet vepsaných kružnic tabulky . . . . .	31
4.6	Rozdíl mezi vyleštěným a nevyleštěným šatonem . . . . .	31
4.7	Diagram algoritmu měření DTV - černá tabulka . . . . .	32
4.8	Obrázkový diagram algoritmu měření DTV - černá tabulka . . . . .	32
4.9	Diagram algoritmu měření DO . . . . .	33
4.10	Obrázkový diagram algoritmu měření DO . . . . .	34
4.11	Vliv hodnoty prahu na segmentaci . . . . .	35
4.12	Dvojice vrcholů pro výpočet průměru opsané kružnice . . . . .	35
4.13	Ukázka vyoseného a nevyoseného středu šatonů . . . . .	36
5.1	Vizualizace výsledků algoritmu na snímcích ze soustavy č. 1 . . . . .	40
5.2	Vizualizace výsledků algoritmu na snímcích ze soustavy č. 1 . . . . .	47
5.3	Chybné vyhodnocení šatonů s tabulkou . . . . .	48
5.4	Vizualizace výsledků algoritmu na snímcích ze soustavy č. 3 u šatonů bez tabulky . . . . .	49
5.5	Vizualizace výsledků algoritmu na snímcích ze soustavy č. 3 u šatonů s tabulkou . . . . .	50
5.6	Porovnání vlivu světla na vyhodnocení výsledků . . . . .	51
5.7	Ukázka slití kontur . . . . .	51
5.8	Falešné vyhodnocení vyoseného středu . . . . .	52

---

## Seznam tabulek

3.1	Parametry kamery Basler acA2500-60um . . . . .	20
3.2	Parametry objektivu Vital Vision VS-THV1-80CO/S . . . . .	20
5.1	Část výsledků z měření odchylky DTV – bílá . . . . .	41
5.2	Část výsledků z měření odchylky DTV – černá . . . . .	42
5.3	Část výsledků porovnání algoritmů DTV . . . . .	43
5.4	Část výsledků z měření odchylky DO – šaton s tabulkou . . . . .	45
5.5	Část výsledků z měření odchylky DO – šaton bez tabulky . . . . .	46





---

# Úvod

Nedílnou součástí průmyslové výroby je kontrola kvality, která s nástupem nových technologií graduje a nahrazuje chybu lidského faktoru nepřesností automatické kontroly. V bižuterním průmyslu je kladen velký důraz na opticko-estetické vlastnosti, které jsou pouhým okem občas těžko kontrolovatelné. Bižuterní kameny dosahují velikosti pouze několika mm, kde každá desetina milimetru rozhoduje o výsledném vzhledu a odlesku kamenů.

Práce se zabývá objektivní automatizací kontroly diamantů pomocí měření rozměrů vepsaných a opsaných kružnic. Obě tyto metriky jsou kvalitativního charakteru a jsou doposud subjektivně kontrolovány člověkem. Kontrola je ztížena milimetrovou velikostí diamantu a jejich množstvím, které je potřeba zkontrolovat. Metody navržené v práci efektivně a logicky řeší kvalitativní hodnocení bižuterních diamantů.

Cílem práce je pomocí počítačového vidění a zpracování obrazu sestavit měřicí kamerový systém, vytvořit algoritmy měření velikostí, tvarů bižuterních kamenů a hodnocení jejich přesnosti. Výsledky práce poslouží jako podklad pro studii proveditelnosti automatického systému měření bižuterních kamenů za účelem kontroly kvality v Jabloneckém podniku Preciosa, a.s.



---

# Rešerše

Systém pro vizuální inspekci objektů se obvykle skládá ze dvou podsystémů, zachycení snímku a zpracování obrazu [1].

## 1.1 Snímací soustava

V [1] je detailně zpracován návrh automatického systému monitorování a inspekce povrchů kol s průměrem pohybujícím se mezi 13 a 17 palci, s defekty minimálně 2 mm. Práce je zaměřena na klíčové faktory při výběru objektivu a kamery, například na pohyblivost snímaného objektu, povrchové vlastnosti objektu, velikost nejmenšího snímaného defektu, pozadí objektu či kompatibilitu objektivu s kamerou.

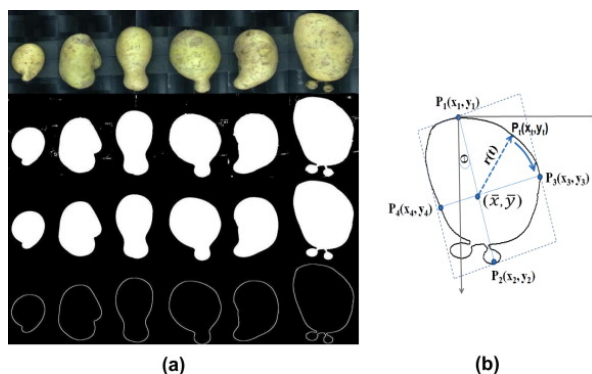
Pro přesné měření rozměrů ze snímku se obvykle používají telecentrické objektivy [2, 3, 4, 5].

## 1.2 Předzpracování obrazu

V předzpracování obrazu je zapotřebí se zaměřit na metody za účelem extrakce geometrických vlastností. Geometrické vlastnosti objektů jsou využívány v potravinářském průmyslu.

Například v [6] bylo představeno použití počítačového vidění a neurových sítí pro detekci a klasifikaci ořechů z palmy areca. Segmentace areca ořechů od pozadí byla sestavena z prahování, zaplnění děr, morfologické operace zavření a otevření. V [7] je navržen automatický systém hodnocení jahod pomocí zpracování obrazu. Oblast jahody bez stopky je vysegmentována pomocí Otsuovy metody pro následné měření průměrů jahody. [8] řeší systém pro detekci nepravidelných brambor v reálném čase. Díky kontrastnosti brambory vůči pozadí je segmentace prováděna globálním prahováním červeného

kanálu snímku. Pro odstranění šumu je na masku aplikován mediánový filtr velikosti  $5 \times 5$ , který díky své nelinearitě zachovává hrany ve snímku. Po nalezení kontury je vypočítán poloměr, momenty a Fourierovy koeficienty k určení tvaru.



Obrázek 1.1: Kroky předzpracování obrazu a metriky brambory. [8]

V [9] je vytvořen systém pro detekci a klasifikaci defektů sváření pomocí geometrických vlastností. Na odstranění nežádoucího šumu je použit mediánový filtr a pro zvýšení kontrastu snímku *high boost* filtr. Svarový šev je ze snímku extrahován Cannyho detektorem, po kterém následuje prahování podle Sauvola a morfologická operace top hat. Z binárního obrazu jsou extrahovány hodnoty obsahu, excentricity a poloměru.

[10] řeší problém obnovování prahů Cannyho detektoru při jasové či scénové změně. Fang et al. navrhují spojení Cannyho detekce a Otsuova prahování při nastavení minimálního a maximálního prahu detektoru. Maximální prah Cannyho detektoru je nastaven na hodnotu Otsuova prahu a minimální prah na hodnotu poloviny maximálního prahu.

Canny-Otsu detektor byl v praxi použit na segmentaci prasklin betonu [11], nebo na detekci žlutého lana za účelem navigace podvodního dronu snímajícího vlnolamy [12].

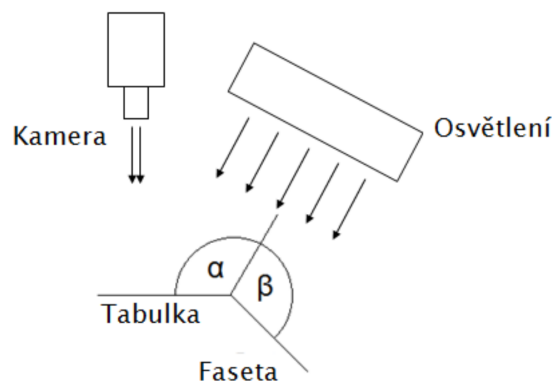
### 1.3 Měření bižuterních kamenů

V [13] se řeší především snímání mikroskopem a implementace měřícího softwaru pomocí programovacího prostředí LabVIEW<sup>1</sup>. Kameny jsou měřeny v pixelech, samotný algoritmus měření je implementován funkcí IMAQ Find Circular Edge, která najde kruhové hrany kamenu. Ze závěru práce lze vyvodit, že nasvícení kamenů velmi ovlivňuje výsledky.

<sup>1</sup><https://www.ni.com/cs-cz/shop/labview.html>

Kvalitativním hodnocením vlastností bižuterních kamenů se zabývá také [14], která klade důraz na aplikaci fuzzy logiky, fuzzy transformace a obrazové fúze. Nasnímaný obraz je předzpracován prahováním a segmentací. Následuje analýza, která zahrnuje hledání hran, hledání zlomových bodů a odstranění artefaktů. Po analýze je obraz složen dohromady a jsou z něj extrahovány charakteristické vlastnosti, které jsou použity pro porovnávání tvaru s maskou, měření rozměrů a tvarů či hodnocení složitých tvarů.

V [3] jsou navrženy metody zpracování obrazu pro měření a třídění skleněných kamenů. Detailně popisuje možné vady, které mohou na bižuterních kamenech vzniknout. Věnuje se porovnání řádkové kamery a maticové kamery s použitím telecentrického objektivu. Pro účel měření a třídění kamenů je použita řádková kamera s objektivem TC16M36 od firmy Opto Engineering. Osvětlení kamenu je pomocí řádkového světla Efflux pod takovým úhlem, aby světlo prošlo dovnitř kamenu a neodráželo se zpět do kamery od tabulky/fasety. Při zmenšování úhlu  $\beta$  se světlo odráží od fasety do kamery.



Obrázek 1.2: Úhel nasvícení vůči kameře a objektu. [3]

V [15] jsou představeny metody zpracování obrazu pro měření a třídění bižuterních kamenů z pohledu softwarového řešení. Metody zpracování jsou spuštěny na platformě CUDA<sup>2</sup> v několika krocích: odstranění šumu Gaussovou filtrací, detekce hran Cannyho detektorem, segmentace pomocí homogenity a určení vlastností kamenu. Nalezené hrany faset jsou porovnány s maskou. Zbytek práce se věnuje implementaci v LabVIEW a CUDA.

<sup>2</sup><https://developer.nvidia.com/cuda-zone>

V [16] jsou řešeny metody zpracování obrazu v bižuterním průmyslu. Kamene jsou nasnímány mikroskopem DigiMicro 1.3 a nasvětleny ze strany zadním světlem. Bižuterní kámen je ze snímku segmentován pomocí prahování. Nedokonalosti prahování jsou vyhlazeny morfologickou operací otevření, aniž by změnilly velikost kamene. Jelikož po segmentaci zůstala oblast kamene a podložky spojena, aplikovala se segmentační metoda *watershed*. Samotné algoritmy měření jsou v práci implementovány v prostředí LabVIEW funkcemi IMAQ.

---

## Teoretické zázemí

V kapitole je popsána teorie k sestavení snímací soustavy a metodám zpracování obrazu použitých v analytické a realizační části práce.

### 2.1 Snímací soustava

Snímací soustava se skládá z kamery, objektivu a osvětlení. Všechny části se pečlivě vybírají dle požadavků a vlastností snímaného objektu.

#### 2.1.1 Kamera

Průmyslové kamery se dělí do dvou velkých kategorií: maticové a řádkové kamery. Řádková kamera je sestavena ze snímače, který má pouze jeden řádek pixelů. Řádkové kamery se používají pro snímání pohyblivých objektů, například pro inspekci potisku na odvíjející se roli papíru, třídění zrn rýže, kontrolu kvality potravin. Výhodou řádkových kamer je vysoká frekvence snímání s malým expozičním časem, vysoké rozlišení, 2x vyšší citlivost a projevení vady optiky pouze v jednom směru [17].

Maticová, neboli plošná kamera je nejběžnějším typem kamer ve strojovém vidění, zachycuje snímky na obdélníkový snímač. Velikost kamerového snímače udává spolu s velikostí pixelu rozlišení. Čím menší velikost pixelu, tím sice větší rozlišení, ale zároveň je ztracena citlivost na světlo a umocněn šum. Formát snímače se udává v palcové notaci, například 1", 1/3", 2/3". Jednopalcový snímač je obdélníkem s diagonálou o velikosti 16 mm. Snímač může být typu CCD a CMOS [18].

Dalším aspektem při výběru kamery je její barevnost – monochromatická, barevná. Po zahájení procesu zachycení snímku jsou světlo-citlivé buňky na senzoru odkryty, aby mohly zaznamenat množství dopadajících fotonů v podobě elektrického signálu. Úroveň elektrického signálu je převedena na čí-

## 2. TEORETICKÉ ZÁZEMÍ

---

slo v rozmezí 0–255 odpovídající jasové hodnotě v černobílé škále. Výsledkem je tedy černobílý obraz. Barevná kamera je stejná jako kamera černobílá, akorát s přidaným barevným filtrem. Nejpoužívanějším jednočipovým barevným filtrem je Bayerův filtr, který zaručuje prostupnost světla na pixel jenom určité vlnové délky – RGB [1].



(a) Přední pohled.



(b) Zadní pohled.

Obrázek 2.1: Kamera Basler acA2500-60um použitá v práci. [19]

### 2.1.2 Objektiv

Při výběru objektivu je potřeba zhodnotit několik aspektů: zorné pole objektivu, ohniskovou vzdálenost, pracovní vzdálenost, hloubku ostrosti, zvětšení, rozlišení, typ závitu a velikost snímače kamery. Zorné pole udává možnou oblast viditelnou objektivem. Pracovní vzdálenost značí vzdálenost objektu od objektivu, ve které je objekt nejostřejší, s tím souvisí i hloubka ostrosti, která udává rozpětí, ve kterém je objekt stále zaostřený [20].

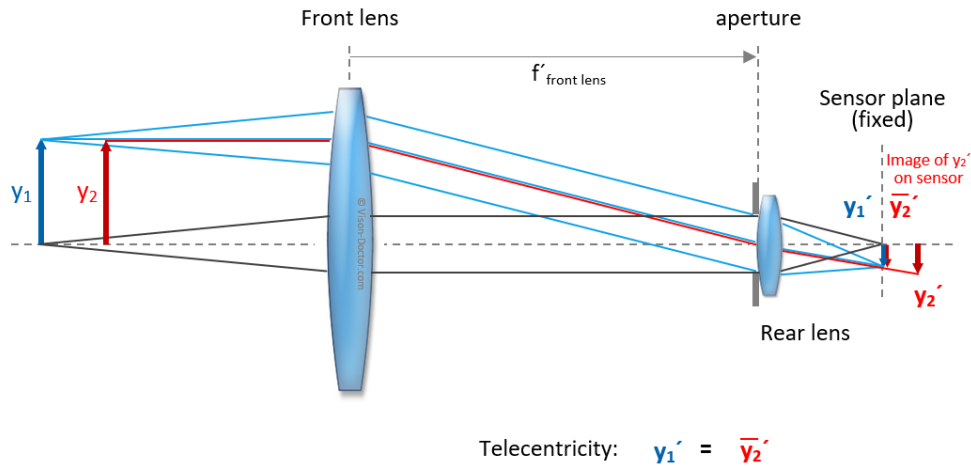
Ohnisková vzdálenost je vzdálenost středu čočky od bodu na optické ose, kam jsou paprsky čočkou soustředěny. V počítačovém vidění ohnisková vzdálenost určuje zorné pole a zvětšení. Čím delší ohnisková vzdálenost, tím menší zorné pole a naopak [20].

Aby byl objektiv s kamerou kompatibilní, je zapotřebí sjednotit typ závitu a velikost snímače kamery s parametrem *Image Circle* udávaným ve specifikacích objektivu. Hodnota *Image Circle* určuje maximální průměr kružnice vepsané senzoru kamery, udávána je v palcové notaci. Při použití kamery s větším formátem senzoru než je kompatibilní s objektivem nejsou využity všechny pixely na snímači a zbytek snímku je začerněný.

S objektivy souvisí i možné vady optiky, jakými jsou například vinětace, chromatická aberace či distorze. Právě distorzi je potřeba u měření objektů pomocí počítačového vidění zohlednit. Distorze je jev, při kterém se skutečně rovné čáry na snímku jeví jako zakřivené. Distorzi snímku lze eliminovat kalibrací kamery nebo použitím telecentrického objektivu. Telecentrický objektiv přijímá pouze paprsky rovnoběžné s optickou osou. Tato vlastnost umožňuje snímat objekty s konstantním zvětšením bez ohledu na vzdálenost a pozici



v zorném poli (obr. 2.2). Limitací telecentrického objektivu je nutnost alespoň stejně velké čočky jako je velikost snímaného objektu [4].



Obrázek 2.2: Paprsky procházející telecentrickým objektivem. [21]

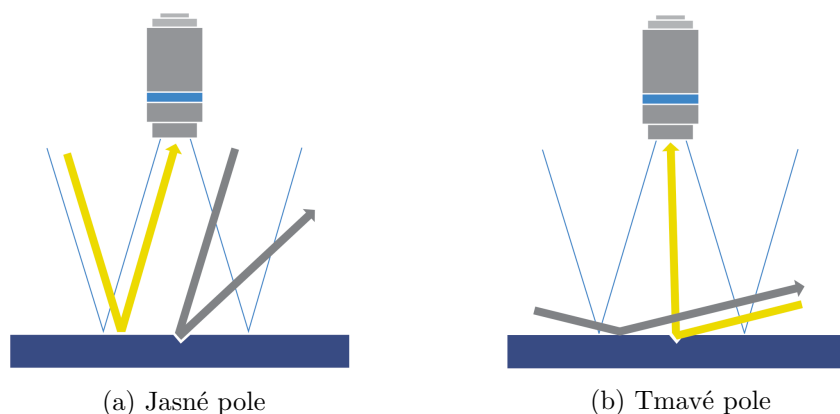
### 2.1.3 Osvětlení

Osvětlení snímací soustavy je stejně důležité jako vybrání kamery či objektivu. Úkolem osvětlení je maximalizovat kontrast mezi zkoumaným objektem a pozadím a zvýraznit jeho vlastnosti. Světlo je charakterizováno svojí vlnovou délkou. Lidské oko je schopné zachytit vlnové délky od 400 nm po 700 nm, kamery mohou být citlivé i v UV či IR části spektra. Působení světla na objekt je dáno zákony optiky, části paprsku se odrazí, části se absorbují a části projdou či emitují sekundární záření [22].

Osvětlení používané při sestavování kamerových systémů lze rozdělit na dvě kategorie: přední a zadní osvětlení. Přední osvětlení osvětluje objekt shora, paprsky jsou odraženy od objektu do objektivu. Zadní osvětlení osvětluje objekt zespoda, tudíž do objektivu se dostanou paprsky, které neprocházejí objektem a objekt zůstane neosvětlen. Dále se dá dělit na osvětlení jasného a temného pole. Osvětlení v jasném poli osvětluje objekt tak, že paprsky jsou od plochy objektu odraženy přes objektiv do snímače. Naopak temné pole podtrhává členitost plochy objektu, světlo je odraženo do objektivu pouze na nerovnostech objektu – viz. obr. 2.3 [22].

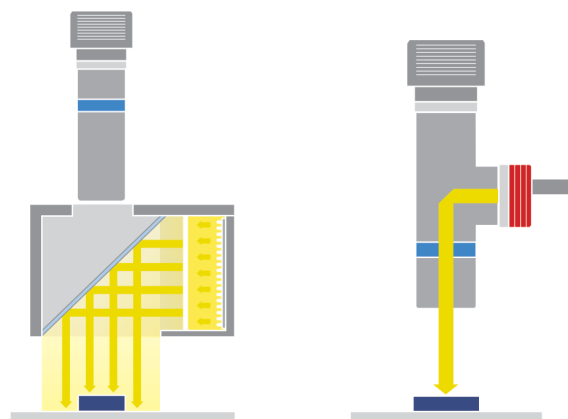
## 2. TEORETICKÉ ZÁZEMÍ

---



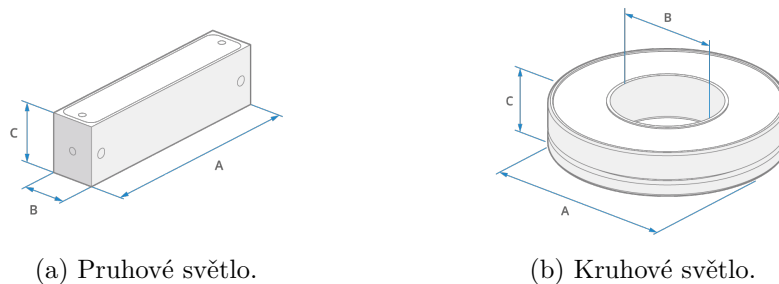
Obrázek 2.3: Schéma předního nasvícení. [22]

Speciálním typem je světlo koaxiální, které vyzařuje světelné paprsky rovnoběžně s optickou osou – viz. obr. 2.4. Koaxiální světla se používají pro osvětlení velmi lesklých povrchů, jelikož nedochází k vytváření stínů a nechtěných odlesků [23].



Obrázek 2.4: Geometrie koaxiálního osvětlení, vlevo standardní koaxiální světlo, vpravo koaxiální světlo zabudované v objektivu. [22]

Světla používaná při stojovém vidění jsou světla kruhová, zadní, kupolovitá, pruhová a bodová [24]. Pro osvětlení lesklých ploch se používají difúzní světla, například světlo kupolovité, nebo je na přímé světlo přidán rozptylovač – difuzor, který paprsky světla rozptýlí.



Obrázek 2.5: Geometrický náčrt světel používaných v práci. [24]

## 2.2 Zpracování obrazu

Metody zpracování obrazu slouží k potlačení užitečných informací nebo naopak utlumení neúžitečných informací ze snímku. Obecně je možné zpracování obrazu rozdělit do dvou oblastí: prostorová a frekvenční. V prostorové oblasti jde o transformace jasové, geometrické či lokálního charakteru.

### 2.2.1 Segmentace

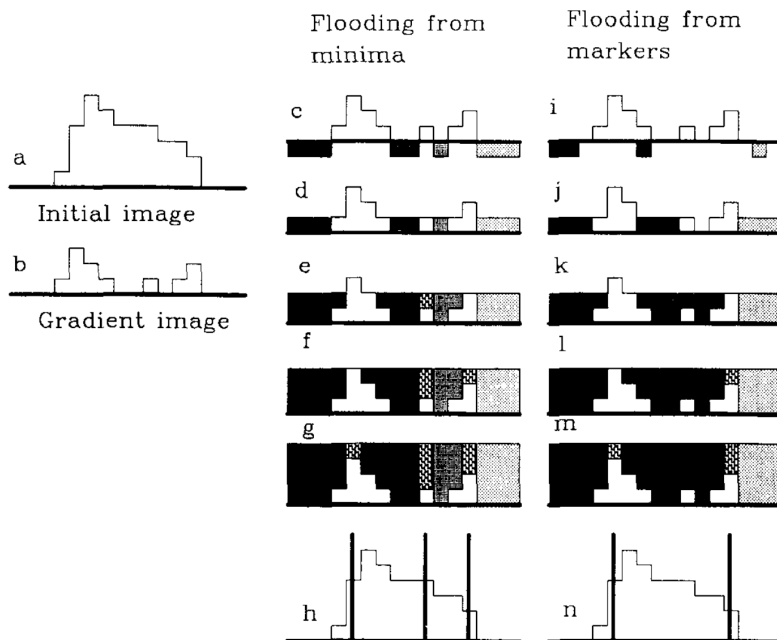
Segmentace je operace, při které dochází k rozdělení snímku na části se společnými vlastnostmi. Metod segmentace existuje více, nejjednodušší je metoda prahování, která každému pixelu, jehož jasová hodnota je větší než zvolený práh, přiřadí hodnotu 1, v opačném případě 0. Výsledkem segmentace je binární obraz.

Volba vhodného prahu velice ovlivňuje výsledek segmentace, touto problematikou se v 80. letech věnoval Nobuyuki Otsu, který přišel s chytřejší volbou prahu. **Otsuova volba prahu** je postavena na maximalizaci rozptylu mezi světlými a tmavými oblastmi v šedotónovém snímku. Algoritmus rozdělí snímek na objekt popředí a pozadí pro všechny úrovně šedi, pro každý takto zvolený práh vypočítá rozptyl intenzit jasu objektu popředí a pozadí. Optimální hodnota prahu je taková hodnota, kdy rozptyl intenzit je největší, tudíž je dosaženo největšího kontrastu mezi objektem popředí a pozadí [25].

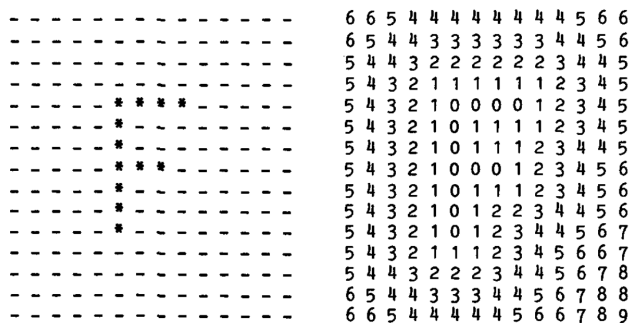
Metodou segmentace dle oblastí je algoritmus *watershed*. Algoritmus je často vysvětlován a přirovnáván k přírodnímu zaplavování terénu. Lokální minima snímku tvoří vodní zdroje, ze kterých voda začíná konstantně zaplavovat terén. Stoupání hladiny vody je rovnoměrné skrz celý terén. Před potenciálním spojením hladin dvou jezírek je mezi jednotlivými jezírky vytvořena hráz, a tak jsou od sebe dvě oblasti snímku odděleny. Algoritmus je aplikován na gradient původního obrazu. Předcházení přílišného segmentování je řešeno předpočítáním vodních zdrojů – značek, pro přesnou segmentaci musí být vytvořena značka i pro pozadí [26]. Použití watershed segmentace

## 2. TEORETICKÉ ZÁZEMÍ

blízkých, skoro spojených oblastí, předchází zpracování distanční transformací [27]. **Distanční transformace** konvertuje vstupní obrázek na matici stejné velikosti, kde jasová hodnota pixelu je nahrazena vzdáleností k nejbližšímu objektu snímku. Pixely objektu, vůči kterým je vzdálenost ostatních objektů počítána, mají vzdálenost rovnou 0.



Obrázek 2.6: Porovnání přístupu růstu zaplavených oblastí, a – původní snímek, b – gradient snímku, c-h – zaplavování z minim, i-n – zaplavování ze značek [26].

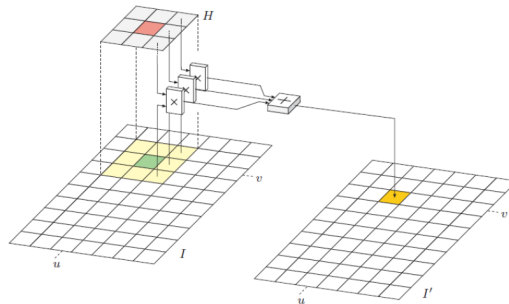


Obrázek 2.7: Příklad distanční transformace. [28]

### 2.2.2 Filtrace

Filtrace obrazu má obecně za úkol redukovat šum a potlačit nežádoucí jasové složky. Prostorová lineární filtrace upravuje jasovou hodnotu pixelů dle sousedních pixelů. Velikost sousedních pixelů, tvar množiny a jejich váhu určuje tzv. filtrační maska, neboli konvoluční maska  $H(i, j)$ . Velikost masky bývá lichá pro přesné stanovení centrálního pixelu. Filtr je aplikován lineární konvolucí snímku a masky.

$$I'(u, v) \leftarrow \sum_{(i,j) \in R_H} I(u+i, v+j) \cdot H(i, j) \quad (2.1)$$



Obrázek 2.8: Konvoluce. [29]

**Gaussova filtrace** daná filtrační maskou  $G(x, y)$  je často používaným typem lineární filtrace. Příkladem nelineární filtrace je **filtrace mediánová**, která zachovává hrany. Podstatou mediánové filtrace je nahradit jasovou hodnotu středového pixelu hodnotou mediánu z braného okolí [30].

$$G(x, y) = e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (2.2)$$

### 2.2.3 Detektory hran

Hrana ve snímku je považována za oblast, kde se rapidně změní jasová hodnota. Hrany lze detekovat pomocí 2D konvoluce a konvoluční masky, která počítá změnu jasu v okolí. Mezi takové masky se řadí Sobelův operátor  $H_{S_y}$  nebo operátor Prewittové  $H_{P_x}$ , které jsou aproximacemi první derivace jasové funkce snímku. Operátorem využívající druhou derivaci je například Laplaceův operátor  $H_L$ .

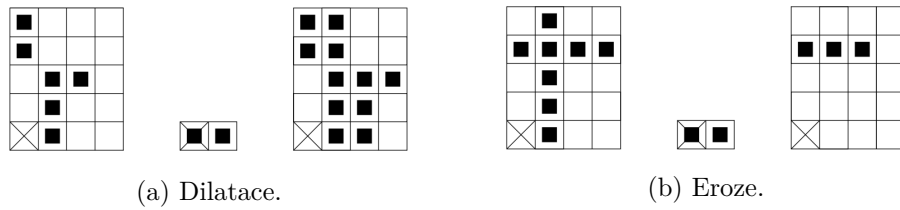
$$H_{S_y} = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} H_{P_x} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} H_L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Propracovanějším algoritmem detekce hran je **Cannyho detektor**, který splňuje požadavky nízké chybovosti, lokalizace hran a jednoduché odezvy. Cannyho algoritmus probíhá ve čtyřech krocích. Prvním krokem je potlačení šumu Gaussovým filtrem. Druhým krokem je nalezení hran pomocí Sobelova operátoru nebo derivací Gaussova filtru. Dalším krokem je potlačení nemaximálních hodnot, což vede ke ztenčení hran. Potlačení nemaximálních hodnot je prováděno na základě velikosti gradientu a jeho směru. Pixely tvořící hranu musí mít větší velikost ve směru gradientu než jejich okolí. Posledním krokem je prahování s hysterezí dolním prahem  $t_L$  a horním prahem  $t_H$ . Pixel hrany je takový pixel, jehož hodnota je větší než  $t_H$  nebo je v rozmezí prahů, a současně leží v okolí již detekovaného pixelu hrany [30].

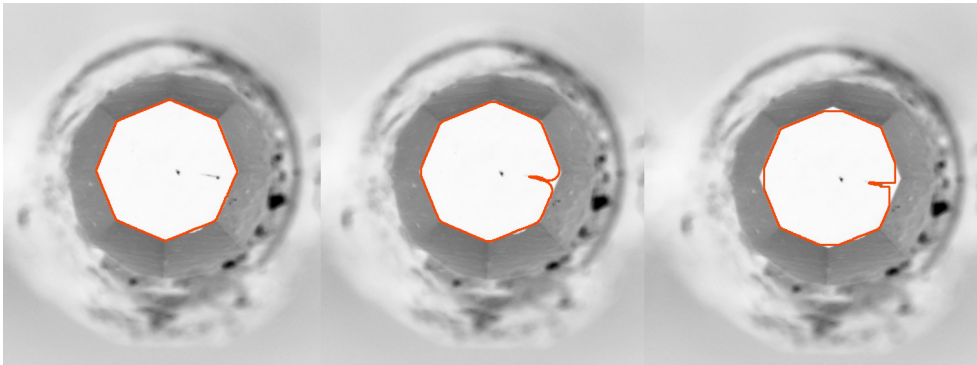
#### 2.2.4 Morfologické operace

Morfologická operace je relace obrazu a strukturního elementu. Střed strukturního elementu se nazývá kotva. Při transformaci je strukturní element posouván po obrazu a výsledek transformace je 0 nebo 1. Základní morfologické operace jsou čtyři: dilatace, eroze, otevření a zavření. **Dilatace**  $\oplus$  je operace, při které je objekt expandován. Strukturním elementem je procházen obraz, pokud se pod kotvou objeví pixel s hodnotou 1, do výsledného obrazu na souřadnicích kotvy je zkopírován celý strukturní element. Naopak při operaci **eroze**  $\ominus$  je do výsledného obrazu zapsána hodnota 1, pokud se shoduje vyznačená oblast pod strukturním elementem s celým strukturním elementem. Operace objekt zmenšuje [30].

Operace **otevření**  $\circ$  je kombinací základních operací, nejdříve probíhá eroze, poté dilatace. Otevření slouží k odstranění šumu snímku, aniž by se změnila velikost objektů, které nejsou šum. Operace **zavření**  $\bullet$  je složená z dilatace a eroze. Aplikováním zavření na obraz jsou spojeny objekty v blízké vzdálenosti, vyplněny díry či zahlazen obrys objektu.



Obrázek 2.9: Morfologické operace. [30]

Obrázek 2.10: Vliv velikosti a tvaru strukturního elementu, vlevo čtvercový  $5 \times 5$ , uprostřed kruhový  $30 \times 30$ , vpravo čtvercový  $30 \times 30$ .

### 2.2.5 Kontury

Kontura je křivka spojující body se stejnou jasovou intenzitou. Na základě kontur lze spočítat několik charakteristik objektu, např.: plocha, momenty, poměr stran, kompaktnost. V knihovně OpenCV<sup>3</sup> jsou kontury hledány podle algoritmu [31]. Aproximace kontur je na základě Douglas-Peucker algoritmu [32].

<sup>3</sup><https://opencv.org/>



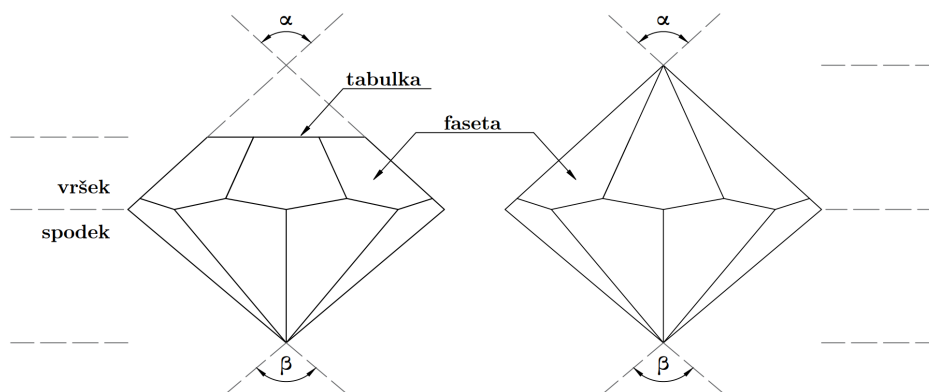


## Analýza

Kapitola zahrnuje popis vlastností bižuterních kamenů, jak vypadají, co za metriky se měří a následné sestavení snímací soustavy.

### 3.1 Bižuterní kameny

„Strojně broušené šperkové a bižuterní kameny představují geometrické prostorové útvary ohraničené několika vybroušenými plochami.“ [14]. Bižuterní kámen je geometricky rozdělen na vršek a spodek. Vršek kamenu tvoří tabulka, fasety a hrany. Na kameni je vždy maximálně jedna tabulka, avšak několik faset dle typu výbrusu. Spodek kamenu se skládá ze špičky, faset a hran [3]. Kamenům se šatonovým výbrusem se říká šatony. Optické vlastnosti kamenu závisí na úhlu  $\alpha$ ,  $\beta$ . Na nákrese 3.1 je vidět obecný tvar šatonu.



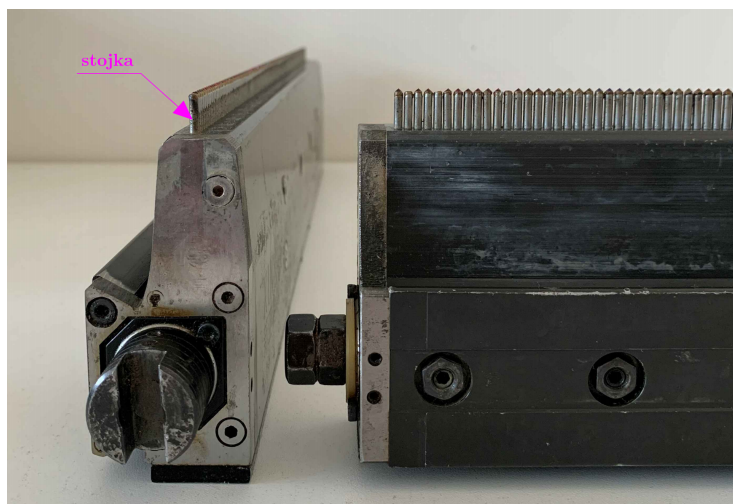
Obrázek 3.1: Nákras šatonu s tabulkou (vlevo) a bez tabulky (vpravo),  $\alpha$ ,  $\beta$  – úhly charakterizující šaton<sup>4</sup>.

<sup>4</sup>Vlastní nákras idey převzané z interního dokumentu.

### 3. ANALÝZA

---

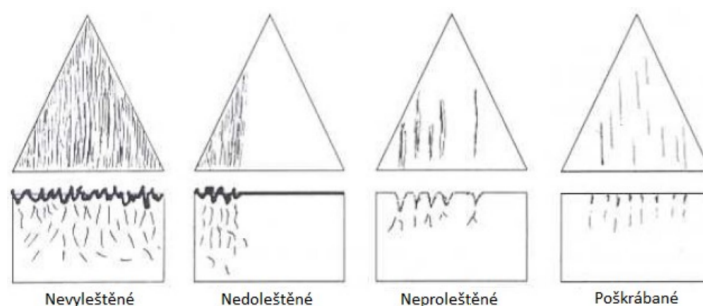
Šatony jsou umístěny v nosiči po 170 kusech, nosiče jsou naplněny šatony s tabulkou nebo bez tabulky v různých barevných variantách, viz. obr. 3.2. Šatony jsou k nosiči přilepeny lepidlem, neboť při procesu výbrusu jsou vrškem směrem dolů. Právě lepidlo představuje problém při měření rozměrů. Lepidlo často zůstává na fasetách orientovaných k dalšímu šatonu v nosiči.



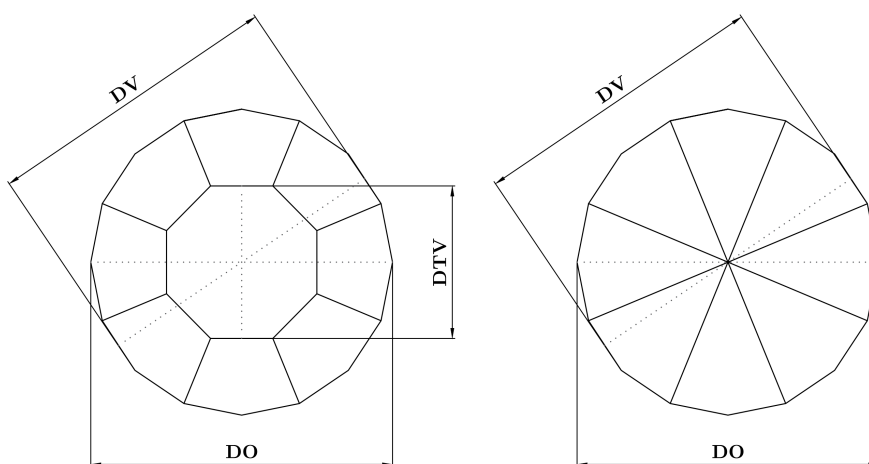
Obrázek 3.2: Nosič s šatony.

Šatony jsou vyráběny a kontrolovány dle výšky vršku, výšky spodku, celkové výšky a průměrů kružnic. Práce je zaměřena na kontrolu průměrů kružnic vepsaných šatonu, opsaných šatonu a kružnice vepsané tabulce šatonu (viz. obr. 3.4). Kameny jsou kategorizovány na základě rozměrů. Průměr kružnice opsané a vepsané šatonu se v rámci kategorie pohybuje v rozmezí 0,1 mm, průměr kružnice vepsané tabulce v rozmezí 0,2 mm. Kameny v nosiči mají velikost od 1,5 mm do 1,8 mm.

Vady bižuterních diamantů se dělí do tří skupin: opticko-estetické, geometrické a odolnostní. Jednou z geometrických vad jsou vady mikroreliefu. V ideálním případě by fasety měly být dokonale vyleštěné a hladké, defekty by neměly přesahovat 0,5 % celkové plochy fasety [3]. Na obrázku 3.3 jsou vidět ukázky defektů mikroreliefu.



Obrázek 3.3: Profil vad mikroreliefu. [3]

Obrázek 3.4: Měřené rozměry šatonu s tabulkou (vlevo), bez tabulky (vpravo) DV – průměr kružnice vepsané, DO – průměr kružnice opsané, DTV – průměr kružnice vepsané tabulce<sup>5</sup>.

## 3.2 Snímací soustava

Precizní sestavení snímací soustavy je důležitým krokem k přesnému a efektivnímu měření. Sestavení finální snímací soustavy proto předcházelo několik experimentů. Kvůli diverzitě zadání bylo zapotřebí vytvořit jak snímací soustavu pro měření průměru vepsané kružnice tabulky šatonu, tak pro měření průměrů kružnic šatonu.

Minimální požadovaná přesnost měření odpovídá alespoň 1/8 intervalu průměru kružnice v rámci jedné kategorie. Průměry kružnic vepsaných a opsaných šatonu se zvětšují skokově po 0,1 mm, tudíž přesnost měření odpovídá 0,0125 mm. Rozlišení kamery pro danou přesnost lze vypočítat z rovnice 3.1,

<sup>5</sup>Vlastní náčrt idey převzané z interního dokumentu.

### 3. ANALÝZA

---

kde velikost odpovídá průměru stojanu jednoho diamantu v nosiči, koeficient 1,1 odpovídá 5% přesahu objektu z obou stran a hodnota 2 reflektuje počet pixelů na rozeznání hrany [33]:

$$\text{rozlišení} = \frac{1,1 \cdot \text{velikost}}{\text{přesnost}/2} = \frac{1,1 \cdot 2}{0,0125/2} = 352 \text{ px} \quad (3.1)$$

Po dosažení hodnot do rovnice vychází, že dostačující rozlišení pro přesnost 0,0125 mm je 352 px na jeden diamant. Pro snímání byla vybrána černobílá maticová kamera Basler acA2500-60um s rozlišením 2590 × 2048 px (viz. tabulka 3.1), která dokáže nasnímat až 5 diamantů v jednom obraze. Kamera je díky větší velikosti pixelu a 1" senzoru velice citlivá na světlo a kompatibilní s telecentrickým objektivem Vital Vision VS-THV1-80CO/S (viz. tabulka 3.2), který byl z objektivů dostupných v ImproLabu vyhodnocen jako nejlepší pro danou úlohu.

Tabulka 3.1: Parametry kamery Basler acA2500-60um.

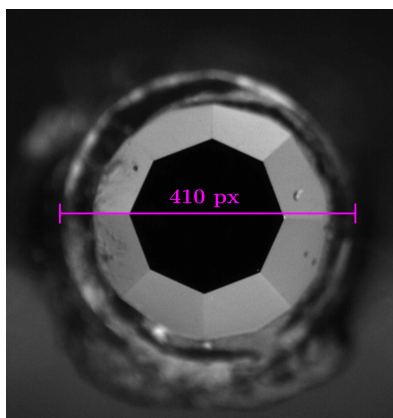
Parametr	Hodnota
Typ senzoru	CMOS
Formát senzoru	1"
Velikost senzoru	12,4 × 9,8 mm
Rozlišení (V x Š)	2590 × 2048 px
Rozlišení	5 MP
Velikost pixelu	4,8 × 4,8 μm
Snímkovací frekvence	60 fps
Mono/Barevná	monochromatická

Tabulka 3.2: Parametry objektivu Vital Vision VS-THV1-80CO/S.

Parametr	Hodnota
Optické zvětšení	1,0
Velikost senzoru (max.)	1,1"
FOV (V x Š)	10,3 × 14,1 mm
Pracovní vzdálenost	80 mm
Hloubka ostrosti	0,6 mm
Vstup na koax. světlo	ano

Skutečnou přesnost měření lze ověřit z rovnice 3.2 [33], kde skutečná velikost je nahrazena šířkou stojky nosiče, která odpovídá 2 mm, a velikost v pixelech hodnotou 410 – viz obr. 3.5:

$$\text{přesnost} = 2 \cdot \frac{\text{skutečná velikost}}{\text{velikost v pixelech}} = 2 \cdot \frac{2}{410} \doteq 0,0098 \text{ mm} \quad (3.2)$$



Obrázek 3.5: Šířka stojky nosiče pod šatonem.

Výsledná skutečná přesnost  $0,0098 \text{ mm} < 0,0125 \text{ mm}$  požadovaná přesnost, tudíž vyhovuje požadavkům na systém měření rozměrů kružnic v rozmezí  $0,1 \text{ mm}$ .

### 3.3 Metodika snímání

Aby bylo dosaženo maximálního kontrastu měřené oblasti a pozadí, byla vytvořena rozdílná metodika pro měření průměru kružnice vepsané tabulce šatonu a průměrů kružnic opsaných/vepsaných šatonu. Oba přístupy vycházejí z vlastností šatonu, charakteristické úhlu  $\alpha$  šatonu a odrazu světla od povrchu skla. Šatony jsou osvětleny modrým světlem vlnové délky  $470 \text{ nm}$  nebo bílým koaxiálním světlem. Pro zajištění maximálního kontrastu a méně chybové detekce musí být kameny před snímáním očištěny.

Pro měření vepsaných kružnic tabulek šatonu byly vytvořeny dvě metodiky snímání, pro měření rozměrů kružnic šatonu jedna společná. Snímky byly zachyceny v prostředí Pylon Viewer<sup>6</sup>. Šatony s tabulkou jsou snímány soustavou č. 1, 2 a 3, šatony beztabulkové pouze snímací soustavou č. 3.

#### 3.3.1 Nasvícení tabulky koaxiálním světlem

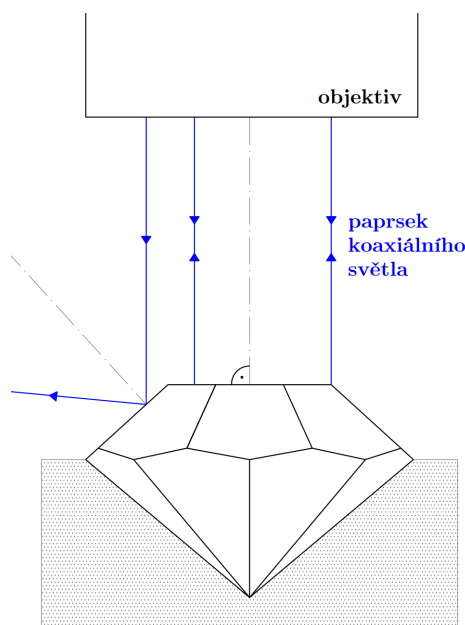
První metodika využívá telecentricitu objektivu a kolmost tabulky k ose objektivu. Do telecentrického objektivu bylo připojeno bílé koaxiální světlo, paprsky světla jsou vyzařovány rovnoběžně s osou objektivu a odráženy od tabulky zpět kolmo do objektivu (viz. obr. 3.6). Paprsky dopadající na fasety jsou odraženy mimo snímač, tabulka je tedy jedinou bílou plochou ve snímku.

<sup>6</sup><https://www.baslerweb.com/en/products/software/basler-ylon-camera-software-suite/pylon-viewer/>

### 3. ANALÝZA

---

Zpětná kolmost paprsku velice závisí na kvalitě vyleštění kamenu a preciznosti nalepení kamene do nosiče.

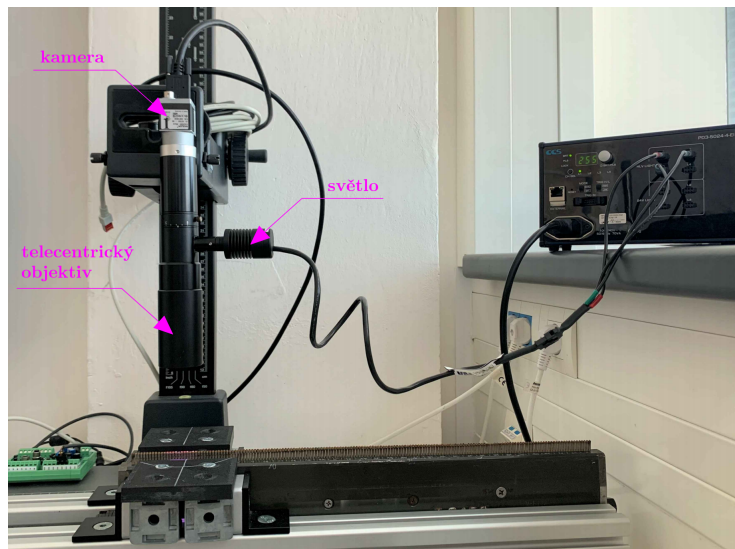


Obrázek 3.6: Nasvícení tabulky šatonu koaxiálním světlem.

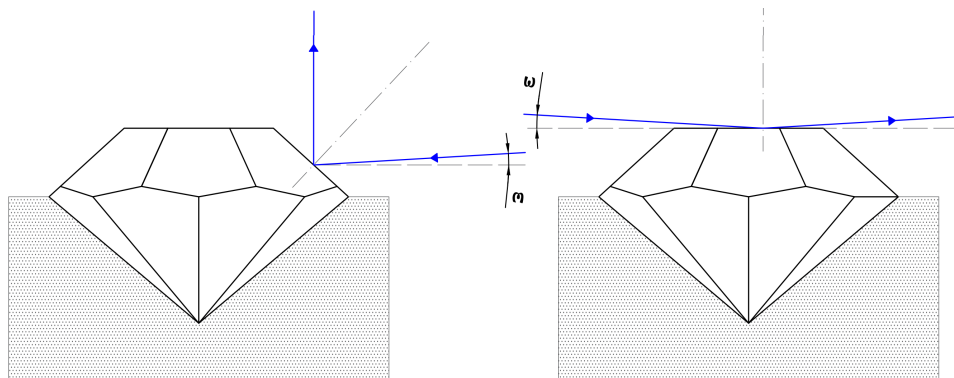
Snímací soustava č. 1 se skládá z kamery, objektivu a koaxiálního světla, které je přivedeno přímo do objektivu – viz obr. 3.7. Kamera s objektivem byla umístěna v pracovní vzdálenosti 80 mm od roviny tabulky šatonu. Barva světla byla nastavena na RGB hodnotu (255, 255, 255). Kontrast mezi fasetami a tabulkou je umocněn zvýšením expozičního času na 3600  $\mu$ s a nastavením parametru gain na hodnotu 2,0.

#### 3.3.2 Nasvícení tabulky kruhovým světlem s difuzorem

Druhý přístup naopak využívá vlastností a úhlů šatonu. Šaton je nasvícen pod úhlem  $\epsilon$  tak, aby paprsky dopadající na fasety byly odraženy rovnoběžně s osou objektivu do objektivu – viz. obr. 3.8. Tabulka zůstává neosvícená a její plocha je černá v kontrastu s fasetami. Úhlu nasvícení  $\epsilon$  bylo dosaženo vytvořením specifického difuzoru pomocí 3D tisku a jeho přidáním na modré kruhové světlo firmy SmartView. Nákres a reálnou podobu difuzoru lze vidět na obr. 3.9. Kruhovitost světla zajišťuje homogenní osvětlení ze všech stran šatonu.



Obrázek 3.7: Snímací soustava č. 1.

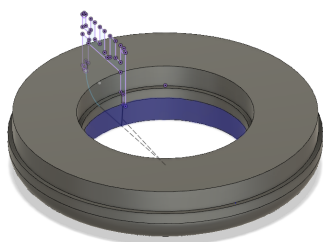


Obrázek 3.8: Nasvícení šatonu za účelem měření tabulky,  $\epsilon$  – úhel nasvícení vůči horizontále, vlevo – modrý paprsek dopadající na fasetu, vpravo – modrý paprsek dopadající na tabulku.

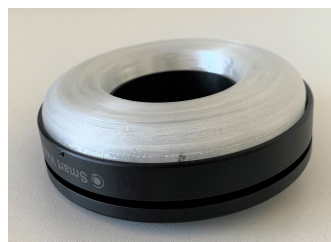
Snímací soustava č. 2 se skládá z kamery, objektivu a modrého kruhového světla s difuzorem. Objektiv s kamerou byl umístěn do pracovní vzdálenosti 80 mm od roviny tabulky šatonu. Světlo je uchyceno nad nosičem šatonů tak, aby byla co nejmenší vzdálenost mezi tabulkou šatonu a spodní rovinou difuzoru. Světlo je vycentrováno do osy objektivu. Nastavení snímací soustavy č. 2 je vidět na obr. 3.10. Kontrast mezi fasetami a tabulkou je umocněn zvýšením expozičního času na 16000  $\mu$ s a nastavením parametru gain na 5,5922.

### 3. ANALÝZA

---

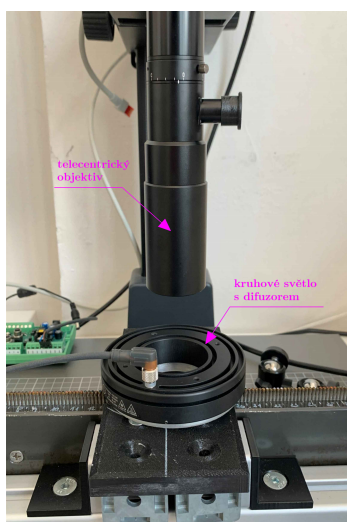


(a) 3D model, modrý pás značí úsek vyzařujících paprsků dopadajících na šaton pod úhlem  $\epsilon$ .

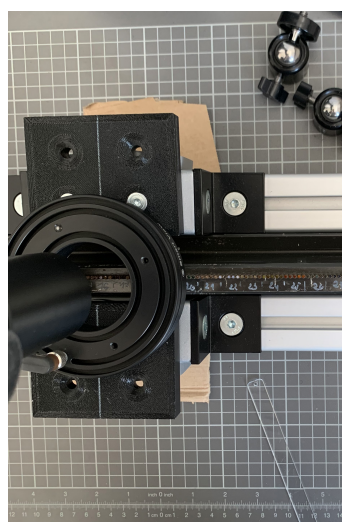


(b) Použití difuzoru na kruhovém světle SmartView.

Obrázek 3.9: Difuzor pro kruhové světlo.



(a) Přední pohled.



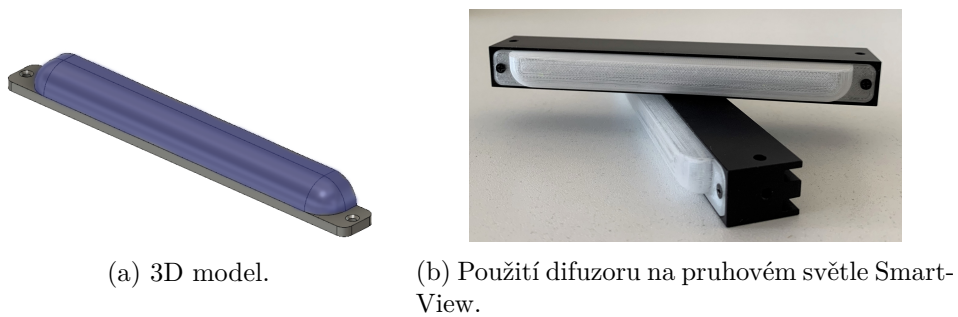
(b) Horní pohled.

Obrázek 3.10: Snímací soustava č. 2.

#### 3.3.3 Nasvícení šatonu

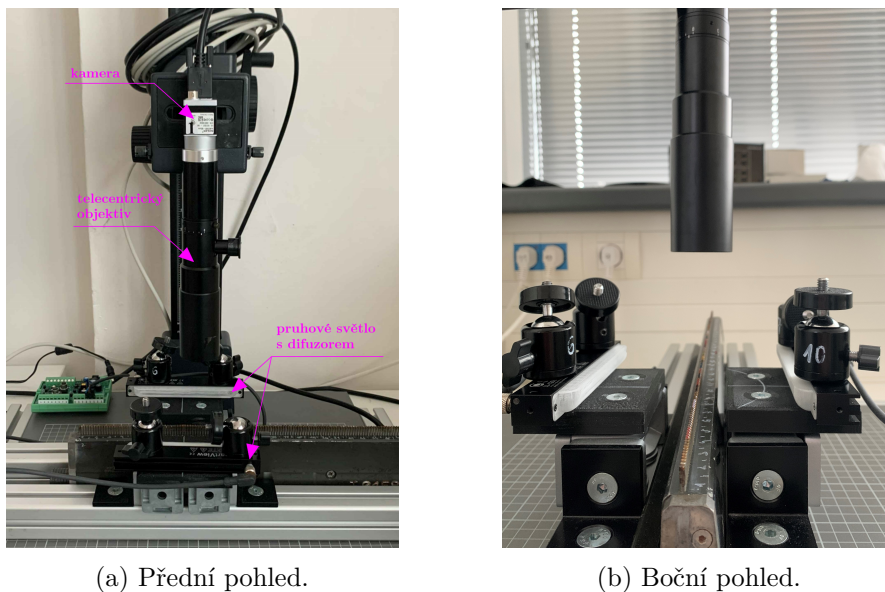
Šaton za účelem měření průměru kružnice opsané a vepsané byl nasvícen pruhovým modrým světlem SmartView s difuzorem. Konstrukce difuzoru na pruhové světlo vychází z difuzoru kruhového, který byl použit pro nasvícení tabulek – viz. obr. 3.11. Efektivita pruhového difuzoru byla zjištěna experimentálně. Nasvícení zvýrazňuje plochy faset a hranu šatonu s nosičem.





Obrázek 3.11: Difuzor pro pruhové světlo.

Snímací soustava č. 3 se skládá z kamery, objektivu a dvou modrých pruhových světel SmartView s difuzorem. Objektiv s kamerou byl umístěn do pracovní vzdálenosti 80 mm od roviny předělu vršku a spodku šatonu. Pruhová světla jsou uchycena paralelně k nosiči naproti sobě ve vzdálenosti 4 cm od šatonů. Výška umístění světel odpovídá výšce roviny předělu šatonu a nosiče. Výslednou soustavu lze vidět na obr. 3.12. Kontrast mezi nosičem a šatonem je opět umocněn expozičním časem a parametrem gain.



Obrázek 3.12: Snímací soustava č. 3.



---

## Realizace

Algoritmy zpracování obrazu a měření rozměrů jsou implementovány v jazyce Python v prostředí Jupyter notebooku. Využity jsou knihovny OpenCV<sup>7</sup>, Improutils<sup>8</sup> či Numpy<sup>9</sup>. Třemi snímacími soustavami byly zachyceny čtyři typy snímků, na které byly následně aplikovány algoritmy dle typu měřené kružnice a snímku.

Algoritmy se drží obecného postupu prezentovaného v [30]: potlačení šumu, zlepšení charakteristik snímku, segmentace a extrakce vlastností.

Součástí všech algoritmů je detekce chybějících šatonů, která je prováděna pomocí lokalizace kontur šatonu v rámci snímku. Kontury jsou seřazeny podle souřadnice  $x$  jejich středu. Chybějící šaton není detekován a tudíž nemá zastoupení mezi konturami. Pozice chybějícího šatonu v rámci snímku je odvozena dle rozestupů jednotlivých kontur šatonu.

### 4.1 Data

V rámci práce bylo nasnímáno třemi snímacími soustavami celkem 181 snímků, které zachycují 170 šatonů s tabulkou a 170 šatonů bez tabulky. Jeden snímek obsahuje 5 šatonů. Barevná podoba šatonů je vidět na obr. 4.1. Černobílé snímky jsou pro lepší zpracování oříznuty na velikost  $2590 \times 1000$  px, vycentrovány na šatony.

Typy snímků lze vidět na obr. 4.2. Prvním typem jsou snímky ze snímací soustavy č. 1, které zachycují nasvícenou bílou tabulku. Sada obsahuje 39 snímků. Druhý typ snímků je nasnímán soustavou č. 2. Na snímcích jsou vyobra-

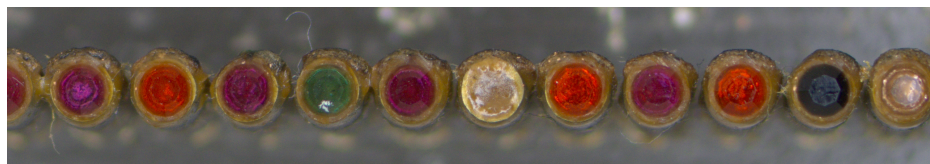
---

<sup>7</sup><https://opencv.org/>

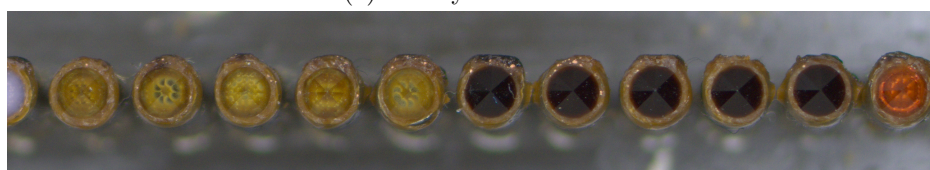
<sup>8</sup>[https://github.com/ImprolabFIT/improutils\\_package](https://github.com/ImprolabFIT/improutils_package)

<sup>9</sup><https://numpy.org/>

zeny šatony a jejich neosvícené černé tabulky. Sada čítá 49 snímků. Snímací soustava č. 3 je použita pro nasnímání posledních dvou typů šatonů. Jedná se o zachycení šatonu s tabulkou a bez tabulky. Všechny 170 šatonů s tabulkou bylo zachyceno na 49 snímcích, bez tabulky na 44 snímcích.



(a) Šatony s tabulkou.



(b) Šatony bez tabulky.

Obrázek 4.1: Barevné snímky šatonů.

## 4.2 Algoritmus měření DTV

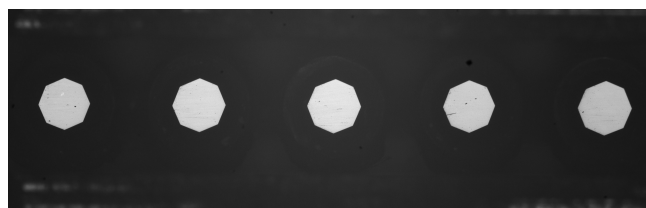
Pro měření průměru vepsané kružnice tabulky šatonu byly implementovány dva algoritmy dle typu snímku. Algoritmy se liší v načtení snímku, přístupu v hledání kontur a možnostech kontroly vyleštění.

### 4.2.1 Tabulka jako bílá plocha

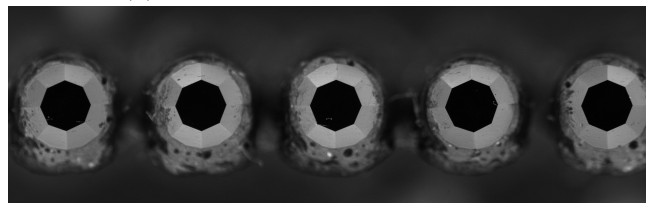
Jednotlivé kroky algoritmu jsou vyobrazeny na obr. 4.3, 4.4. Algoritmus je použit na snímky pořízené soustavou č. 1 pomocí koaxiálního světla.

Prvním krokem je načtení snímku, které zahrnuje načtení snímku ze souboru, převod z RGB prostoru do černobílé a oříznutí. Následuje filtrace pomocí mediánového filtru velikosti  $3 \times 3$ , který potlačuje šum, ale zachovává hrany.

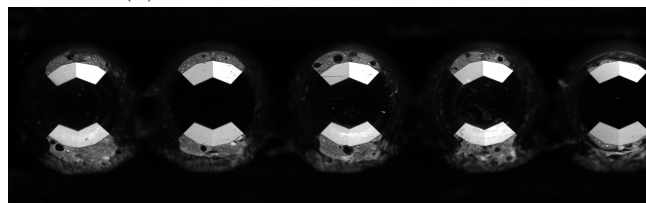
Nalezení kontur předchází detekce hran. Detekce hran je realizována Cannyho detektorem hran s využitím Otsuova prahování. Otsuův práh  $T$  je využit pro eliminaci nevýznamných hran v Cannyho algoritmu. Minimální práh je nastaven na  $0,5 \cdot T$  a maximální na  $T$ . Detekované hrany jsou spojeny morfologickou operací zavření. Jelikož se tvar šatonu přibližuje kružnici, operace zavření pracuje s eliptickým strukturálním elementem velikosti  $5 \times 5$  namísto čtvercového typu.



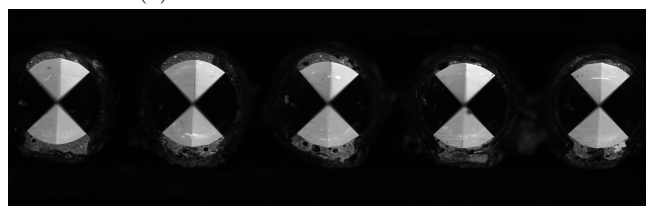
(a) Tabulka – snímací soustava č. 1.



(b) Tabulka – snímací soustava č. 2.



(c) Šáton – snímací soustava č. 3.



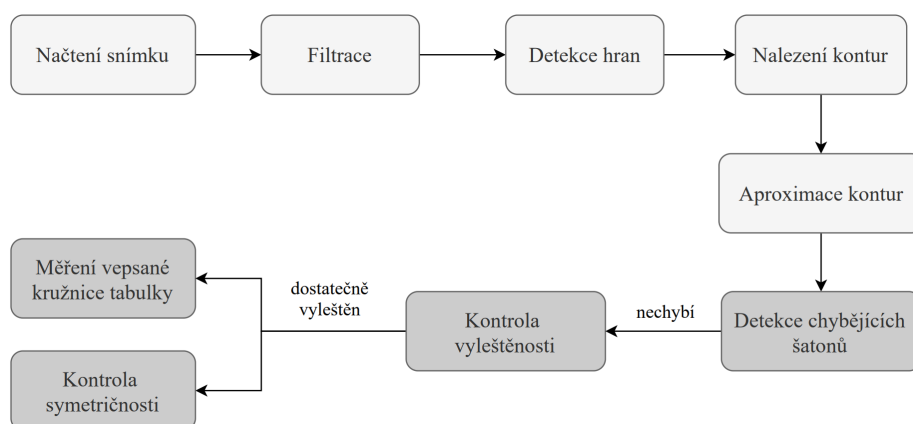
(d) Šáton – snímací soustava č. 3.

Obrázek 4.2: Typy snímků ze snímacích soustav.

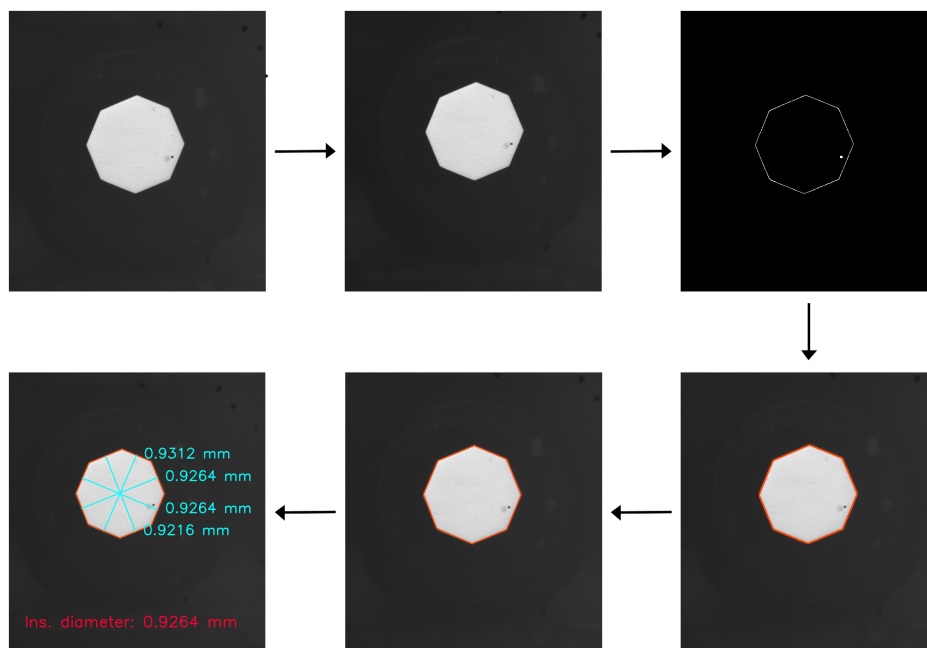
Dále jsou nalezeny vnější kontury tabulky, které jsou filtrovány dle minimální a maximální plochy odvozené z velikosti tabulky šátonu.

Nalezená kontura je aproximována přesně na osmiúhelník, aby bylo možné vypočítat průměry kružnic vepsaných z dvojic vrcholů 1-5, 2-6, 3-7, 4-8 (viz. obr. 4.5). Před samotným měřením DTV je prováděna kontrola vyleštění šátonu na základě poměru světlých pixelů uvnitř nalezené kontury ku pixelům tmavým. Šáton je vyhodnocen jako nedostatečně vyleštěn, pokud poměr světlých pixelů ku tmavým je menší než 95 %. Rozdíl mezi vyleštěným a nedoleštěným šátonem je vidět na obr. 4.6. Průměry vepsané kružnice tabulky tak nejsou spočteny kvůli možné odchylce od skutečné hodnoty. Průměry kružnic vepsaných jsou vypočteny euklidovskou vzdáleností mezi body jednotlivých dvojic.

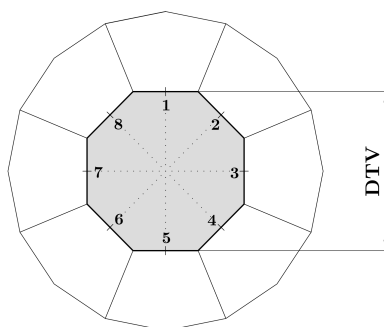
#### 4. REALIZACE



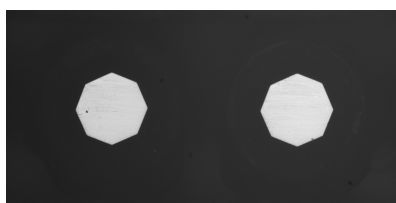
Obrázek 4.3: Diagram algoritmu měření DTV na snímcích ze soustavy č. 1.



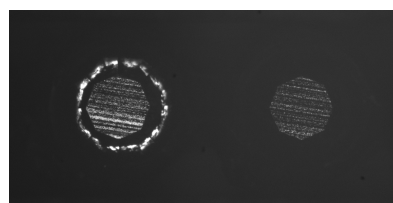
Obrázek 4.4: Obrázkový diagram algoritmu měření DTV na snímcích ze soustavy č. 1, Originální snímek → Filtrace → Hranová detekce → Kontury → Aproximace kontur → Kontrola, měření.



Obrázek 4.5: Dvojice vrcholů pro výpočet vepsaných kružnic tabulky.



(a) Vyleštěné šatony.



(b) Nedostatečně vyleštěné šatony.

Obrázek 4.6: Rozdíl mezi vyleštěným a nevyleštěným šatonem.

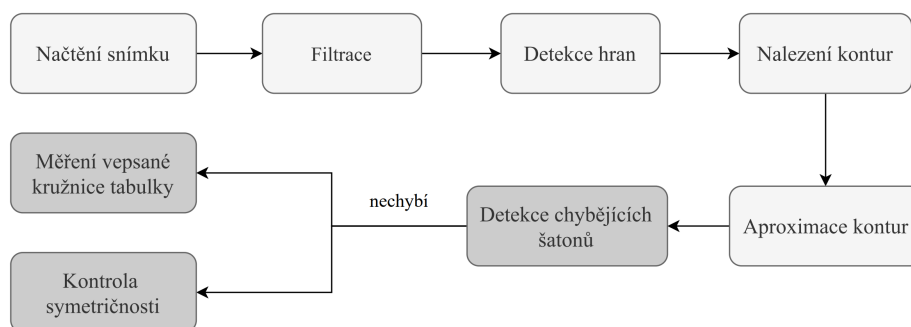
Po vypočtení průměrů jednotlivých dvojic vrcholů je rozhodováno o symetričnosti diamantu na základě vzájemných odchylek změřených průměrů. Odchylka je nastavena na hodnotu 9 pixelů, což odpovídá 0,0432 mm. Výsledný průměr vepsané kružnice šatonu je zprůměrován ze všech čtyř změřených průměrů, přenásoben velikostí pixelu pro převod z pixelů na milimetry a zkontrolován, jestli odpovídá danému rozsahu pro kategorii šatonu. Výsledek je vizualizován a hodnoty jsou uloženy do souboru.

#### 4.2.2 Tabulka jako černá plocha

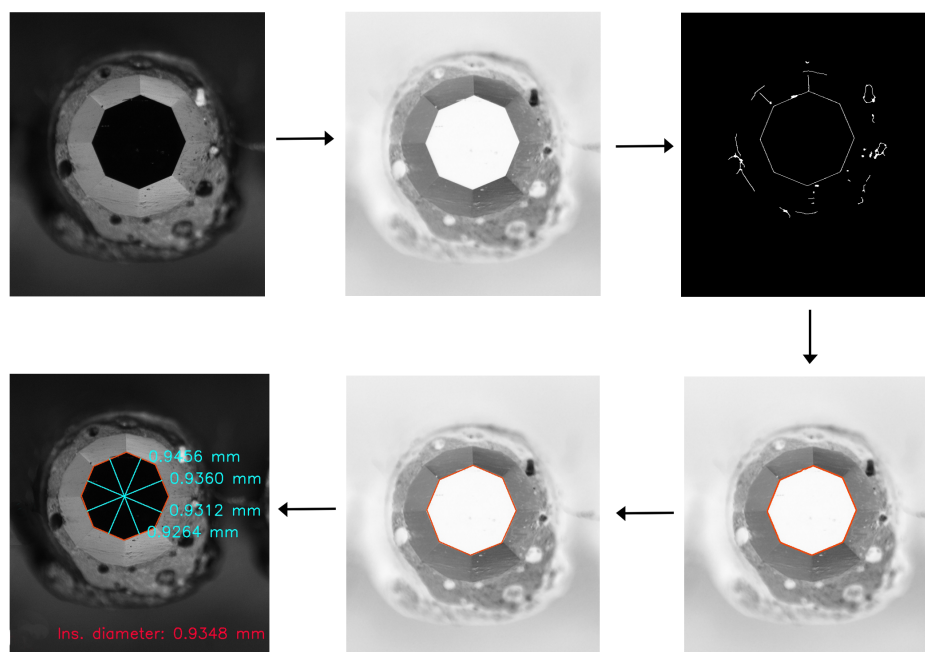
Na snímky pořízené snímací soustavou č. 2 byl aplikován algoritmus (viz. obr. 4.7, 4.8) obsahující stejné kroky a postupy jako algoritmus v podkapitole 4.2.1 s tím rozdílem, že není spouštěn na originální snímek, ale na jeho negativ a není prováděna kontrola vyleštěnosti kamenu. Nasvícení kamenu se snímací soustavou č. 2 nevyužívá kolmosti plochy tabulky na paprsek světla, tudíž míra vyleštěnosti kamenu není ze snímku detekovatelná.

Snímek je načten ze souboru, převeden z RGB do černobílé, oříznut a narozdíl od předchozího algoritmu převeden na negativ. Negativ při detekci hran vykazuje značně lepší výsledky. Načtený snímek je filtrován mediánovým filtrem o velikosti  $3 \times 3$ .

#### 4. REALIZACE



Obrázek 4.7: Diagram algoritmu měření DTV na snímcích ze soustavy č. 2.



Obrázek 4.8: Obrázkový diagram algoritmu měření DTV na snímcích ze soustavy č. 2, Originální snímek → Negativ, filtrace → Hranová detekce → Kontury → Aproximace kontur → Kontrola, měření.

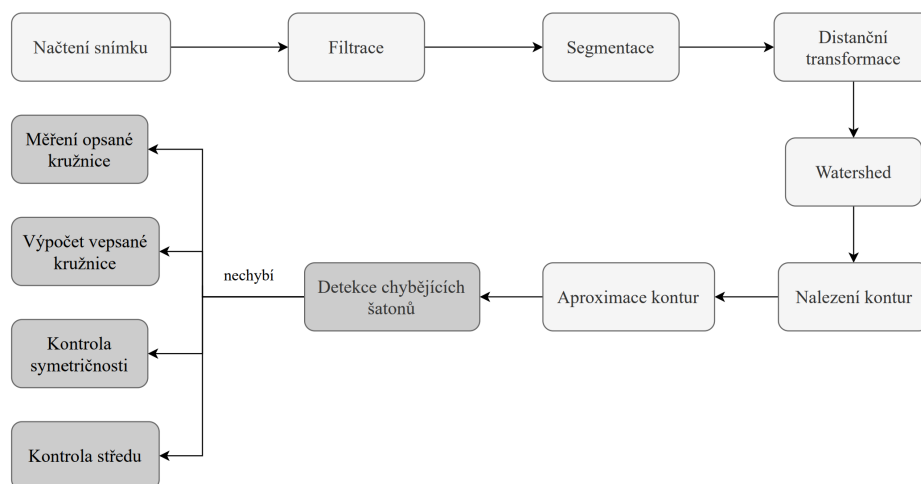
Segmentaci pro nalezení kontur zajišťuje Canny-Otsu detektor a morfologická operace zavření s eliptickým strukturálním elementem o velikosti  $5 \times 5$ . Jsou nalezeny všechny kontury ve snímku, které jsou filtrovány na základě plochy a hierarchie. Konturou tabulky je prohlášena ta kontura, která je vnitřní nebo vnější s podmínkou, že její potomek nesplňuje podmínku velikosti plochy.



Kontury jsou aproximovány na osmiúhelník, ze kterého se vypočítají průměry vepsaných kružnic tabulky. Vypočítaný průměr je porovnán s krajními hodnotami rozsahu průměru vepsaných kružnic tabulky šatonu v dané kategorii. Výsledek je vizualizován a hodnoty jsou uloženy do soboru.

### 4.3 Algoritmus měření DO

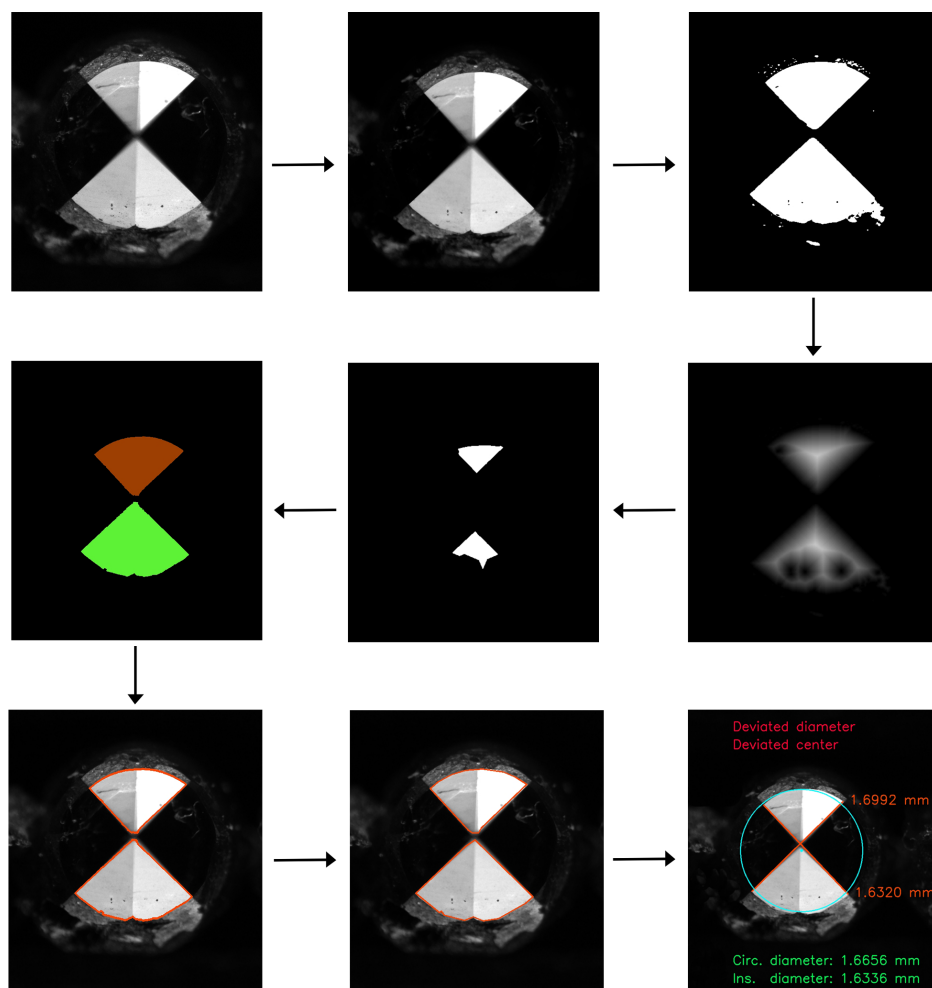
Měření průměru opsané kružnice šatonu je implementováno pomocí jednoho společného algoritmu pro šatonu s tabulkou i bez tabulky – viz obr. 4.9, 4.10.



Obrázek 4.9: Diagram algoritmu měření DO na snímcích ze soustavy č. 3.

Převod z RGB prostoru do černobílého a oříznutí na velikost  $2590 \times 1000$  px je součástí načtení snímku. Po načtení snímku následuje filtrace mediánovým filtrem  $3 \times 3$ . Segmentace faset šatonu je provedena Otsuovým prahováním. Na binární obraz je aplikována distanční transformace a následně *watershed* algoritmus.

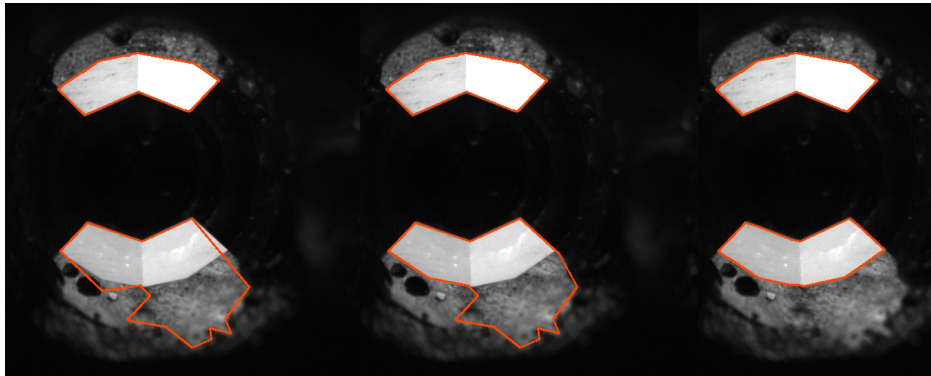
*Watershed* algoritmus využívá masku distanční transformace, ze které jsou extrahovány značky pro jednotlivé oblasti rozvodnění, což vede k rychlejšímu výsledku. Hodnota spodní hranice při prahování masky výrazně ovlivňuje výsledky. Pokud je práh nastaven na hodnotu 0,2 až 0,45, v masce zůstanou oblasti stojky, které výsledek zkreslují. Práh 0,5 pro šatonu bez tabulky a 0,58 pro šatonu s tabulkou byl zvolen jako ideální pro řešení tohoto problému (obr. 4.11). Vyprahované oblasti jsou ještě kontrolovány podle plochy, aby byl odfiltrován případný šum. Výsledek prahování a odfiltrování šumu jsou značky uvnitř faset a značka pozadí, ze kterých se spustí *watershed*. Z masky deteko-



Obrázek 4.10: Obrázkový diagram algoritmu měření DO na snímcích ze soustavy č. 3, Originální snímek → Filtrace → Segmentace → Distanční transformace → Maska distanční transformace → Watershed → Kontury → Aproximace kontur → Kontrola, měření.

vaných oblastí *watershed* algoritmem jsou extrahovány kontury faset splňující podmínku minimální a maximální plochy.

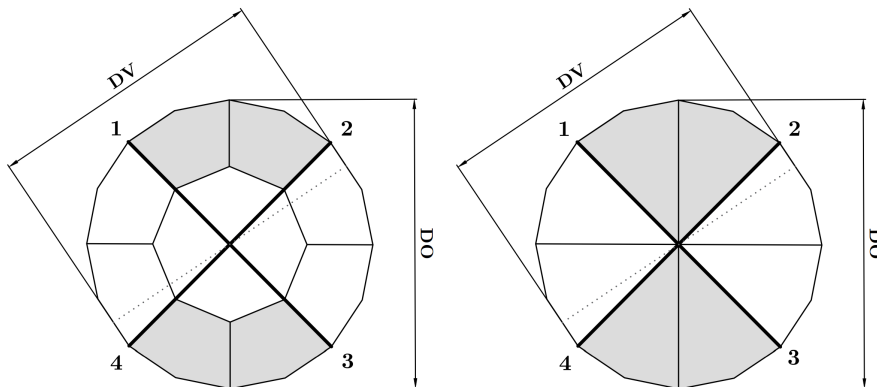
Kontury jsou aproximovány na  $n$ -úhelníky s počtem bodů pohybujících se od 6 do 16 bodů. Aproximovaná kontura tabulkového šatonu má 8 až 16 možných bodů, šaton bez tabulky 6 až 12 možných bodů. Rozmezí bodů není tak striktní jako v případě aproximace kontury tabulky na osmiúhelník, jelikož objektiv vybraný na snímání má menší hloubku ostrosti než je výška šatonu. Není tudíž možné mít na snímku zaostřený jak předěl stojky a šatonu, tak vršek šatonu, což vede k větší toleranci bodů u aproximace. Šaton je po tomto



Obrázek 4.11: Vliv hodnoty prahu na segmentaci, vlevo hodnota prahu 0,2, uprostřed 0,4, vpravo 0,58.

kroku složen ze dvou aproximovaných kontur nad sebou, napárovaných podle  $x$ -ové souřadnice.

Průměr opsané kružnice šatonu je vypočten ze dvou hodnot. Velikost opsané kružnice je vypočítána jako euklidovská vzdálenost mezi nejlevějším bodem vrchní kontury a nejpravějším bodem spodní kontury (dvojice 1-3). Druhá hodnota je vypočítána obráceně, nejlevější bod spodní kontury s nejpravějším bodem vrchní kontury (dvojice 2-4). Pro lepší představu je vidět princip měření průměru na obr. 4.12. Body nejvrchnější a nejspodnější kontury nebyly do měření započítány díky obtížné a nepřesné extrakci.



Obrázek 4.12: Dvojice vrcholů pro výpočet průměru opsané kružnice, s tabulkou (vlevo), bez tabulky (vpravo).

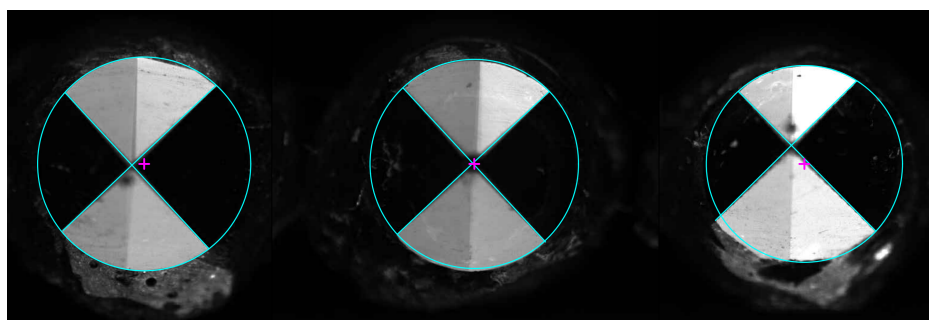
Po dopočítání jednotlivých průměrů je rozhodováno o symetričnosti diamantu na základě odchylky dvou změřených velikostí. Odchylka je nastavena na hodnotu 0,0432 mm, což odpovídá 9 pixelům. Výsledná hodnota velikosti

#### 4. REALIZACE

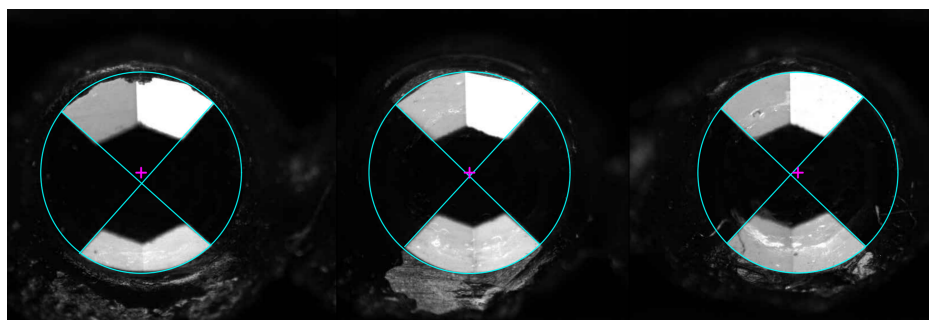
---

opsané kružnice je zprůměrována ze dvou naměřených hodnot a přenásobena velikostí pixelu. Poté je provedena kontrola, zda výsledek spadá do rozsahu velikostí šatonu dané kategorie.

Algoritmus je vylepšen o kontrolu vyosení středu šatonu. V ideálním případě by střed kružnic šatonu měl být na společném průsečíku všech hran šatonu směřujících do špičky. Vyosení středu může způsobovat nepřesné nalepení šatonu do nosiče nebo výrobní chyba. Algoritmus kontroluje odchylku průsečíku dvou změřených velikostí 1-3, 2-4 od středu kružnice opsané kontuře. Je nalezen střed kružnice opsané kontuře a míra tolerance kontroly je nastavena na radius 15 pixelů. Výsledek je vizualizován a hodnoty jsou uloženy do souboru.



(a) Odchylka středu u šatonu bez tabulky, vlevo a vpravo vyosené, uprostřed v toleranci.

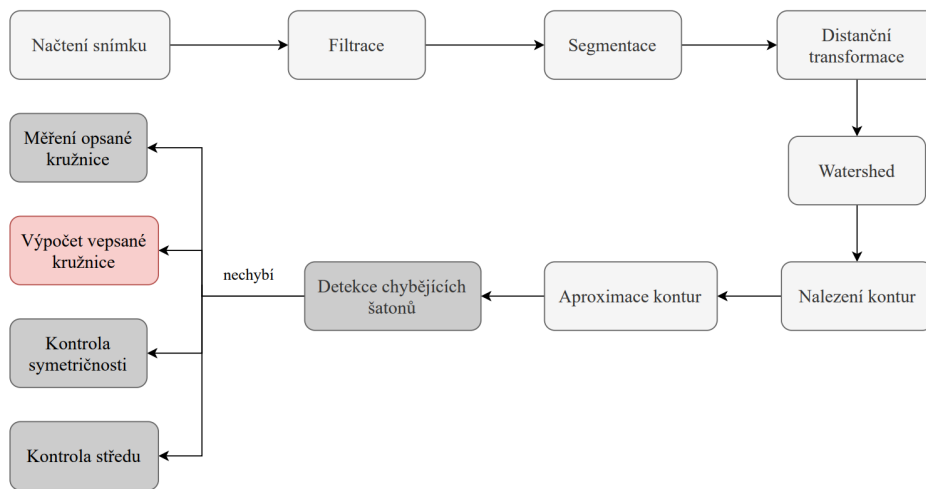


(b) Odchylka středu u šatonu s tabulkou, vlevo a vpravo vyosené, uprostřed v toleranci.

Obrázek 4.13: Ukázka vyoseného a nevyoseného středu šatonů.

## 4.4 Algoritmus měření DV

Jelikož jsou ze snímků velice špatně detekovatelné špičky hran v rámci jedné fasety, nebylo možné měřit DV ze snímku. Aby metrika nebyla zanedbána, je průměr kružnice vepsané vypočten ze změřeného průměru opsané kružnice DO. Diagram algoritmu je zobrazen na obr. 4.14. Vypočtený průměr je zakreslen do snímku pro vizuální kontrolu. Střed kružnice obklopující konturu šatonu je použit pro vizualizaci a umístění středu kružnice vepsané.



Obrázek 4.14: Diagram algoritmu měření DV na snímcích ze soustavy č. 3.



---

## Výsledky

Během práce bylo pořízeno 181 snímků na 340 bižuterních kamenech dvou typů a různých barev. Ze 340 šatonů bylo 46 šatonů detekováno jako chybějící, 50 s odchýlenými hodnotami velikostí průměrů kružnice, 26 bižuterních kamenů s vyoseným středem, 7 s vyoseným středem a zároveň odchýlenými hodnotami průměrů kružnice. Algoritmus chybně zareagoval v řádu jednotek diamantů.

### 5.1 Měření vepsané kružnice tabulky šatonu

Měření vepsané kružnice tabulky šatonu bylo implementováno pomocí dvou algoritmů a dvou snímacích soustav. Měření probíhalo nad stejným nosičem diamantů, tudíž porovnání výsledných rozměrů je spolehlivým ukazatelem přesnosti a odchylky měření.

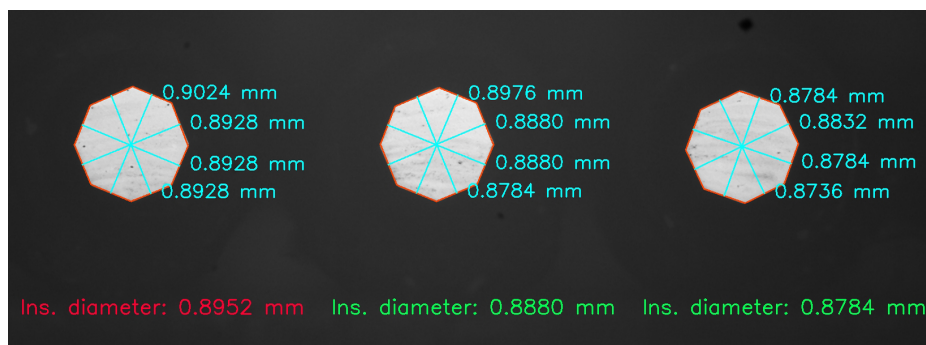
#### 5.1.1 Tabulka jako bílá plocha

Vizualizace změřených hodnot z algoritmu pracujícího se snímky ze soustavy č. 1 je vidět na obr. 5.1. Na obr. 5.1b je ukázka detekce chybějícího šatonu a kontrola vyleštění. Šaton je vyhodnocen jako chybějící, pokud není skoro vůbec vyleštěn – první šaton zleva.

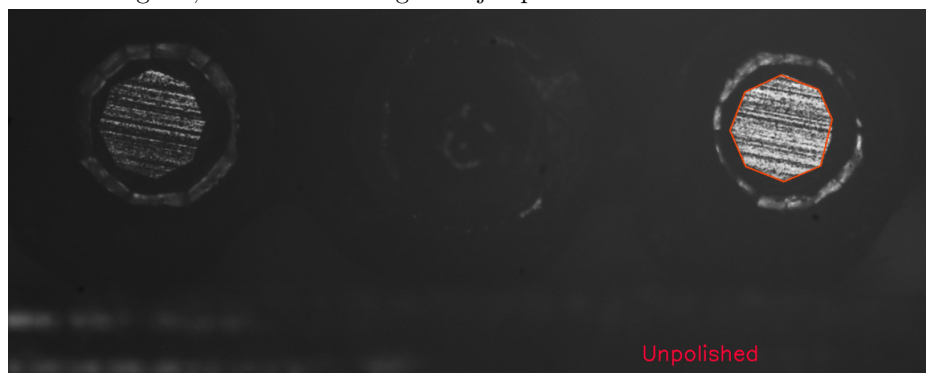
Metoda snímání s koaxiálním světlem je velmi náchylná na preciznost nalepení kamenu a vyleštění kamenu. Pokud je šaton nalepen tak, že tabulka není kolmo na optickou osu, paprsky světla dopadající na tabulku šatonu se neodráží rovnoběžně s osou objektivu, tudíž tabulka není osvětlena. Tato vlastnost zaručuje omezení chybného měření, pokud by diamant byl nalepen křivě, výsledné hodnoty by byly zkreslené. Nevýhodou a zároveň výhodou je citlivost na vyleštění. Při nedostatečném vyleštění algoritmus nepokračuje ve výpočtu. Nevýhodou je právě ono zastavení měření, šatony nejsou porovnány s kritérii rozměrů dané kategorie. Pokud by vlastnost vyleštění byla v kvalitativním

## 5. VÝSLEDKY

hodnocení nadřazená kontrole rozměrů, je algoritmus vyhovujícím řešením.



(a) Vizualizace změřených hodnot vepsané kružnice tabulky, modré hodnoty značí naměřené velikosti, zelená barva výsledného průměru signalizuje splnění podmínky velikosti kategorie, červená barva signalizuje opak.



(b) Výsledky algoritmu u chybějícího (uprostřed) a nedoleštěného šatonu (vlevo, vpravo).

Obrázek 5.1: Vizualizace výsledků algoritmu na snímcích ze soustavy č. 1.

V rámci ověření vlivu světla, vlivu pozice a vlastnosti opakování stejných výsledků byl proveden test na sadě 5 snímků. Na 5 snímcích lze vyhodnotit odchylky velikostí pro 7 šatonů. Použití koaxiálního světla s telecentrickým objektivem by mělo být z vlastnosti telecentricity odolné vůči pozici šatonu. Snímky zachycují šatony na pozici nejlevější až po pozici nejpravější. Průměrná směrodatná odchylka změřených velikostí tabulky je rovna 0,0028 mm a současně  $0,0028 < 0,0125$  mm (požadovaná přesnost měření). Z toho plyne, že pozice šatonu ve snímáči soustavě č. 1 významně neovlivňuje konečný výsledek (tabulka 5.1).



Tabulka 5.1: Část tabulky výsledků 3/7 měření odchylky DTV – bílá tabulka, dvojice 1-5, 2-6 atd. viz. obr. 4.5, hodnoty jsou udané v mm.

Šaton	Poz. 1	Poz. 2	Poz. 3	Poz. 4	Poz. 5	$\sigma$
<b>1 – průměr</b>	0,9216	0,9192	0,9228	0,9228	0,9228	–
1-5	0,9168	0,9072	0,9168	0,9120	0,9216	0,0055
2-6	0,9168	0,9216	0,9168	0,9168	0,9168	0,0021
3-7	0,9216	0,9216	0,9312	0,9264	0,9264	0,0040
4-8	0,9312	0,9264	0,9264	0,9360	0,9264	0,0043
<b>2 – průměr</b>		0,9336	0,9312	0,9348	0,9336	–
1-5		0,9264	0,9264	0,9312	0,9264	0,0024
2-6		0,9312	0,9264	0,9312	0,9312	0,0024
3-7		0,9312	0,9360	0,9360	0,9360	0,0024
4-8		0,9456	0,9360	0,9408	0,9408	0,0039
<b>3 – průměr</b>		0,9312	0,9300	0,9324	0,9336	–
1-5		0,9264	0,9216	0,9312	0,9312	0,0046
2-6		0,9264	0,9216	0,9264	0,9264	0,0024
3-7		0,9312	0,9360	0,9360	0,9360	0,0024
4-8		0,9408	0,9408	0,9360	0,9408	0,0024
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
<b>Průměrná směrodatná odchylka</b>						0,0028

### 5.1.2 Tabulka jako černá plocha

Vizualizace velikostí kružnice vepsané tabulce je vyobrazeno na obr. 5.2. Algoritmus nereaguje na nedostatečnou vyleštěnost šatonu, jak je patrné ze snímku 5.2b v porovnání s obr. 5.1a. Výhodou algoritmu je možnost vyhodnocení napříč všemi šatony bez ohledu na vyleštěnost tabulky. Nevýhodou je zvýraznění defektů zasahujících do tabulky a tím možné zkreslení rozměrů. Pokud je v oblasti tabulky defekt, paprsek světla se neodrazí rovnoběžně s optickou osou do objektivu, tudíž je defekt zvýrazněn černě jako plocha tabulky – viz. obr. 5.2c.

Algoritmus špatně zareagoval na 3 šatonech ze 170. Šatony mají čirou světlou lesklou barvu, která při nasvícení vytváří odlesky. Tabulka není dostatečně kontrastní s fasetou a vznikají na ní tmavé mapy. Canny-Otsu detektor hran sice hrany detekoval, ale je kolem nich příliš šumu či nejsou spojené – viz obr. 5.3. Špatnou detekci pravděpodobně způsobuje barva a struktura diamantu.

Na 15 snímcích byl proveden test vlivu osvětlení z difuzoru a pozice na výsledný rozměr vepsané kružnice tabulky. Z 15 snímků lze pozorovat odchylky velikostí na 21 šatonech. Jelikož použité kruhové světlo má vyzařovací úhel roven  $120^\circ$  a paprsky vycházející ze světla nejsou vůči sobě rovnoběžné, bylo zapotřebí prozkoumat, zda se světlo dokáže dostat rovnoměrně do všech šatonů nezávisle na pozici. Šatony byly nasnímány na dvou až pěti pozicích v rámci snímku. Z výsledků vychází, že průměrná směrodatná odchylka naměřených velikostí je 0,0040 mm, což je v toleranci s požadovanou přesností a tedy pozice nemá vliv na výsledek (tabulka 5.2).

Tabulka 5.2: Část tabulky výsledků 3/21 měření odchylky DTV – černá tabulka, dvojice 1-5, 2-6 atd. viz. obr. 4.5, hodnoty jsou udané v mm.

Šaton	Poz. 1	Poz. 2	Poz. 3	Poz. 4	Poz. 5	$\sigma$
<b>1 – průměr</b>	0,9588	0,9588	0,9612	0,9588	0,9612	–
1-5	0,9696	0,9648	0,9696	0,9696	0,9696	0,0021
2-6	0,9600	0,9600	0,9648	0,9600	0,9600	0,0021
3-7	0,9552	0,9600	0,9600	0,9552	0,9648	0,0040
4-8	0,9504	0,9504	0,9504	0,9504	0,9504	0,0000
<b>2 – průměr</b>	0,8676	0,8652	0,8640	0,8664	0,8664	–
1-5	0,8592	0,8592	0,8592	0,8736	0,8736	0,0079
2-6	0,8688	0,8640	0,8640	0,8592	0,8640	0,0034
3-7	0,8640	0,8640	0,8640	0,8640	0,8688	0,0021
4-8	0,8784	0,8736	0,8688	0,8688	0,8592	0,0071
<b>3 – průměr</b>	0,8016	0,8040	0,8064	0,8040	0,8076	–
1-5	0,8112	0,8208	0,7872	0,8160	0,7824	0,0175
2-6	0,8112	0,8160	0,8016	0,8112	0,8064	0,0055
3-7	0,8016	0,8064	0,8160	0,8112	0,8160	0,0063
4-8	0,7824	0,7728	0,8208	0,7776	0,8256	0,0253
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
<b>Průměrná směrodatná odchylka</b>						0,0040

### 5.1.3 Porovnání

Oba algoritmy byly spuštěny na 170 šatonech s tabulkou. Všechny 27 šatonů, které algoritmus pro bílou plochu tabulky vyhodnotil jako nevyčíslené, algoritmus pro černou plochu tabulku dokázal bezproblému změřit. Algoritmy

se v otázce symetričnosti neshodly ve výsledcích ani v jednom případě, důvodem může být špatně nastavená hranice 9 pixelů. Šatony vyhodnocené jako nesymetrické měly v oblasti tabulky defekt nebo nejasnou hranu. Průměrný rozdíl naměřených průměrů kružnic vepsaných tabulce je roven 0,0128 mm. Hodnota je v blízkosti požadované přesnosti 0,0125 mm, tudíž naměřené rozdíly jsou v toleranci (tabulka 5.3).

Tabulka 5.3: Část výsledků 6/143 porovnání algoritmů DTV, hodnoty jsou udané v mm.

Šaton	Bílá	Černá	Diff
<b>1 – průměr</b>	0,9396	0,9444	0,0048
<b>2 – průměr</b>	0,8664	0,8736	0,0072
<b>3 – průměr</b>	0,9096	0,8988	0,0108
<b>4 – průměr</b>	0,7572	0,7236	0,0336
<b>5 – průměr</b>	0,7140	0,7116	0,0024
<b>6 – průměr</b>	0,7572	0,7632	0,0060
⋮	⋮	⋮	⋮
<b>Průměrný rozdíl hodnot</b>			0,0128

## 5.2 Měření opsané kružnice a vizualizace kružnice vepsané šatonu

Pro měření opsané kružnice šatonu byl implementován pouze jeden algoritmus, není tak možné provést porovnání výsledků jako v předchozím případě. Algoritmus byl aplikován na celý nosič šatonů s tabulkou i bez tabulky. Výsledné vizualizace jsou vidět na obr. 5.4, 5.5.

Algoritmus efektivně řeší problém obtížného oddělení hrany stojky od šatonu. Není ovšem bezchybný, ze 340 nasnímaných šatonů byl špatně vyhodnocen na 9 šatonech s tabulkou a 2 bez tabulky. 7 šatonů s tabulkou bylo vyhodnoceno chybně kvůli špatnému nasvícení. Světlo nebylo rovnoběžně s osou nosiče, tudíž sousední fasety nebyly homogenně osvětleny. Po přesnímání stejné pětice diamantů algoritmus již neměl problém. Lze z toho usoudit, že algoritmus je velice citlivý na jasové změny jednotlivých faset. Porovnání výsledků je vidět na obr. 5.6. Na dvou šatonech bylo zachyceno vlákno, které rozdělilo snímané fasety na dvě poloviny a plocha vysegmentované kontury fasety neprošla kontrolou minimální plochy.

Při měření opsané kružnice šatonu bez tabulky nastal dvakrát problém při slití kontur protilehlých faset. Mezi konturami byla tak malá mezera, že ji funkce na hledání kontur nedokázala rozeznat. Protilehlé fasety byly vysegmentovány jako celek, při párování dvojic kontur ke kontuře není nalezena druhá a tak se výpočet pro daný šaton zastaví – viz. obr. 5.7.

Vizualizace vepsané kružnice šatonu je funkcionalitou, která slouží pouze pro vizuální kontrolu. Kvalita vizualizace velmi závisí na správné segmentaci šatonu, jelikož střed kružnice pro vizualizaci je extrahován z opsané kružnice kontury. Algoritmus vyhodnocuje polohu průsečíku měřených úseček vůči středu. Pokud je střed vyosen chybou segmentace či nasvícení, výsledek vyosení diamantu je falešně pozitivní. Během měření k tomuto jevu došlo u třech diamantů (obr. 5.8).

Na 25 snímcích byl proveden test vlivu pozice a světla na opakovatelnost výsledku. Sada 25 snímků se skládá z 10 snímků obsahujících 14 šatonů bez tabulky na různých pozicích a 15 snímků obsahujících 21 šatonů s tabulkou. Průměrná směrodatná odchylka měření je rovna 0,0034 mm pro šatony s tabulkou a 0,0031 mm pro šatony bez tabuky (tabulka 5.4, 5.5). Hodnota je v toleranci přesnosti (0,0125 mm) a algoritmus tak prošel testem opakovatelnosti. Pozice šatonu a světla nemá významný vliv na výsledek.

5.2. Měření opsané kružnice a vizualizace kružnice vepsané šatonu

Tabulka 5.4: Část výsledků 5/21 měření odchylky DO – šaton s tabulkou, dvojice 1-3, 2-4 viz. obr. 4.12, hodnoty jsou udané v mm.

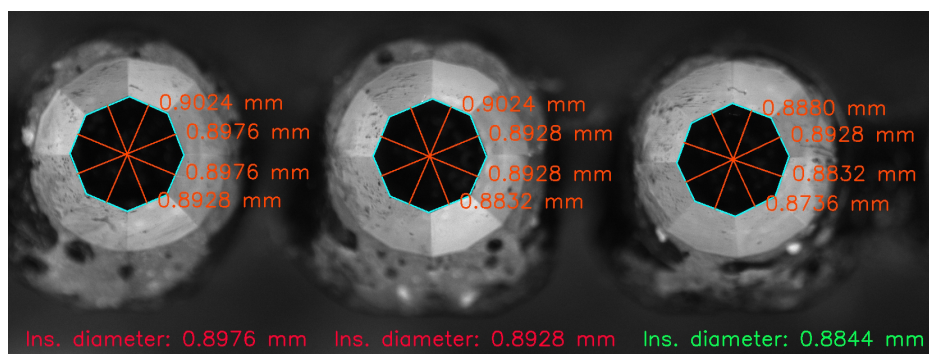
Šaton	Poz. 1	Poz. 2	Poz. 3	Poz. 4	Poz. 5	$\sigma$
<b>1 – průměr</b>	1,6176	1,6152	1,6176	1,6176	1,6200	–
1-3	1,6128	1,6128	1,6128	1,6128	1,6176	0,0021
2-4	1,6224	1,6176	1,6224	1,6224	1,6224	0,0021
<b>2 – průměr</b>	1,6896	1,6944	1,6920	1,6968	1,6992	–
1-3	1,6992	1,7040	1,7040	1,7040	1,7088	0,0034
2-4	1,6800	1,6848	1,6800	1,6896	1,6896	0,0048
<b>3 – průměr</b>	1,6320	1,6320	1,6296	1,6344	1,6224	–
1-3	1,6176	1,6128	1,6128	1,6176	1,6032	0,0059
2-4	1,6464	1,6512	1,6464	1,6512	1,6416	0,0040
<b>4 – průměr</b>		1,6752	1,6752	1,6704	1,6728	–
1-3		1,6464	1,6464	1,6416	1,6416	0,0028
2-4		1,7040	1,7040	1,6992	1,7040	0,0024
<b>5 – průměr</b>		1,6176	1,6176	1,6224	1,6248	–
1-3		1,6224	1,6224	1,6224	1,6272	0,0024
2-4		1,6128	1,6128	1,6224	1,6224	0,0055
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
<b>Průměrná směrodatná odchylka</b>						0,0034

## 5. VÝSLEDKY

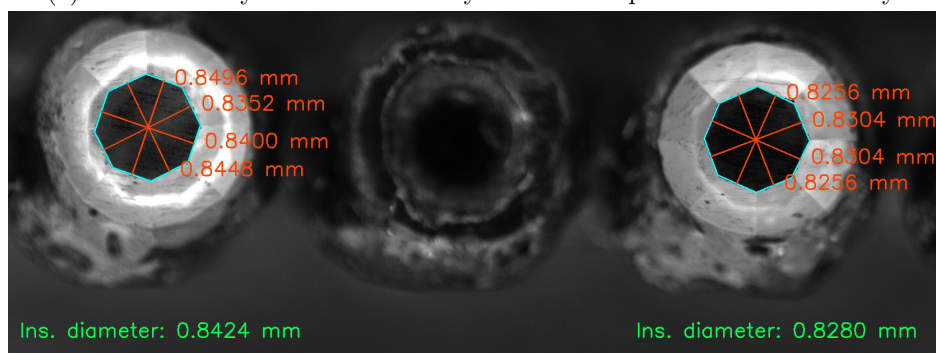
Tabulka 5.5: Část výsledků 5/14 měření odchylky DO – šaton bez tabulky, dvojice 1-3, 2-4 viz. obr. 4.12, hodnoty jsou udané v mm.

Šaton	Poz. 1	Poz. 2	Poz. 3	Poz. 4	Poz. 5	$\sigma$
<b>1 – průměr</b>	1,6560	1,6608	1,6608	1,6608	1,6632	–
1-3	1,6464	1,6560	1,6560	1,6560	1,6560	0,0043
2-4	1,6656	1,6656	1,6656	1,6656	1,6704	0,0021
<b>2 – průměr</b>	1,6944	1,7112	1,6992	1,6944	1,6944	–
1-3	1,6896	1,6944	1,6992	1,6896	1,6896	0,0043
2-4	1,6992	1,7280	1,6992	1,6992	1,6992	0,0129
<b>3 – průměr</b>		1,6896	1,6824	1,6800	1,6848	–
1-3		1,7040	1,6944	1,6896	1,6992	0,0062
2-4		1,6752	1,6704	1,6704	1,6704	0,0024
<b>4 – průměr</b>		1,6728	1,6752	1,6728	1,6728	–
1-3		1,6704	1,68	1,6704	1,6704	0,0048
2-4		1,6752	1,6704	1,6752	1,6752	0,0024
<b>5 – průměr</b>		1,6800	1,6800	1,6800	1,6776	–
1-3		1,7040	1,7040	1,7040	1,6992	0,0024
2-4		1,6560	1,6560	1,6560	1,6560	0,0000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
<b>Průměrná směrodatná odchylka</b>						<b>0,0031</b>

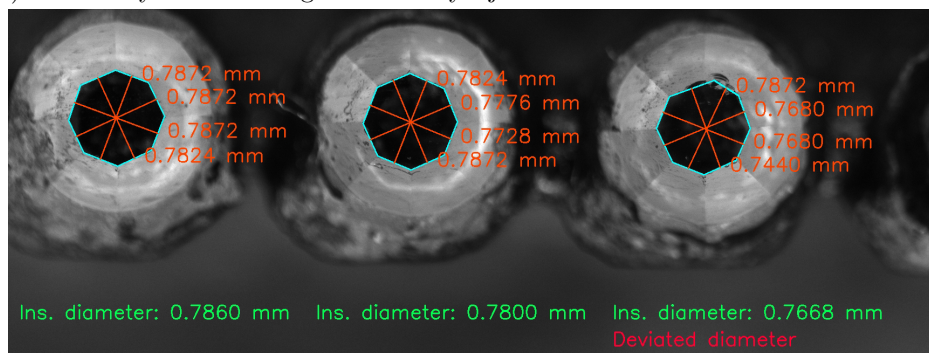
## 5.2. Měření opsané kružnice a vizualizace kružnice vepsané šatonu



(a) Standardní vyhodnocení změřených hodnot vepsané kružnice tabulky.



(b) Ukázka vyhodnocení algoritmu u chybějícího a nedoleštěného šatonu z obr. 5.1b

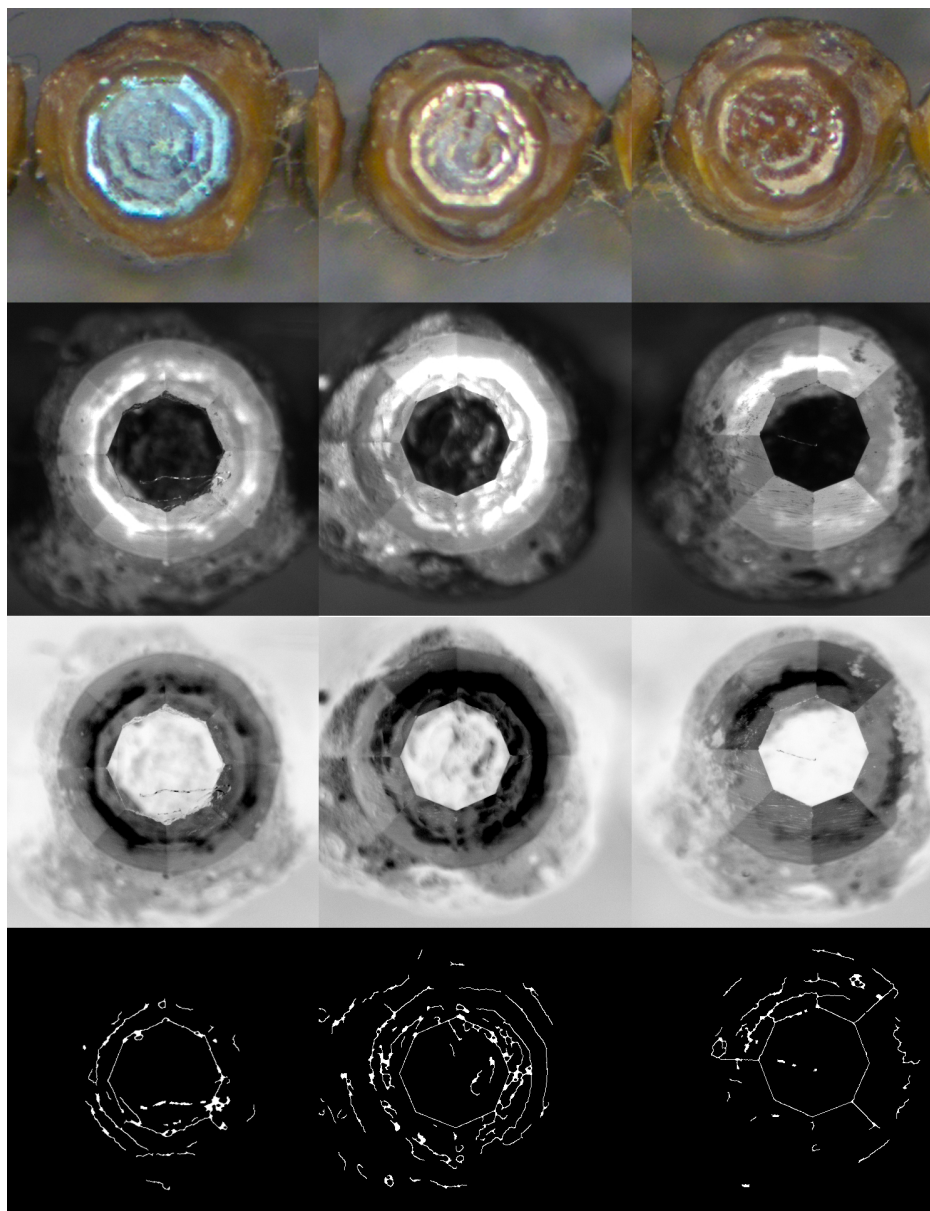


(c) Vizualizace změřených hodnot vepsané kružnice tabulky s nepřesnostmi.

Obrázek 5.2: Vizualizace výsledků algoritmu na snímcích ze soustavy č. 2, oranžové hodnoty značí naměřené velikosti, zelená barva výsledného průměru signalizuje splnění podmínky velikosti kategorie, červená barva signalizuje opak.

## 5. VÝSLEDKY

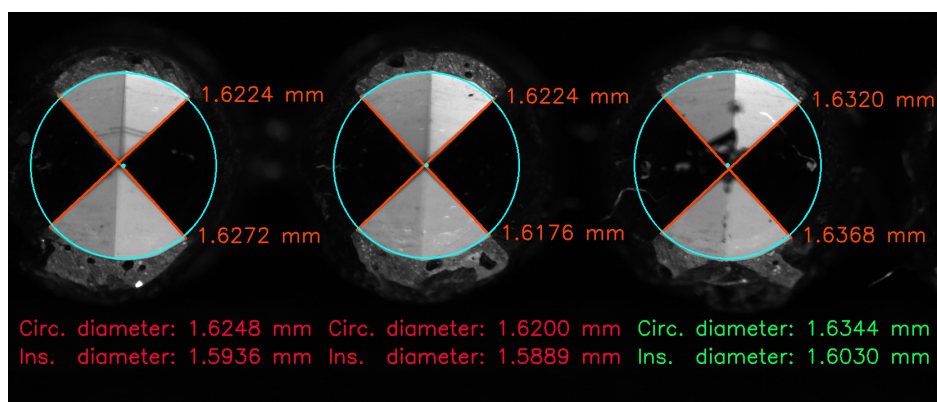
---



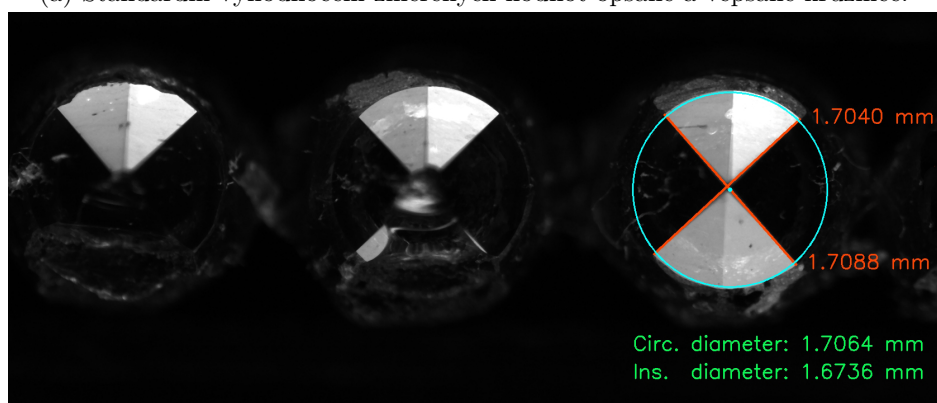
Obrázek 5.3: Chybné vyhodnocení šatonů s tabulkou. Nahoře skutečná podoba šatonu, pod tím snímek ze soustavy č. 2, druhý odspodu negativ snímku, poslední maska po detekci hran.



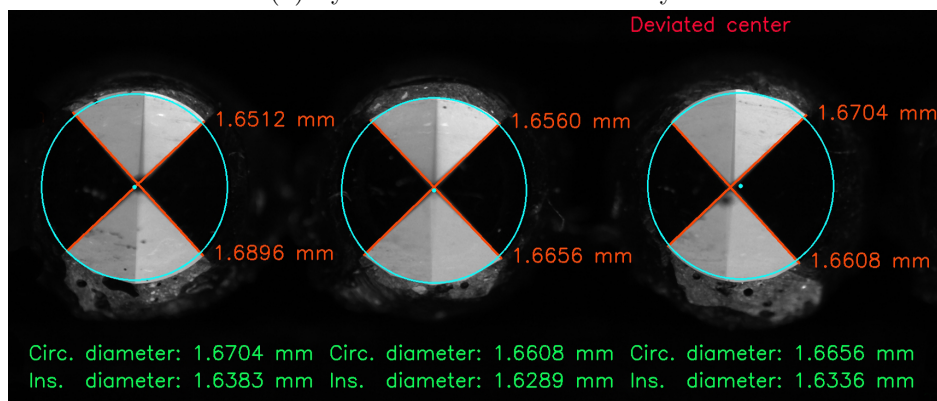
## 5.2. Měření opsané kružnice a vizualizace kružnice vepsané šatonu



(a) Standardní vyhodnocení změřených hodnot opsané a vepsané kružnice.



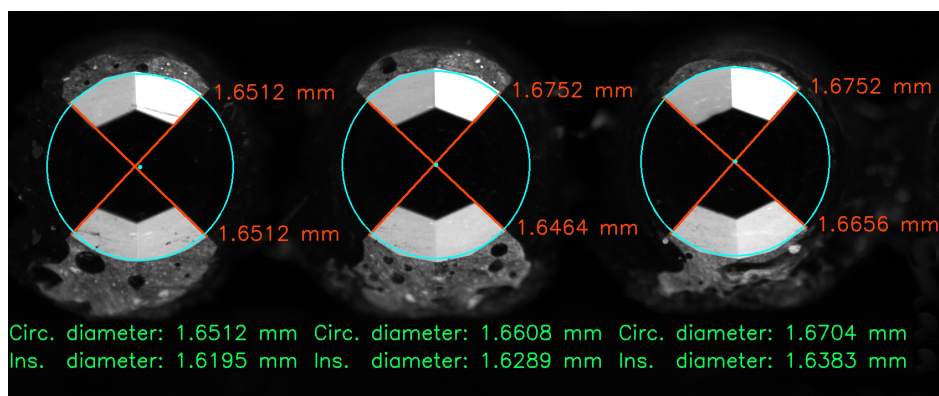
(b) Vyhodnocení u seříznuté hrany.



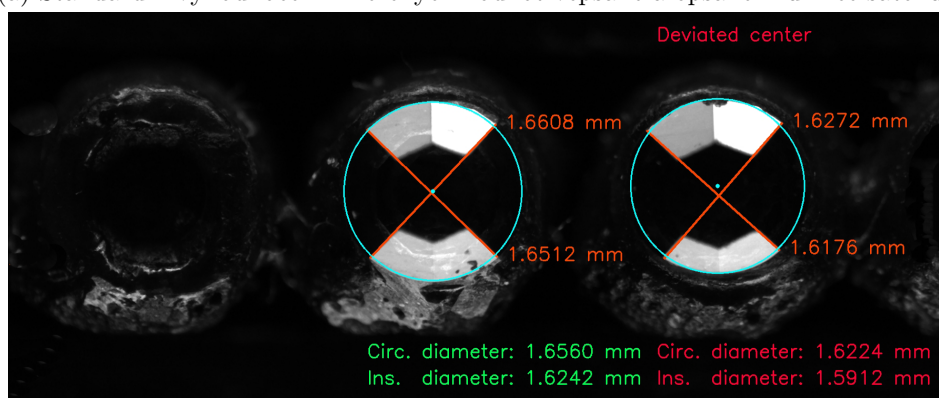
(c) Ukázka vyhodnocení vyoseného středu.

Obrázek 5.4: Vizualizace výsledků algoritmu na snímcích ze soustavy č. 3 u šatonů bez tabulky, oranžové hodnoty značí naměřené velikosti, zelená barva výsledného průměru signalizuje splnění podmínky velikosti kategorie, červená barva signalizuje opak, modrá kružnice je vizualizací kružnice vepsané.

## 5. VÝSLEDKY

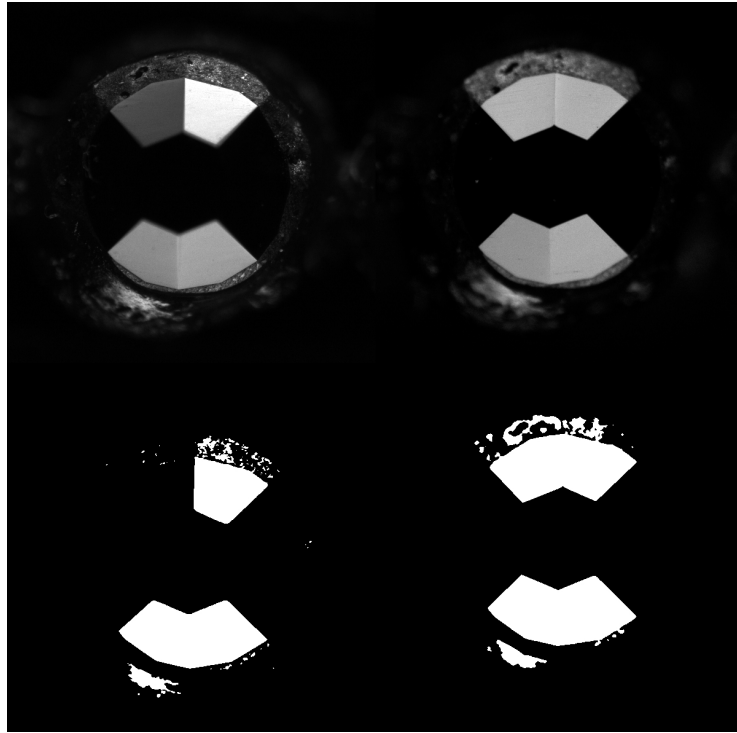


(a) Standardní vyhodnocení změřených hodnot vepsané a opsané kružnice šatonu.

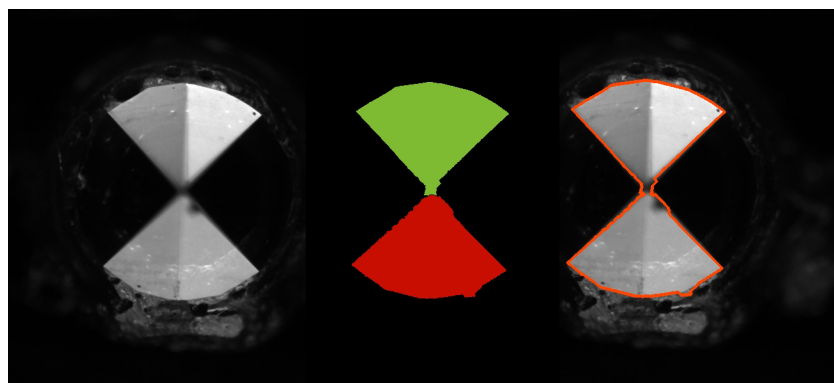


(b) Ukázka vyhodnocení chybějícího a vyoseného šatonu.

Obrázek 5.5: Vizualizace výsledků algoritmu na snímcích ze soustavy č. 3 u šatonů s tabulkou, oranžové hodnoty značí naměřené velikosti, zelená barva výsledného průměru signalizuje splnění podmínky velikosti kategorie, červená barva signalizuje opak, modrá kružnice je vizualizací kružnice vepsané.



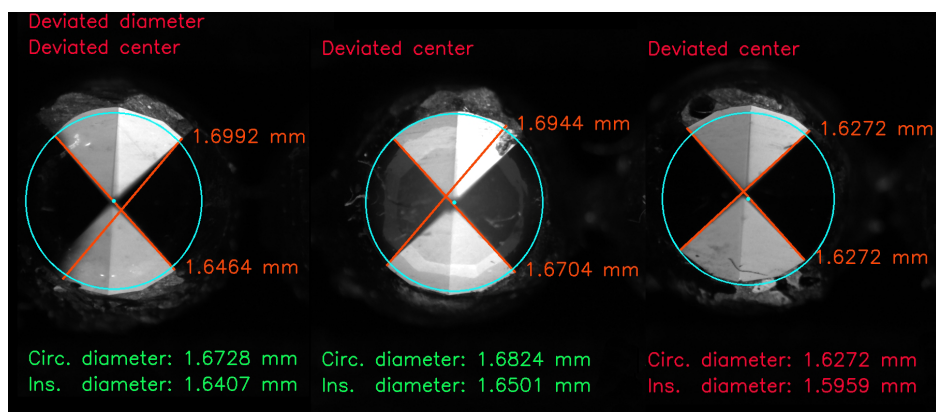
Obrázek 5.6: Porovnání vlivu světla na vyhodnocení výsledků, vlevo šaton s křivým nasvícením a maska po segmentaci, vpravo šaton s opraveným nasvícením a maska po segmentaci.



Obrázek 5.7: Ukázka slítí kontur, vlevo zachycený snímek, uprostřed barevná maska po metodě *watershed*, vpravo slitá kontura.

## 5. VÝSLEDKY

---



Obrázek 5.8: Falešné vyhodnocení vyoseného středu, vlevo falešné díky nehomogennímu osvětlení krajů šatonu, uprostřed falešné kvůli lepidlu na fasetě, vpravo falešné pravděpodobně segmentací, oranžové hodnoty značí naměřené velikosti, zelená barva výsledného průměru signalizuje splnění podmínky velikosti kategorie, červená barva signalizuje opak, modrá kružnice je vizualizací kružnice vepsané.

---

## Diskuze

První algoritmus měřící vepsanou kružnici tabulky šatonu ze snímků snímací soustavy č. 1 má výborné výsledky u vyleštěných šatonů. Pokud šaton není dostatečně vyleštěn nebo je nedoleštěný, tabulka šatonu není dostatečně osvětlena a není možné detekovat hrany tabulky. Nasvícení koaxiálním světlem umožňuje přesné rozpoznání vyleštěného a nevyleštěného kamenu, kterého by se dalo využít pro kontrolu míry vyleštění.

Druhý algoritmus měřící vepsanou kružnici tabulky již nemá problém s nevyleštěností, ale je citlivější na defekty v blízkosti tabulky a specifickou barvu šatonu. Malé defekty v oblasti tabulky jsou odstraněny aproximací nalezené kontury, pokud defekt po aproximaci je stále součástí kontury, je ve většině případů zachycen kontrolou symetričnosti diamantu. Algoritmus selhal při třech odstínech barvy z více než 100 nasnímaných. Vyřešením citlivosti na lesklou žlutou a modrou barvu šatonu by mohl být individuální přístup k jednotlivým barvám, úprava jasových korektur nebo použití jiné barvy osvětlení.

Algoritmus měřící rozměr opsané kružnice šatonu efektivně řeší úlohu segmentace stojky nosiče od šatonu. Všechny 340 nasnímaných šatonů bylo segmentováno tak, že krajní body hran faset byly 100% rozeznány. Nasvětlení šatonu zobrazuje pár dvou protilehlých faset. Rozměr kružnice opsané by se dal měřit tedy ze tří hodnot, dvou diagonálních a spojením koncových bodů hrany společné dvou faset. Práce počítá velikost kružnice pouze z diagonálních hodnot, jelikož segmentace stojky od nosiče v oblasti hrany dvou faset byla chybovější. Přesnost výsledku může být zlepšena použitím maximálního počtu měření v rámci šatonu – 4.

Kontrola středu diamantu detekuje křivě nalepené nebo křivě vybroušené diamanty, chybovost se projevila u třech diamantů, kterou zapříčinilo nehomogenní osvětlení, lepidlo a segmentace. Kontrola symetričnosti v implementaci spíše slouží jako kontrola správné detekce, algoritmy se v otázce syme-

tričnosti shodly pouze v jednotkách případů. Pro přesnější rozhodování o symetrických rozměrech diamantů je zapotřebí zvolit lepší hranici po konzultaci s odborníkem na výrobu šatonů.

Pro celkové zlepšení měření je možné použít výkonnější techniku a zvýšit rozlišení snímku. Tím bude umožněno měřit velikost vepsané kružnice šatonu. Momentálně body, ze kterých se průměr vepsané kružnice šatonu počítá, nejsou ve snímku viditelné, což nemusí být nutně způsobeno nedostatečnou technikou, ale i způsobem nalepení šatonu.

Výsledky měření je možné zdokonalit úpravou samostatných algoritmů. V práci je použit Cannyho detektor, který využívá Gaussovu filtraci. Zaměněním Gaussovy filtrace za filtraci zachovávající hrany by detekce hran mohla být efektivnější a přesnější. Rozpoznání hran je možné zpřesnit pomocí sub-pixelových metod detekce hran.

---

## Závěr

Práce je zaměřena na objektivní automatizaci kontroly rozměrů bižuterních kamenů, konkrétně pomocí velikostí opsaných a vepsaných kružnic. Samotné algoritmy měření vznikly ze spojení již existujících metod snímání bižuterních kamenů a metod kontroly objektů v průmyslu. Navržené algoritmy měří velikosti vepsaných kružnic tabulky šatonu a opsaných kružnic šatonu s přesností 0,098 mm, kontrolují vyosenost středu, vyleštěnost kamene či odchylky hodnot průměrů. Chybovost algoritmu je v řádu jednotek diamantů ze 340 nasnímaných. Velikost kružnice vepsané diamantu byla dopočítána ze změřeného průměru kružnice vepsané a vizualizována do výsledku.

Stanové cíle byly splněny, byly sestaveny tři snímací soustavy, čtyři algoritmy měření pro kontrolu kvality a vizualizace výsledků. Práce bude sloužit jako podklad pro studii proveditelnosti automatického systému kontroly kvality v podniku Preciosa, a.s.





---

## Bibliografie

1. TOUT, Karim. *Automatic vision system for surface inspection and monitoring: Application to wheel*. 2018. Dis. Université de Technologie de Troyes. NNT: 2018TROY008, tel-02974251.
2. LAHAJNAR, Franci; BERNARD, Rok; PERNUŠ, Franjo; KOVAČIČ, Stanislav. Machine vision system for inspecting electric plates. *Computers in Industry* [online]. 2002, roč. 47, č. 1, s. 113–122 [cit. 2021-04-21]. ISSN 0166-3615. Dostupné z DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(01\)00134-8](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(01)00134-8).
3. VOLNÝ, Filip. *Metody zpracování obrazu pro měření a třídění skleněných tvarových kamenů*. Ostrava, 2015. Dipl. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky.
4. Telecentric lenses tutorial. In: *Opto Engineering* [online]. © 2015 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.opto-e.com/resources/telecentric-lenses-tutorial>.
5. XIANG, Rong; HE, Wenhui; ZHANG, Xinna; WANG, Dong; SHAN, Yuekang. Size measurement based on a two-camera machine vision system for the bayonets of automobile brake pads. *Measurement* [online]. 2018, roč. 122, s. 106–116 [cit. 2021-04-21]. ISSN 0263-2241. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.017>.
6. HUANG, Kuo-Yi. Detection and classification of areca nuts with machine vision. *Computers Mathematics with Applications* [online]. 2012, roč. 64, č. 5, s. 739–746 [cit. 2021-04-21]. ISSN 0898-1221. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2011.11.041>. Advanced Technologies in Computer, Consumer and Control.
7. LIMING, Xu; YANCHAO, Zhao. Automated strawberry grading system based on image processing. *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. 2010, roč. 71, S32–S39 [cit. 2021-04-21]. ISSN 0168-1699. Do-

- stupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.09.013>. Special issue on computer and computing technologies in agriculture.
8. ELMASRY, Gamal; CUBERO, Sergio; MOLTÓ, Enrique; BLASCO, José. In-line sorting of irregular potatoes by using automated computer-based machine vision system. *Journal of Food Engineering* [online]. 2012, roč. 112, č. 1, s. 60–68 [cit. 2021-04-21]. ISSN 0260-8774. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.03.027>.
  9. HASSAN, J.; AWAN, A. Majid; JALIL, A. Welding Defect Detection and Classification Using Geometric Features. In: *2012 10th International Conference on Frontiers of Information Technology*. 2012, s. 139–144. Dostupné z DOI: [10.1109/FIT.2012.33](https://doi.org/10.1109/FIT.2012.33).
  10. FANG, Mei; YUE, GuangXue; YU, QingCang. The Study on An Application of Otsu Method in Canny Operator. In: *2009 International Symposium on Information Processing* [online]. 2009, s. 109–112 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/255634985\\_The\\_Study\\_on\\_An\\_Application\\_of\\_Otsu\\_Method\\_in\\_Canny\\_Operator](https://www.researchgate.net/publication/255634985_The_Study_on_An_Application_of_Otsu_Method_in_Canny_Operator).
  11. NNOLIM, Uche A. Automated crack segmentation via saturation channel thresholding, area classification and fusion of modified level set segmentation with Canny edge detection. *Heliyon* [online]. 2020, roč. 6, č. 12, e05748 [cit. 2021-04-21]. ISSN 2405-8440. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05748>.
  12. CHEN, Hsin-Hung; CHUANG, Wen-Ning; WANG, Chau-Chang. Vision-based line detection for underwater inspection of breakwater construction using an ROV. *Ocean Engineering* [online]. 2015, roč. 109, s. 20–33 [cit. 2021-04-21]. ISSN 0029-8018. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.09.007>.
  13. KAŠPAR, Ondřej. *Aplikace malých kamerových systémů při měření bižuterních kamenů v prostředí LabVIEW*. Liberec, 2010. Bak. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií.
  14. VLACH, Jaroslav. *Metody zpracování obrazu pro časově náročné úlohy*. Liberec, 2012. Dis. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií.
  15. NASYROVA, Maria. *Metody zpracování obrazu pro měření a třídění bižuterních kamenů*. Praha, 2016. Dipl. ČVUT, Fakulta elektrotechnická, Katedra telekomunikační techniky.
  16. KASPAR, Petr. *Metody zpracování obrazu v bižuterním průmyslu*. Liberec, 2015. Bak. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií.

17. Řádkové kamery - Typy a technologie. In: *ATEsystem* [online]. © 2019 [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: <https://eshop.atesystem.cz/clanek/187/dil-1-radkove-kamery--typy-a-technologie>.
18. Cameras. In: *Opto Engineering* [online]. © 2015 [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: <https://www.opto-e.com/basics/cameras>.
19. BASLER AG. acA2500-60um - Basler ace. In: *Basler* [online]. 2021 [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/area-scan-cameras/ace/aca2500-60um/>.
20. Optics. In: *Opto Engineering* [online]. © 2015 [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: <https://www.opto-e.com/basics/optics>.
21. Telecentric Lenses. In: *Vision Doctor* [online]. © 2009 [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: <https://www.vision-doctor.com/en/telecentric-lenses.html>.
22. Lighting. In: *Opto Engineering* [online]. © 2015 [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: <https://www.opto-e.com/basics/lighting>.
23. Coaxial Lights. In: *Polytec* [online]. © 2021 [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: <https://www.polytec.com/eu/machine-vision/products/led-lighting/standard-lighting/coaxial-lights>.
24. Katalog osvětlení strojového vidění. In: *SmartView* [online]. [N.d.] [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: [https://www.smartview.cz/files/files/katalog\\_smart\\_view.pdf](https://www.smartview.cz/files/files/katalog_smart_view.pdf).
25. JIŘINA, Marcel; NOVÁK, Jakub; BRCHL, Lukáš. Segmentace obrazu - Houghova transformace a plošné segmentace. In: *Strojové vidění a zpracování obrazu (BI-SVZ)* [online]. 2021 [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: <https://courses.fit.cvut.cz/BI-SVZ/lectures/files/bi-svz-09-segmentace-obrazu-plosne.pdf>.
26. MEYER, F. Color image segmentation. In: *1992 International Conference on Image Processing and its Applications*. 1992, s. 303–306.
27. CHEN, Qing; YANG, Xiaoli; PETRIU, E.M. Watershed segmentation for binary images with different distance transforms. In: *The 3rd IEEE International Workshop on Haptic, Audio and Visual Environments and Their Applications*. 2004, s. 111–116. Dostupné z DOI: 10.1109/HAVE.2004.1391891.
28. BORGEFORS, Gunilla. Distance transformations in digital images. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* [online]. 1986, roč. 34, č. 3, s. 344–371 [cit. 2021-05-06]. ISSN 0734-189X. Dostupné z DOI: [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(86\)80047-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(86)80047-0).

29. JIŘINA, Marcel; NOVÁK, Jakub; BRCHL, Lukáš. Předzpracování obrazu - Filtrace v prostorové a frekvenční oblasti. In: *Strojové vidění a zpracování obrazu (BI-SVZ)* [online]. 2021 [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://courses.fit.cvut.cz/BI-SVZ/lectures/files/bi-svz-07-filtrace-v-prostorove-a-frekvencni-oblasti.pdf>.
30. SONKA, Milan; HLAVAC, Vaclav; BOYLE, Roger. *Image processing, analysis, and machine vision*. 4. vyd. Cengage Learning, 2015. ISBN 1-133-59360-7.
31. SUZUKI, Satoshi; BE, KeiichiA. Topological structural analysis of digitized binary images by border following. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* [online]. 1985, roč. 30, č. 1, s. 32–46 [cit. 2021-05-07]. ISSN 0734-189X. Dostupné z DOI: [https://doi.org/10.1016/0734-189X\(85\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0734-189X(85)90016-7).
32. DOUGLAS, David H.; PEUCKER, Thomas K. Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or its Caricature. In: *Classics in Cartography* [online]. John Wiley Sons, Ltd, 2011, kap. 2, s. 15–28 [cit. 2021-05-07]. ISBN 9780470669488. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470669488.ch2>.
33. JIŘINA, Marcel; NOVÁK, Jakub; BRCHL, Lukáš. Měření dílů. In: *Strojové vidění a zpracování obrazu (BI-SVZ)* [online]. 2021 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://courses.fit.cvut.cz/BI-SVZ/lectures/files/bi-svz-03a-mereni-dilu.pdf>.

## Seznam použitých zkratek

**CCD** Charge-Coupled Device

**CMOS** Complementary Metal-Oxide Semiconductor

**FOV** Field of View

**DV** Průměr Kružnice Vepsané Šatonu

**DO** Průměr Kružnice Opsané Šatonu

**DTV** Průměr Kružnice Vepsané Tabulce Šatonu

**UV** Ultraviolet

**IR** Infrared



---

## Obsah přiloženého paměťového média

README.md .....	stručný popis obsahu média
README.pdf .....	stručný popis obsahu média v PDF
data .....	adresář vstupních dat
results	
DO .....	adresář obsahující výsledky DO
DTV.....	adresář obsahující výsledky DTV
Measurements.xlsx.....	tabulka výsledků měření
TestPosition.xlsx.....	tabulka výsledků odchylek měření
src	
impl.....	zdrojové kódy implementace
thesis .....	zdrojová forma práce ve formátu $\text{\LaTeX}$
thesis.pdf .....	text práce ve formátu PDF