



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

OPTICKÁ GRANULOMETRIE

OPTICAL GRANULOMETRY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin

Dohnálek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Kunz, Ph.D.

BRNO 2023

Diplomová práce

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

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Martin Dohnálek

ID: 199980

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Optická granulometrie

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je implementovat a otestovat algoritmus pro měření počtu, velikosti a rychlosti padajících částic ve vertikálním potrubí pomocí vysokorychlostní kamery. Zadání lze shrnout do následujících bodů:

1. Proveďte literární průzkum metod granulometrie s důrazem na optické metody.
2. Na existujícím přípravku proveďte testovací měření shluku padajících částic. Zjistěte limitace aktuálního řešení a navrhnete vhodné úpravy přípravku.
3. Implementujte vhodný algoritmus pro určení velikosti a počtu padajících částic a vyzkoušejte jeho funkčnost na upraveném testovacím přípravku, případně proveďte další úpravy. Pokuste se z dat zjistit i další informace, například rychlost pohybu částic.
4. Zjistěte robustnost vašeho řešení na nežádoucí externí vlivy, například prašnost.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

ALLEN, T.: Powder Sampling and Particle Size Determination . Amsterdam, Nizozemí: Elsevier Science, 2003, ISBN 0-444-51564-X, 682 s.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 17.5.2023

Vedoucí práce: Ing. Jan Kunz, Ph.D.

Konzultant: Ing. Šimon Bilík

doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou detekce velikosti padajících makroskopických částic s využitím počítačového vidění. Výsledky měření mohou jednak sloužit k ověřování jiných granulometrických metod, nebo mohou být použity v průmyslu jako jednodušší alternativa klasických metod. Snímání vzorků částic probíhá za letu, částice se mohou překrývat. Z toho důvodu data zaznamenává vysokorychlostní kamera na scéně se speciálně vyvinutým osvětlením. Součástí algoritmu jsou: odstranění pozadí, lokalizace potenciálních částic, segmentace metodou watershed, určení velikosti částic. Pomocí obrazové korelace je určována také rychlost pádu a počet částic ve vzorku. Experiment potvrdil, že naměřené velikosti částic vzorku odpovídají velikostem určeným tradiční metodou prosívání a jsou konzistentní i při opakovaném měření. Správnost určování rychlosti byla ověřena fyzikálním výpočtem. Při zkoumání vlivu prašnosti vzorku na kvalitu detekce byla zjištěna odolnost vůči přítomnosti prachu do 10 % hmotnosti vzorku.

Klíčová slova

Granulometrie, počítačové vidění, OpenCV, analýza částic, vysokorychlostní snímání, zpracování obrazu, Python

Abstract

This diploma thesis deals with the topic of macroscopic particle size detection during freefall using computer vision. The measurement results can be used to verify other granulometric methods, or in the industry as a simpler alternative to conventional methods. Particle sampling takes place in flight and particles may overlap. Because of this, the data is recorded by a high-speed camera on the scene with fit-to-purpose lighting. The components of the proposed algorithm are: background removal, localization of potential particles, segmentation using the watershed method, determination of particle size. Using image correlation, the fall velocity and the number of particles in the sample are also determined. Experiments confirmed that the measured particle sizes of the sample correspond to the sizes determined by the traditional sieving method and are consistent even on repeated measurements. The correctness of the speed determination was verified by a theoretical calculation. When determining the effect of the sample's dustiness on the quality of detection, resistance to the presence of dust up to 10% of the sample weight was found.

Keywords

Granulometry, computer vision, OpenCV, particle analysis, high speed imaging, image processing, Python

Poděkování

Mé díky patří panu Ing. Janu Kunzovi Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce, za odborné vedení, udělené rady a věnovaný čas. Rovněž děkuji panu konzultantovi Ing. Šimonu Bilíkovi za cenné podněty předané na společných konzultacích. Do cíle pátého ročníku bych to ale nikdy nedotáhl bez neutuchající podpory svých rodičů. Tudíž má největší vděčnost míří právě jim.

V Brně dne: 17. května 2023

podpis autora

Bibliografická citace

DOHNÁLEK, Martin. *Optická granulometrie*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151850>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Jan Kunz.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Martin Dohnálek
VUT ID studenta:	199980
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2022/23
Téma závěrečné práce:	Optická granulometrie

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: 17. května 2023

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	11
ÚVOD	12
1. GRANULOMETRIE	13
1.1 MĚRITELNÉ PARAMETRY	13
1.2 MECHANICKÉ METODY.....	14
1.2.1 Metoda přesívání	14
1.2.2 Sedimentační metody.....	15
1.3 OPTICKÉ METODY.....	16
1.3.1 Dynamický rozptyl světla	16
1.3.2 Cross-korelační metoda.....	17
1.3.3 Vlnková metoda.....	18
1.3.4 Metoda založena na Fourierově transformaci	18
1.3.5 Metoda s morfologickými operacemi	19
1.3.6 Stínografie.....	20
2. TEORIE ZPRACOVÁNÍ OBRAZU	21
2.1 MORFOLOGICKÉ OPERACE.....	21
2.1.1 Eroze	22
2.1.2 Dilatace.....	22
2.1.3 Otevření a uzavření.....	23
2.2 WATERSHED ALGORITMUS	24
2.3 FOURIEROVA TRANSFORMACE OBRAZU.....	26
2.4 KALIBRACE KAMERY.....	27
3. SOUČASNÉ ŘEŠENÍ	29
3.1 HARDWAROVÉ PRVKY	29
3.1.1 Kamera.....	30
3.1.2 Osvětlení	31
3.2 ÚVODNÍ NASTAVENÍ SCÉNY.....	31
4. ZÁKLADNÍ DETEKCE PADAJÍCÍCH ČÁSTIC	35
4.1 PRVNÍ VERZE ALGORITMU	35
4.2 SNAHA O SEGMENTACI SHLUKŮ	38
4.2.1 Předzpracování.....	38
4.2.2 Hledání částic	38
4.2.3 Aplikace watershed algoritmu	40
4.2.4 Využití elektromagneticky řízených dvířek.....	41
4.3 HARDWAROVÉ MODIFIKACE.....	43
4.3.1 Určení optimálního umístění osvětlení scény.....	43
4.3.2 Osvětlení zepředu.....	45
4.3.3 Osvětlení z boku	46
4.3.4 Intenzita osvětlení	47

5. POKROČILÁ DETEKCE PADAJÍCÍCH ČÁSTIC	49
5.1 PŘEDZPRACOVÁNÍ.....	49
5.2 HRANOVÁ DETEKCE	51
5.3 ZÍSKÁNÍ OBLASTÍ	51
5.4 HLEDÁNÍ LOKÁLNÍCH MAXIM	52
5.5 DĚLENÍ OBLASTÍ.....	53
5.6 APLIKACE WATERSHED ALGORITMU	54
5.7 DODATEČNÉ DĚLENÍ OBLASTÍ	55
5.8 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SEGMENTACE PLASTOVÝCH KULIČEK	56
5.9 PŘESUN A KALIBRACE KAMERY	57
5.9.1 <i>Ověření platnosti koeficientu</i>	58
5.10 FINALIZACE OSVĚTLENÍ.....	59
5.10.1 <i>Odlesky</i>	60
6. TESTOVÁNÍ NA KERAMZITU.....	61
6.1 TESTOVÁNÍ OSVĚTLENÍ	61
6.2 TESTOVÁNÍ DETEKCE ČÁSTIC	62
6.3 DETEKCE POČTU ČÁSTIC NA INDIVIDUÁLNÍCH SNÍMCÍCH	64
6.4 DETEKCE VELIKOSTI ČÁSTIC NA INDIVIDUÁLNÍCH SNÍMCÍCH	64
6.5 DETEKCE RYCHLOSTI PÁDU ČÁSTIC.....	65
6.5.1 <i>Ověření vypočtené rychlosti</i>	67
6.6 DETEKCE CELKOVÉHO POČTU ČÁSTIC	68
6.6.1 <i>Opětovná detekce min max filtrem</i>	69
6.6.2 <i>Poměrný součet z dílčích počtů částic</i>	69
6.6.3 <i>Validace výsledků</i>	69
6.7 DETEKCE VELIKOSTI ČÁSTIC	70
6.7.1 <i>Validace výsledků</i>	70
6.8 VLIV PRAŠNOSTI.....	73
6.8.1 <i>Usazený prach</i>	73
6.8.2 <i>Prach ve vzorku částic</i>	73
7. ZÁVĚR.....	76
LITERATURA.....	78
SEZNAM PŘÍLOH.....	82

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Průřez prosévacím přístrojem [6]	15
1.2	Doporučená podoba korelačního vzoru	17
2.1	Souvislost strukturního elementu a okolí pixelu v obraze [16]	21
2.2	Aplikace morfologické eroze na obraz [16]	22
2.3	Aplikace morfologické dilatace na obraz [16]	23
2.4	Aplikace morfologického otevření a uzavření na obraz [16]	23
2.5	Watershed – první krok	24
2.6	Watershed – přidání hráze	24
2.7	Watershed – konečný stav	25
2.8	Původní obraz (vlevo), jeho distanční transformace (vpravo) a výsledek watershed algoritmu (dole)	25
2.9	Papriky [22] (vlevo), jejich frekvenční spektrum před (uprostřed) a po provedení FFT shift (vpravo)	26
2.10	Hanningovo okno (vlevo), snímek paprik po jeho aplikaci (uprostřed) a vypočtené frekvenční spektrum (vpravo)	27
2.11	Radialní distorze: bez distorze (vlevo), soudkovitost (uprostřed), poduškovitost (vpravo) [24]	28
3.1	Měřicí stanice: přehledový (vlevo) a boční (vpravo) pohled	29
3.2	Pohled ze strany kamery do měřicí roury	30
3.3	Ilustrační snímek původního měření	32
3.4	Ostření objektivu – optimální nastavení	32
3.5	Snímaná scéna – vlevo před vyrovnáním bílé, vpravo po vyrovnání bílé	33
3.6	Padající plastové kuličky měřicí rourou – před (vlevo) a po (vpravo) optimalizaci nastavení	34
4.1	Ukázkové snímky – bez a s padajícími kuličkami	35
4.2	Výsledek odstranění pozadí	36
4.3	Binarizace – pevná hranice (vlevo) a Gaussian metoda (vpravo)	37
4.4	Segmentace – pevná hranice (vlevo) a Gaussian metoda (vpravo)	37
4.5	Segmentace barviva – pevná hranice (vlevo) a Gaussian metoda (vpravo)	38
4.6	Výstup předzpracování	38
4.7	Nalezené kontury	39
4.8	Jádra a pozadí částic	40
4.9	Nalezené kuličky	41
4.10	Padající kuličky z elektromagnetických dvířek	41
4.11	Kuličky po předzpracování	42
4.12	Nalezené kontury v proporcčně prahované distanční transformaci (vlevo) a výsledek segmentace (vpravo)	42
4.13	Nalezené kontury v pevně prahované distanční transformaci (vlevo) a výsledek segmentace (vpravo)	43
4.14	Odraz světelného paprsku	44
4.15	Osvětlení metodou temného pole [29]	44
4.16	Kamera s osazeným objektivovým osvětlením (vlevo) a zachycený snímek kamerou (vpravo)	45
4.17	Osvětlení scény LED žárovkou a stavebním světlem	46
4.18	Padající kuličky – osvětlení ze strany kamery bez (vlevo) a s potlačením stínů (vpravo)	46
4.19	Padající kuličky – osvětlení z boku	47
5.1	Vstupní snímky – scéna bez a s kuličkami	49
5.2	Saturation složka – scéna bez (vlevo) a s kuličkami (vpravo)	50
5.3	Aplikace masky – šedotónový (vlevo) a barevný snímek (vpravo)	50

5.4	Snímek po aplikaci filtru typu horní propust (vlevo) a z něj detekované hrany (vpravo)	51
5.5	Výsledek floodFill funkce	52
5.6	Lokální obrazová maxima	52
5.7	Lokální obrazová maxima vykreslená na nalezených oblastech	53
5.8	Výsledek dělení oblastí	54
5.9	Výsledek watershed algoritmu – vizualizace přes šedotónový obraz (vlevo) a přes černé pozadí (vpravo).....	55
5.10	Opsaná kružnice správně (vlevo) a chybně (vpravo) segmentované oblasti	56
5.11	Výsledný graf velikosti poloměru kuliček	57
5.12	Kalibrační šachovnice: vstup a detekované rohy	57
5.13	Počet pixelů – přední (levý), zadní (pravý) a střední (spodní) část měřicí roury	58
5.14	Přepážka s LED pásky (vlevo) a pohled od kamery (vpravo)	59
5.15	Odlesky na měřicí rouře – před (vlevo) a po přesunu (vpravo).....	60
6.1	Padající keramzit – před (vlevo) a po (vpravo) úpravě osvětlení	61
6.2	Osvětlení na měřicím stanovišti	62
6.3	Vstupní snímek zrn keramzitu.....	63
6.4	Zrna keramzitu – saturation složka (vlevo) a šedotónová reprezentace (vpravo).....	63
6.5	Velikost částic – opsaná kružnice.....	64
6.6	Velikost částic – strany opsaného obdélníku.....	65
6.7	Velikost částic – vedlejší (vlevo) a hlavní (vpravo) osa opsané elipsy	65
6.8	Graf rychlosti pádu částic s odlehlým bodem	66
6.9	Graf rychlosti pádu částic po odstranění odlehlých bodů.....	67
6.10	Graf vypočtené a změřené rychlosti částic	68
6.11	Mrak letících částic – předzpracovaný (vlevo) a původní (vpravo) (rotace o -90°)	69
6.12	Výsledky určení velikosti částic: 5 – 6,3 mm (vlevo) a 7,1 – 8 mm (vpravo).....	72
6.13	Příklad histogramu velikosti částic: 5 – 6,3 mm (vlevo) a 7,1 – 8 mm (vpravo)	72
6.14	Prašnost 5 – 6,3 mm: 2,5 g (vlevo) a 5 g (vpravo) prachu	74
6.15	Prašnost 5 – 6,3 mm: 7,5 g prachu	74
6.16	Počet částic 5 – 6,3 mm: 2,5 g (vlevo), 5 g (uprostřed) a 7,5 g (vpravo) prachu	75

SEZNAM TABULEK

5.1	Přepočet pixelů na milimetry	59
6.1	Parametry napájení použitých světel	62
6.2	Srovnání počtu detekovaných částic různými metodami	70

ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá provedením granulometrické analýzy vzorků částic optickými metodami. Granulometrie zkoumá vlastnosti částic materiálů a materiálových směsí, jakými jsou např. tvar, velikost, povrchová textura a další. [1] V zadání je uvedeno, že z těchto různých parametrů, které lze pro jednotlivé částice rozlišit, má být v první řadě určena velikost jednotlivých částic. Z ní je totiž možné odvodit například zastoupení několika složek ve směsi s různou hrubostí zrn. Oproti klasickým metodám, které využívají rozdílných mechanických vlastností částic, na jejichž základě usuzují o jejich velikosti, bude v této práci pro analýzu využito pouze principů počítačového vidění.

Problematika diplomové práce je ztížena způsobem, jakým jsou částice snímány. Částice vypadávají ze zásobníku s elektromagnetickými dvířky přímo do průhledného měřicího tubusu, kterým jsou vedeny do akumulární nádoby na jejím druhém konci. Měřicí tubus je uchycen vertikálně, tedy částice jím letí definovanou rychlostí vlivem tíhové síly. Právě v průběhu jejich pádu má docházet ke snímání, přičemž doba letu je natolik krátká, že je zapotřebí použít vysokorychlostní kameru. To zvyšuje nároky na osvětlení scény. Kvůli popsanému způsobu vypouštění částic ze zásobníku dochází v průběhu letu tubusem k jejich častým překryvům. Částice tak spíše než v menších skupinách padají ve velkém kompaktním shluku. Hranice částic jsou tak mnohdy i lidským okem jen s obtížemi rozlišitelné. Překryvy velkou měrou komplikují granulometrickou analýzu, kdy je nejdříve zapotřebí ve shluku algoritmicky lokalizovat jednotlivé částice a určit jejich hranice. Až potom lze přistoupit k určování jejich velikosti, případně dalších parametrů. Zadání práce nevyžaduje fungování algoritmů přímo na snímcích přicházejících z vysokorychlostní kamery dle její snímkovací frekvence. Je tedy možné snímky nejdříve zachytit a uložit, a až poté zpracovávat a získat výsledky.

Řešení zadané problematiky vychází z provedené literární rešerše granulometrických metod v kapitole 1. Na ní navazuje kapitola 2, ve které jsou shrnuty užitečné algoritmy počítačového vidění, které jsou aplikovány v pozdějších fázích práce. V kapitole 3 je popsán hardware, který sloužil jako výchozí bod pro provádění měření a jehož části související se snímáním kamerou byly modifikovány. V této kapitole je také provedeno úvodní nastavení kamery (viz kapitola 3.2) a snímky pořízené s tímto nastavením jsou srovnány z původními snímky převzatými společně s měřicím pracovištěm. Kapitoly 4 a 5 popisují již samotné praktické provádění detekce velikosti padajících částic. Je v nich popsáno několik způsobů detekce částic, ze kterých postupnými optimalizacemi vznikla finální verze algoritmu schopná pracovat na datech s překrývajícími se částicemi. V rámci těchto kapitol jsou také popsány hardwarové změny, které bylo nutné provést na měřicím pracovišti, aby byla detekce částic možná. Způsob určení rychlosti pádu a počtu částic ve vzorku je popsán v kapitole 6. Zde je také provedena validace vytvořeného algoritmu na vzorcích keramzitu a prověřen vliv prašnosti na kvalitu detekce.

1. GRANULOMETRIE

Granulometrie je vědní disciplína zabývající se určováním různých vlastností částic materiálů buď v čistých materiálech, nebo v materiálových směsích. Mezi zkoumané vlastnosti se řadí tvar, povrchová textura, velikost či rozložení velikosti. [1] Z nich je možné dále například určovat poměrné zastoupení různých složek ve směsi. Sledované materiály mohou být součástí jednoho pevného celku (např. určení množství šterku v betonovém kvádru), nebo se může jednat o soubor jednotlivých pevných částech (např. určení poměru jednotlivých složek pro výrobu betonu). V granulometrii lze rozlišit dva směry: geologický a průmyslový. [1]

V geologii je částicová analýza (particle analysis) používaná na přirozeně vzniklé sedimenty, jako je hlína, jíl, písek a další. Pro vědce je zde důležité nejenom samotné určení složení zkoumaného vzorku, ale jeho prostřednictvím také zjištění, odkud například daný vzorek přesně pochází, z jakého je geologického období, jaké je jeho stáří. [2] Dále analýza zeminy nachází uplatnění prakticky na počátku všech velkých stavebních projektů, kde je důležité určit vlastnosti půdy a hornin, které se mají stát podloží základů budov a jiných rozsáhlých inženýrských staveb [3]. Pro průmyslové využití jsou analyzovány uměle vytvořené směsi prvků. Granulometrické principy se uplatňují všude tam, kde složení směsi (prášku) ovlivňuje finální vlastnosti produktu, který je z této směsi vyroben. Jedná se hlavně o farmaceutický průmysl, stavebnictví, biomedicínu, hutnictví, ale i mnohé další. [1]

1.1 Měřitelné parametry

Nejdůležitějším parametrem, který lze u nehomogenních materiálů sledovat, je velikost částice [4]. Její určení není problém u materiálů s částicemi, které mají pravidelný tvar. V takovém případě lze určit jeden konkrétní rozměr, který jednoznačně určuje velikost dané částice a je možné jej opakovaně pro všechny částice změřit. Tvarem s takovými vlastnostmi je například koule. Pro určité tvary je nutné definovat více než jeden rozměr, aby bylo rozhodnutí jednoznačné. Takovým tvarem je například kužel, u kterého je zapotřebí změřit průměr podstavy a jeho výšku. [1]

Pokud ale mají částice nehomogenní tvar, je takovéto měření nesprávné, neboť existuje teoreticky nekonečně mnoho rozměrů, které na dané částici lze naměřit a žádný z nich samostatně neposkytuje úplnou informaci o velikosti částice. Zavádí se proto jiné způsoby, jakými se velikost částic srovnává. Lze ji vztáhnout například k objemu; pak se jako průměr částice rozumí průměr koule, která má stejný objem jako částice [1]. Všeobecně je také uznáván způsob, kdy měřený parametr rozhodující o velikosti částice odráží požadovanou vlastnost, která je velikostí částice ovlivněna. Tedy například u barevných pigmentů je jako velikost interpretován jejich povrch, protože ten ovlivňuje výslednou kryvost nátěru. [1] Od velikosti je odvozena distribuce velikosti částic, která

má vliv na určení vlastností materiálu vystaveným toku tekutin, gravitačnímu či jinému významnému silovému působení [2].

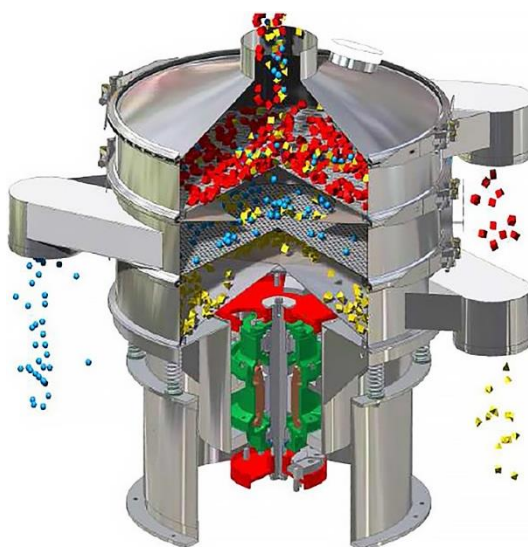
1.2 Mechanické metody

Mechanické granulometrické metody jsou dodnes často využívány. Fungují na principu rozdílných fyzikálních vlastností částic. Separují je díky rozdílné velikosti nebo hmotnosti. Ač je k jejich provedení často potřeba pouze jednoduchého a levného vybavení, nesou s sebou řadu nevýhod. Bývají pracnější, pomalejší, energeticky náročnější, mohou způsobovat vibrace či jiné znečištění. V určitých případech mohou mít na měřený materiál destruktivní účinky. Věrnost výsledků realitě je závislá nejenom na kvalitě provedení, ale i na volbě dostatečně vypovídajícího vzorku z materiálového celku. [1]

1.2.1 Metoda přesívání

Nejstarší, jednoduchou, ale dosud často využívanou granulometrickou metodou je přesívání materiálu. Slouží k určení distribuční funkce velikosti částic. [5] Princip metody spočívá v tom, že směs s různou velikostí částic je umístěna na síto, které má známou velikost ok. Oka mají většinou čtvercový tvar a jsou tvořena hustou sítí křížem tažených drátků. Se sítem, případně s částicemi, je manipulováno takovým způsobem, aby všechny částice, které sítem o dané velikosti ok mohou propadnou, jím propadly. Manipulace se provádí po předem stanovený a vždy stejný čas. Aby se urychlil proces přesívání, lze nad sebe umístit víc sít s oky o různé velikosti seřazených podle velikosti sestupně. K dispozici jsou standardizované soupravy sít s přesnou velikostí, časté je odstupňování o $\sqrt{2}$. Měřicí síta se dělí dle velikosti do 3 skupin: hrubá (4 mm až 100 mm), střední (0,2 mm až 4 mm) a jemná (méně než 0,2 mm). Dostupná jsou síta až o velikosti 5 μm , ovšem jejich tolerance $\pm 2 \mu\text{m}$ jsou již natolik nezanedbatelné, že to značně limituje jejich validní použití. [1]

Průřez prosévacím přístrojem je na obrázku 1.1. Otvorem v horní části je sypána do přístroje směs o různé velikosti částic (ilustrováno různou barvou, seřazeno dle velikosti části sestupně: červená, modrá, žlutá). Dále jsou na obrázku viditelná tři různě hrubá síta a ve spodní části se nachází vibrační motor. Samotné přesívání tedy probíhá tak, že na horní síto padá vzorek částic materiálu. Celá soustava sít poté podléhá definovanému pohybu po určitou dobu, při němž každé síto zachytává ty částice, které již přes otvory v něm kvůli velikosti nepropadly. Tyto z přístroje vypadávají přes otvory v bočním plášti. Množství částic z každého síta je nutné přesně stanovit (např. zvážit), čímž získáme informaci o procentuálním zastoupení částic o dané velikosti v testovacím vzorku. [5]



Obrázek 1.1 Průřez prosévacím přístrojem [6]

Ač velmi často používaná, předně kvůli své jednoduchosti a dostupnému vybavení, je tato metoda silně závislá na provedení. Síta je třeba pravidelně kalibrovat, protože dochází k jejich mechanickému opotřebení propadávajícím materiálem. Metoda je závislá ovšem také na prosívaném materiálu. Před aplikací metody se doporučuje ze vzorku odstranit nejjemnější částičky, které se mohou kumulovat a ucpat hlavně menší síta. Výsledky závisí na množství materiálu, kdy neplatí, že čím více materiálu máme, tím lepší výsledky dostaneme. Může totiž nastat situace, kdy příliš mnoho materiálu zneprůchodní některé ze sít, a tak na něm budou zachyceny i takové částice, které by jím za normálních okolností měly bez problému propadnout. K dostání jsou vibrační přístroje se síty, které eliminují ovlivnění výsledků provedením ručního prosetí. Výsledky metody jsou proto opakovatelné. [5] Mezi další nevýhody patří velká energetická náročnost metody přesívání. Vysoká je nejenom spotřeba vody potřebná pro úvodní propláchnutí prosívaného materiálu, ale také spotřeba elektrické energie při použití automatických vibračních sít. V neposlední řadě se jedná o velmi prašnou metodu, takže následný úklid obsluhy zabere nezanedbatelný čas. [7]

1.2.2 Sedimentační metody

Sedimentační metody tvoří velkou a významnou skupinu mechanických metod určení distribuční funkce velikosti částic v roztoku. Jsou založeny na zkoumání chování usazujících se částice v teoreticky nekonečném sloupci kapaliny. Experimentálně totiž byl určen vztah mezi rychlostí usazování a průměrem částice (tzv. Stokesova rovnice), jehož prostřednictvím lze určit tzv. Stokesův průměr částice, který je pro homogenní kulovité částice roven jejich geometrickému průměru. Existuje mnoho principů provedení sedimentačních metod, např. homogenní inkrementální, homogenní kumulativní, liniová inkrementální atd. Lze například periodicky určovat koncentraci částic v roztoku v dané hloubce ve vodním sloupci. Z těchto principů jsou dále odvozeny jednotlivé metody

provedení. Jejich společným znakem je to, že při nich částice klesají kapalinou, z čehož je dále vyvozována distribuční funkce velikosti částic. [1]

1.3 Optické metody

S rozvojem a zdokonalováním snímací techniky bylo umožněno vytvoření prakticky nového granulometrického proudu. K optické analýze se využívá známých technik počítačového vidění tak, aby bylo dosaženo kýženého výsledku. S optickými metodami se lze často setkat v průmyslu, kde jsou nároky na rychlost a autonomnost metody mnohem vyšší. [2]

1.3.1 Dynamický rozptyl světla

Metoda známá pod anglickou zkratkou DLS (dynamic light scattering), případně PCS (photon correlation spectroscopy) je měřicí metoda vhodná pro analýzu molekul o velikosti od nanometrů po jednotky mikrometrů. [8] Využívá kombinace dvou principů: Brownova pohybu a odrazu světelného paprsku. Pokud se v kapalném médiu nachází volně rozptýlené částice nějaké látky, neustále dochází ke kolizím molekul média a molekul látky. Tím vzniká Brownův pohyb, který má formu neustálého náhodného pohybu pevných částic v kapalině, která je sama v klidu. [8] Dále, pokud monochromatický paprsek světla v letu narazí na makromolekuly nějakého materiálu, dojde k rozptylu světelného paprsku do všech směrů v prostoru. Tento rozptyl je závislý na tvaru a velikosti částice, která ho způsobila. [9]

V nejjednodušším případě obsahuje experimentální aparatura pro DLS metodu laser, detektor odraženého světla a samotnou měřicí trubici. Laser slouží jako zdroj monochromatického polarizovaného světla. Je namířen do měřicí trubice, kde se v kapalině nachází částice měřené látky a kde tedy dochází k Brownovu pohybu. Detektor je uchycen v určitém neměnném úhlu a skrz díрку (pinhole) detekuje dopadající fotony. [8] Intenzita odraženého světla, které dopadne v určitý moment na detektor, je závislá na počtu částic, které se nacházely v dráze fotonů a které tedy způsobily odraz světla z přímé dráhy letu. Tedy intenzita detekovaného světla závisí na okamžité pozici částic rozptýlených v kapalině. Tyto částice jsou ale vystaveny Brownovu pohybu, a tedy jejich pozice se v čase neustále mění. Tím pádem i množství odraženého světla do detektoru se v čase neustále mění. [10]

Dále lze rozlišit, jaké časové změny způsobí částice určité velikosti. Malé částice, jejichž hmotnost je vzhledem k hmotnosti molekul použité kapaliny relativně nízká a které jsou tudíž srážkami s molekulami kapaliny silně ovlivněny, mění svou pozici náhle a rychle, a tudíž i změny v odraženém světle, které svým pohybem způsobují, jsou velmi rychlé. Oproti tomu větší, pomalu se pohybující částice, budou způsobovat pomalejší změny. [8] Jelikož je Brownův pohyb náhodný, bude i signál z detektoru stochastický (náhodný). K získání užité složky je tedy zapotřebí počítat autokorelaci signálu v reálném čase. Tímto dojde k určení pohybových anebo rotačních koeficientů odrazu.

Z nich lze aplikací matematických vztahů získat informace o velikosti částic v kapalině, o distribuční funkci velikostí a v některých případech i o jejich tvaru. [10]

Jedná se o velmi rozšířenou měřicí metodu. Je výhodné, že je neinvazivní, tedy že vzorek materiálu před měřením nemusí být nijak speciálně připraven a měřením nedojde k jeho zničení. [8] Jelikož vychází z pohybu molekul, které s teplotou narůstá, je tato metoda závislá na teplotě měřicí kapaliny. Dále závisí i na její viskozitě. [9] Limitace metody spočívají v nemožnosti měřit transparentní částičky, které dostatečně neodráží laserový paprsek. Metoda předpokládá, že jeden foton interaguje vždy jen s jednou měřenou molekulou, která způsobí jeho odraz. Pokud tedy foton interaguje před dopadem na detektor s více než jednou molekulou, vede to ke zkreslení výsledků metody. Nelze tedy přesně měřit kapaliny, ve kterých jsou měřené molekuly ve vysokých koncentracích. Rovněž nelze rozlišit pro částice, které formují větší shluky, zda se jedná o samostatnou velkou částici, anebo právě o skupinu menších. Ze samotného principu metody pak vychází, že není vhodná pro makroskopické částičky (např. štěrk). [9]

1.3.2 Cross-korelační metoda

Pro detekci částic se známým tvarem ve vstupním obraze lze využít metodu cross-korelace. Jedná se o nástroj k hledání vzorů (template matching algoritmus) ve vstupním obraze. Máme-li k dispozici řadu hledaných tvarů s postupně se měnící velikostí, můžeme vypočtením cross-korelace s každým tímto vzorem získat míru podobnosti pro daný pixel v obraze. Tudíž například pro analýzu kruhových částic je zapotřebí několik kruhových vzorů o různém odstupňovaném průměru. Je vhodné použít vzory s podobou zobrazenou na obrázku 1.2. Černé pixely mají zápornou hodnotu, šedé pixely jsou nulové a bílé pixely jsou kladné. Poloměr vnitřního a vnějšího kruhu, tvořícího bílé mezikruží, je zvolen tak, aby si byl počet černých a bílých pixelů zhruba roven. [11]



Obrázek 1.2 Doporučená podoba korelačního vzoru

Zjištěním indexu maximálního korelačního koeficientu přes všechny pixely vstupního obrazu lze zjistit, jaká velikost hledaného tvaru vedla k nejvyšší korelační odezvě. To znamená, který vstupní vzor je určité částici na vstupním obraze nejpodobnější. Podle známé velikosti vzoru přímo získáme informaci o velikosti dané částice na obraze. Aby se předešlo závislosti korelačních koeficientů na intenzitě pixelů vstupního obrazu, lze místo klasické cross-korelace počítat její normalizovanou variantu. Ovšem detekce

částečně se překrývající částic je značně problematická. Lze ji realizovat tak, že pokud se extrém, který reprezentuje hledaný objekt, překrývá s jiným extrémem o vyšší hodnotě korelačního koeficientu alespoň o x %, kde x je uživatelsky definovaná proměnná, dojde k jeho zahození. Tím se ale do měření vnáší chyba. [11]

1.3.3 Vlnková metoda

Základem metody je aplikace Haarovy vlnkové (wavelet) transformace na snímek zachycující zkoumané částice. Haarova transformace je kombinací zmenšování obrazu a aproximací. Vstupní obraz je zmenšen na polovinu, dále je zjištěna řádková, sloupcová a diagonální aproximace. Tyto odpovídají zvýraznění horizontálních, vertikálních a diagonálních detailů. [3] Nižšího (hlubšího) patra lze dosáhnout aplikací stejného algoritmu na zmenšeninu obrazu, čímž dojde k dalšímu vnoření. Z každého patra lze inverzními operacemi dosáhnout opět původního snímku. Vlnková transformace zachovává energii obsaženou v obraze, přičemž celkovou energii pro dané patro lze získat prostým součtem energií horizontální, diagonální a vertikální aproximace. Energie těchto aproximací se určí jako geometrický součet jednotlivých koeficientů v aproximovaném obraze pro daný směr detailů. [12]

V tomto případě by ale platilo, že čím vyšší úroveň transformace, tím vyšší by byla i energie v ní obsažená. Hodnoty je tedy zapotřebí normalizovat. [3] Toho lze dosáhnout například tak, že hodnota energie aproximací směrových detailů je podělena energií souhrnné aproximace [12]. Výsledkem je normalizovaný energetický poměr, který lze dále přepočítat na „vlnkový energetický index“ vypočtením váženého průměru normalizovaných energetických poměrů pro jednotlivá patra vlnkové transformace. Získané číslo již přímo reflektuje zastoupení částic dané velikosti v testovaném celku. [3] Je však patrné, že hlavní limitací tohoto způsobu je nutnost prvotního utřídění testovacího celku do několika velikostních skupin. Až na nich lze poté vypočítat index popsany v tomto odstavci, a až srovnání těchto indexů pro jednotlivé velikostní skupiny vede ke zjištění požadované distribuční funkce velikosti částic.

1.3.4 Metoda založena na Fourierově transformaci

Metoda využívá aplikace Fourierovy transformace na obraz obsahující částice. Transformace slouží k rozkladu obrazu do jednotlivých frekvenčních složek a je vysvětlena v kapitole 2.3. Všeobecně lze předpokládat, že na obraze s většími částicemi bude ve frekvenční oblasti silnější odezva v nízkých a slabší odezva ve vyšších frekvencích. Pro frekvenční spektrum obrazu s menšími částicemi to bude platit opačně, tedy silnější bude odezva ve vyšších frekvencích. [13] Z komplexního výsledku je nejdříve vypočteno výkonové spektrum obrazu. Tím se získá 2D obraz, kdy intenzita bodů blíže u středu obrazu značí amplitudy nízkých frekvencí a čím dále bod od středu leží, tím vyšší frekvenci odpovídá.

Z výkonového spektra je vypočteno rozložení vlnových délek dle rovnice

$$W(w) = \begin{cases} P(u, v) & \text{pokud } w = 1 + \left\lfloor \frac{r_{max}-1}{\sqrt{(u_0-u)^2+(v_0-v)^2}} \right\rfloor \\ 0 & \text{v ostatních případech} \end{cases} \quad (1.1),$$

kde $P(u,v)$ je amplituda z 2D výkonového spektra na pozici u,v , r_{max} je maximální možný poloměr kruhu ve výkonovém spektru (neboli vzdálenost bodu odpovídajícího nulové frekvenci od okraje obrazu výkonového spektra) a u_0 a v_0 jsou souřadnice bodu odpovídajícího nulové frekvenci ve výkonovém spektru. V posledním kroku je vypočteno kumulativní rozložení vlnových délek dle rekurzivního vztahu

$$C(1) = W(1), \quad C(x) = C(x-1) + W(x) \quad (1.2),$$

Tím vzniknou průběhy, které přímo korelují s distribuční funkcí velikosti zkoumaných částic a s kumulativní distribuční funkcí velikosti částic. [13]

1.3.5 Metoda s morfologickými operacemi

Následující metoda stanovení distribuční funkce velikosti částic vychází z morfologických operací. Jejich principem se zabývá kapitola 2.1. Na vstupu je snímek shluku částic, který může být zpracováván buď v šedotónovém spektru, anebo je nutná jeho binarizace, přičemž v tomto případě má hodnotu 1 pixel příslušící nějaké částici a hodnotu 0 pozadí. Pro binární obraz jsou pak na původní snímek aplikovány operace morfologického otevření s jádry o různé velikosti a shodného tvaru (morfologické otevření viz kapitola 2.1.3). Tedy například jádra budou postupně vybírána z pole obsahujícího kruhové kernely o vzestupném průměru. Pro každý pixel ze vstupního obrazu příslušící k nějaké částici je zaznamenána velikost jádra, která první zapříčinila jeho přechod z 1 na 0. [14]

Zobecnění na šedotónové obrazy je možné tak, že pro každý pixel ze vstupního obrazu je buď zaznamenán součet hodnot na dané souřadnici z obrazů získaných postupnou aplikací jednotlivých morfologických jader v otevření. Nebo je možné pro každý pixel zjistit velikost jádra, pro kterou nastal největší pokles intenzity tohoto pixelu při aplikování morfologického otevření. [14] Pro účely zjištění distribuční funkce velikosti částic slouží ale lépe informace o součtu pixelových intenzit při aplikaci morfologického otevření s jádrem o určité velikosti na vstupní obraz. Vznikne tím funkční závislost mezi intenzitou pixelů a velikostí morfologického jádra. Derivací této funkční závislosti poté vznikne funkce, která koreluje s distribuční funkcí velikosti částic. [15]

Jiná implementace tohoto algoritmu na vstupu opět předpokládá snímek s částicemi, jejichž pixely mají hodnotu 1, a pozadí, jehož pixely mají hodnotu 0. Částice by měly mít podobný tvar. Na počátku je stanoven počet všech objektů, které leží v černém pozadí. Na snímku je poté opakovaně prováděna eroze (viz kapitola 2.1.1) vždy se stejným strukturním elementem až do doby, než na snímku nezůstane žádný objekt (na černém pozadí není žádný bílý pixel). V každé iteraci je určen počet objektů, které z obrazu zmizely oproti stavu v předchozím kroku. Dostaneme tedy funkční závislost mezi počtem

provedených erozí a množstvím eliminovaných objektů na černém pozadí. Počet provedení erozí k odstranění určitého objektu je pak přímo úměrný velikosti tohoto objektu. Zjistíme tedy odhad kumulativní distribuční funkce, ze které lze derivací zjistit odhad distribuční funkce. [16] Z principu je ale patrné, že pro správné provedení této metody je nutné pracovat s již segmentovanými částicemi.

1.3.6 Stínografie

Stínografie (anglicky shadowgraphy) je jedna z nejvyužívanějších optických metod pro analýzu tvaru, velikosti případně rychlosti padajících částic [17]. Využívá se ke zkoumání pohybujících se částíček průhledných či poloprůhledných kapalin a plynů, ale její principy lze aplikovat i na pevné částičky [18]. Jednoduchý stínograf má podobu zdroje světla, které míří přímo do objektivu kamery. Kamera je umístěna v určité vzdálenosti od světelného zdroje. Prostor, který tímto umístěním vznikne, je vyplněn měřicím médiem (typicky vzduchem), kterým padá mezi kamerou a světlem tok měřených částíček. Metoda využívá rozdílných indexů lomu světla měřicího a měřeného materiálu. Světelné paprsky, které s padajícími částíčkami nijak neinteragovaly, proletí měřicí oblastí v původní trajektorii. Paprsky světla, které v měřicí oblasti narazí na částičky měřeného materiálu, se od jeho povrchu odrazí, čímž dojde ke změně jejich trajektorie. Nedopadnou tedy na očekávané místo, kde vlivem těchto odrazů vznikne na snímku tmavé místo. [19]

Výhodou této metody oproti laserově difrakčním (viz kapitola 1.3.1) je odolnost vůči většímu počtu částíček v měřicí oblasti (silnější tok padajících částic) a možnost aplikace i na makroskopické částice. V případě, že je tok částic vyšší u stínografického měření, dochází k vizuálnímu překryvu jednotlivých částic a následně je nutné přistoupit k algoritmické segmentaci. [18]

2. TEORIE ZPRACOVÁNÍ OBRAZU

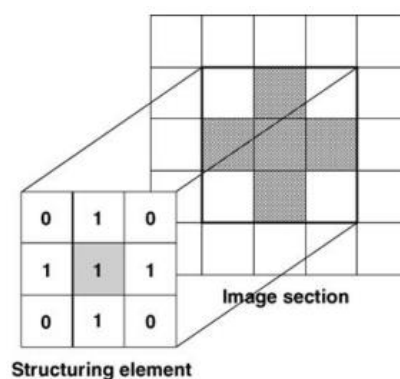
Zadání diplomové práce vede k aplikaci počítačového vidění na popsany problém. V následující kapitole je tedy vysvětleno několik algoritmů a operací z oblasti zpracování obrazu v počítačovém vidění. Ze znalosti teoretických mechanismů fungování popsanych algoritmů pak lze těžit při řešení problematiky ze zadání práce.

2.1 Morfologické operace

Termínem morfologie se rozumí studium struktury a formy. V počítačovém vidění se používá zkoumání morfologie obrazu jako segmentační nástroj, sloužící k extrakci užitečných informací z tvarů částí obrazu. Morfologické operace se primárně používají na binárních obrazech, ale lze je zevšeobecnit i na šedotónové. Dvě základní operace, dilatace a eroze, lze použít buď samostatně, ale své zastoupení mají i operace vzniklé jejich kombinací. Z těchto jde nejčastěji o otevření (opening) a uzavření (closing). [20]

Do morfologické operace vstupuje kromě samotného obrazu (tzv. aktivní obraz) také zvolené morfologické jádro. To bývá označováno také jako strukturní element. Jedná se o čtvercovou matici bodů s hodnotou 1 nebo 0 s výrazně menší velikostí, než je aktivní obraz. Časté bývají např. elementy o velikosti 3x3 nebo 5x5 pixelů. Tato matice je postupně přikládána na pixely aktivního obrazu a dle vykonávané operace jsou zaznamenány výsledky. Ve strukturním elementu je třeba definovat také tzv. centrální pixel, který indikuje místo, kterým má být strukturní element na momentálně vyhodnocovaný pixel aktivního obrazu přikládán. [16] Strukturní element může mít teoreticky libovolný tvar, časté jsou například čtvercové, kruhové či křížové elementy.

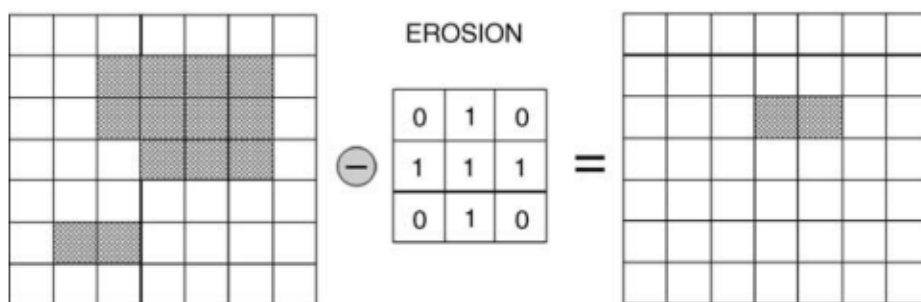
Na obrázku 2.1 lze vidět křížový strukturní element o velikost 3x3 s centrálním pixelem uprostřed obrazce (podbarven šedě). Tento strukturní element je přiložen na obraz, přičemž pro pixel ležící uprostřed zkoumaného okolí (ohrazeného tučně, velikost 3x3), který odpovídá centrálnímu pixelu elementu, jsou analyzovány pouze ty pixely, které pozičně odpovídají pixelům ze strukturního elementu, které mají hodnotu 1. Toto relevantní okolí je na aktivním obrázku zvýrazněno šedou.



Obrázek 2.1 Souvislost strukturního elementu a okolí pixelu v obraze [16]

2.1.1 Eroze

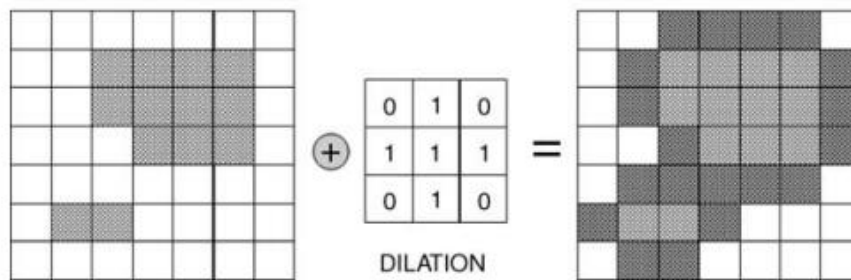
Strukturální element je centrálním pixelem postupně přikládán na jednotlivé pixely aktivního obrazu, které mají hodnotu 1. Hodnota 1 v tomto případě značí, že se jedná o objekt zájmu, nikoliv o pozadí. V případě, že je jakýkoliv pixel z okolí zkoumaného pixelu součástí pozadí (tzn. má hodnotu 0), je i zkoumanému pixelu nastavena hodnota na 0. Pokud jsou všechny pixely z okolí zkoumaného pixelu aktivního obrazu také součástí objektu zájmu (tzn. mají hodnotu 1), pak zkoumanému pixelu zůstává nastavena hodnota 1. [16] Příklad aplikace operace eroze s křížovým strukturálním elementem s centrálním pixelem ležícím uprostřed je na obrázku 2.2. Tmavé pixely mají, oproti zvyklostem, hodnotu 1, zatímco bílé pozadí má hodnotu 0. Jak je z obrázku 2.2 patrné, eroze zmenšuje binární objekty na obraze. Slouží tedy k eliminaci malých objektů na obraze (zanedbatelná velikost, šum) a k rozdělení spojených objektů, které jsou propojeny jen tenkými pixelovými mosty.



Obrázek 2.2 Aplikace morfologické eroze na obraz [16]

2.1.2 Dilatace

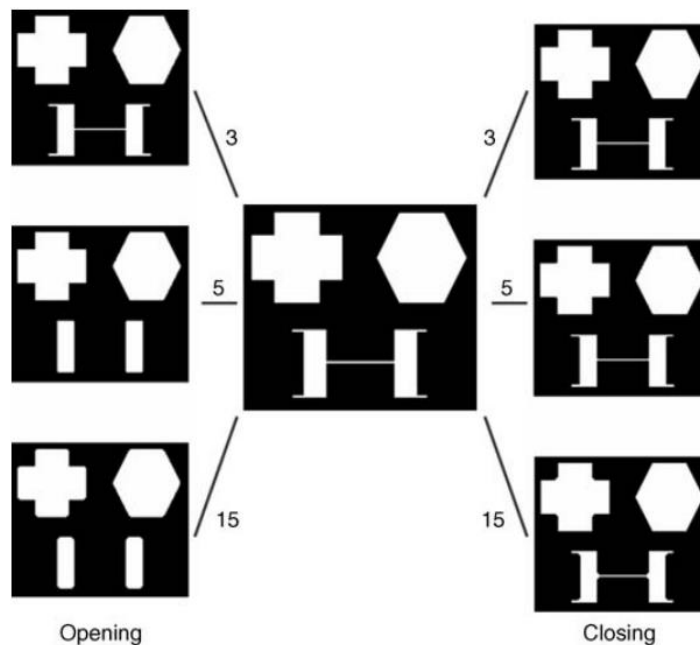
Dilatace je duální, nikoliv inverzní, operace k erozi. To znamená, že z erodovaného obrazu nelze zpětně získat původní obraz dilatací. [16] Neplatí to ani naopak, tedy z dilatovaného obrazu nelze získat původní obraz erozí. Strukturální element je svým středem tentokrát přikládán na pixely, které jsou na aktivním obraze součástí pozadí (mají pixelovou hodnotu 0). Pokud je jakýkoliv pixel z relevantního okolí zkoumaného pixelu součástí objektu zájmu (tzn. má pixelovou hodnotu 1), je i zkoumanému pixelu nastavena hodnota 1. Pokud ovšem všechny pixely z relevantního okolí zkoumaného pixelu jsou rovněž součástí pozadí, hodnota 0 je zkoumanému pixelu zachována. [16] Příklad aplikace dilatace s křížovým strukturálním elementem s centrálním pixelem ležícím uprostřed je na obrázku 2.3. Tmavé pixely mají hodnotu 0, bílé pixely součástí pozadí mají hodnotu 1. Ve výsledku v pravé části jsou tmavší barvou zobrazeny ty pixely, jejichž hodnota byla aplikací strukturálního elementu změněna na hodnotu 1. Mezi dopady dilatace se řadí zvětšování objektů kolem jejich hranic, spojení blízko sebe ležících objektů, případně postupné zaplňování děr v objektech.



Obrázek 2.3 Aplikace morfologické dilatace na obraz [16]

2.1.3 Otevření a uzavření

Operace otevření vznikne aplikací eroze následované dilatací. Uzavřením se označuje operace dilatace následovaná erozí. Ve všech případech se předpokládá využití totožného strukturního elementu. Otevřením dojde k odstranění malých, izolovaných objektů z binárního obrazu jejich přisouzením k pozadí. Dojde k rozdělení jemně se dotýkajících objektů a také k vyhlazení kontur objektů. Uzavřením obrazu dojde k zacelení malých děr v objektech nastavením pixelů pozadí na popředí. Jsou jím také zesíleny existující jemné kontury mezi jednotlivými objekty. [16] Na ilustračním obrázku 2.4 jsou zobrazeny výsledky otevření a uzavření s kruhovým strukturním elementem. Jeho velikost je uvedena u čáry vedoucí od původního snímku ve střední části obrázku k výsledku, tedy použity byly velikosti 3, 5 a 15.

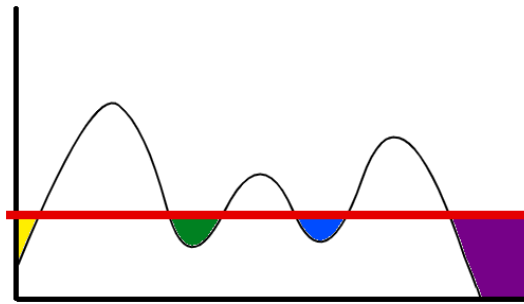


Obrázek 2.4 Aplikace morfologického otevření a uzavření na obraz [16]

2.2 Watershed algoritmus

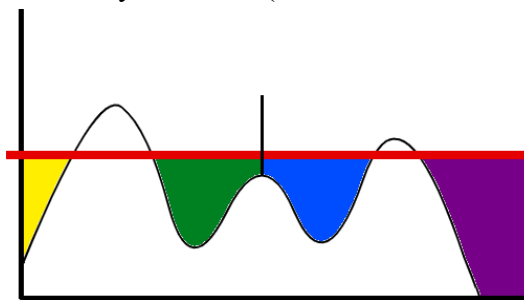
Jedná se o algoritmus používaný k segmentaci dotýkajících se objektů v obraze. V českých zdrojích bývá označován jako algoritmus rozvodí. Šedotónový 2D obraz je interpretován jako reliéf krajiny, kdy je pixelová hodnota na určité x-ové a y-ové souřadnici chápána jako výška virtuálního bodu v krajině. Převodem všech pixelových hodnot tedy z obrazu vznikne topologická mapa reliéfu obrazu. Vrcholy kopců představují nejasné pixely, které stejně dobře mohou patřit jednomu, nebo druhému dotýkajícímu se objektu, zatímco nízká údolí jsou tvořena pixely, o jejichž příslušnosti k jednomu objektu není pochyb. [16]

Takto vytvořená krajina je poté přes vzniklá lokální minima (nížiny) postupně zaplavována vodou. Toto je ilustrováno také na obrázku 2.5. Zobrazuje průřez reliéfem vytvořeným z určitého obrazu (tenká černá čára). Barevně je v lokálních minimech ilustrováno, že do nich vtéká po úroveň tučné červené čáry voda.



Obrázek 2.5 Watershed – první krok

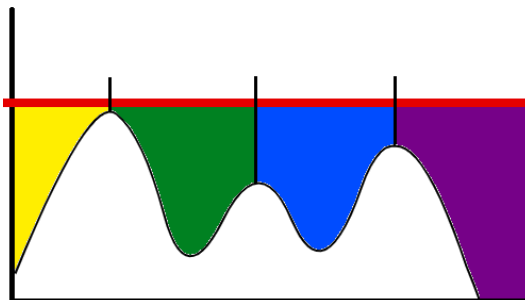
Další krok je na obrázku 2.6. Voda stoupá (což ilustruje posun červené čáry nahoru) a v údolích se postupně tvoří barevně odlišené laguny a formují se vrcholy kopců. Se zvýšením hladiny ale nastala situace, že voda vystoupala tak vysoko, že se slily dvě sousední laguny (zelená a modrá) a tím zanikl i prostřední vrchol. Aby tomu bylo zabráněno, je na místě vrcholu vztyčena hráz (ilustrována černou čarou).



Obrázek 2.6 Watershed – přidání hráze

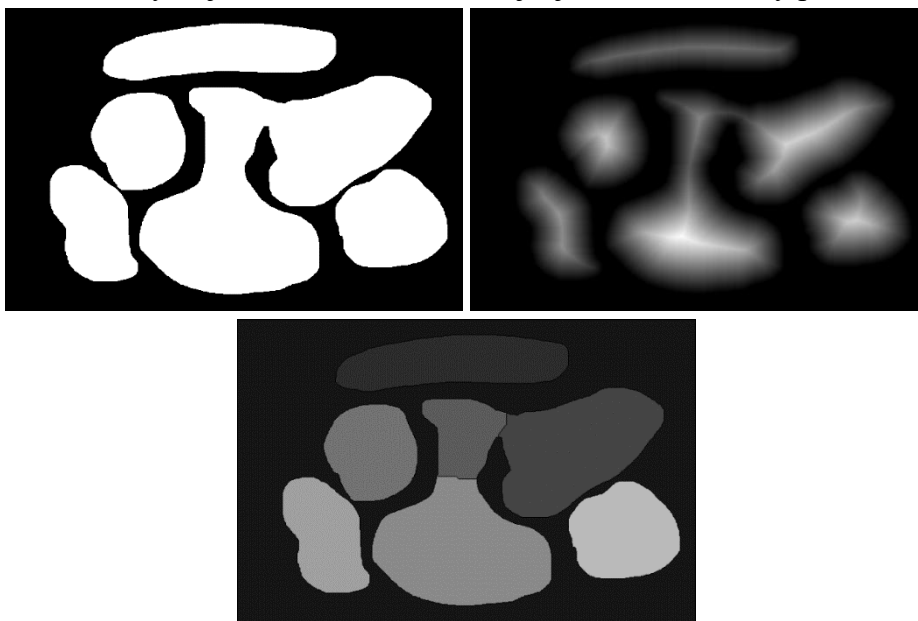
Algoritmus končí, až dojde k zániku posledního vrcholu tyčícího se nad vodní hladinu a dojde ke vztyčení hráze na jeho místě. Výsledkem je několik odlišitelných lagun, které každé ohraničují určitý objekt v původním obraze. Konečný stav je na obrázku 2.7. Zde

je vidět, že všechny pixely (body reliéfu) byly díky vztyčení tří hrází přisouzeny některé ze stoupajících lagun.



Obrázek 2.7 Watershed – konečný stav

Z principu je patrné, že pro využití watershed metody je vhodné na vstupní obraz aplikovat takovou transformaci, která zajistí vytvoření údolí tam, kde je jasná příslušnost pixelů k určitému objektu, a vztyčí vrcholy kopců v oblastech, kde se objekty na původním obraze dotýkají. Takto výhodně lze transformovat jak šedotónový, tak binární obraz. Využívá se výpočet distanční transformace pixelů, kdy každému bílému pixelu je přiřazena taková nová hodnota, která odpovídá vzdálenosti k nejbližšímu černému pixelu u něj ležícímu. Čím vyšší je vzdálenost, tím světlejší je transformovaný pixel.



Obrázek 2.8 Původní obraz (vlevo), jeho distanční transformace (vpravo) a výsledek watershed algoritmu (dole)

Příklad původního obrazu a jeho distanční transformace je na obrázku 2.8 na horních snímcích. Pokud je výstup této transformace vhodně upraven, dosáhne se stavu, kdy čím více je pixel v jádru libovolného objektu, tím tmavší je. Toto odpovídá existenci lokálního minima tvořícího údolí zaplavované oblasti. [16] Výsledek aplikace watershed algoritmu na vstupní snímek je na spodním snímku na obrázku 2.8. Odlíšení jednotlivých nalezených částic je ilustrováno různými odstíny šedi.

2.3 Fourierova transformace obrazu

Fourierova transformace 2D obrazu vychází z jednorozměrné varianty. Nejdříve je spočtena jednorozměrná diskretní Fourierova transformace (DFT) algoritmem rychlé Fourierovy transformace (Fast Fourier Transform, FFT) pro každý řádek obrazu. Každý řádek je nahrazen svou DFT a na takto získaném obraze je vypočtena opět DFT pomocí algoritmu FFT, tentokrát ovšem pro jednotlivé sloupce obrazu. Tím se získají komplexní koeficienty Fourierovy transformace obrazu. Z nich je možné zjistit amplitudové frekvenční spektrum jako modul (velikost) komplexní Fourierovy transformace. Výkonové spektrum se určí jako druhá mocnina modulu komplexní Fourierovy transformace. [21] Na obrázku 2.9 je ilustrační snímek paprik vlevo a uprostřed je zobrazena podoba frekvenčního spektra obrázku paprik. Tento snímek představuje přítomné frekvence v původním obraze. Uprostřed v obraze leží vysoké frekvence a v rozích jsou nízké frekvence.



Obrázek 2.9 Papriky [22] (vlevo), jejich frekvenční spektrum před (uprostřed) a po provedení FFT shift (vpravo)

Je zvyklostí provést přesun (takzvaný shift) kvadrantů tak, aby platilo, že body blíže světlému středu představují nižší frekvence, zatímco body dále od něj představují vyšší frekvence. Toto zjednodušuje interpretaci a zpracování výsledku Fourierovy transformace. Takto upravené spektrum je na obrázku 2.9 vpravo. Zde je patrný světlý kříž, který vznikl z důvodu, že 2D DFT algoritmus předpokládá periodicitu vstupního obrazu. Kvůli tomu, že okraje původního obrazu paprik nejsou stejné (nenavazují na sebe), bylo potřeba v transformaci použít vysokých frekvencí, aby tyto skokové změny obsáhly. Ve spektru se vyskytuje další kříž natočený oproti hlavnímu svislému kříži. Z něj lze usuzovat o natočení dominantních hran v původním obraze. Svislé kříže ve spektru zde odpovídají vodorovným hranám a naopak. [21]

Primární kříž lze potlačit aplikací okna na vstupní obraz. Na obrázku 2.10 vlevo je vizualizováno Hanningovo okno. Ve středu obrázku má okno hodnotu 1. Čím dále se nachází bod od středu okna, tím jeho hodnota klesá až na 0, která se nachází kolem obrysů obrázku. Pokud původní snímek (viz obrázek 2.9) vynásobíme takovýmto oknem, dostaneme obraz, který má ve středu původní jas a s rostoucí vzdáleností od středu jeho pixelový jas klesá. Tím získáme tmavou oblast kolem hran obrazu, jak je vidět uprostřed

na obrázku 2.10. Počítáme-li Fourierovu transformaci takto upraveného obrazu, dosáhneme potlačení primárního kříže, výsledek viz obrázek 2.10 vpravo.

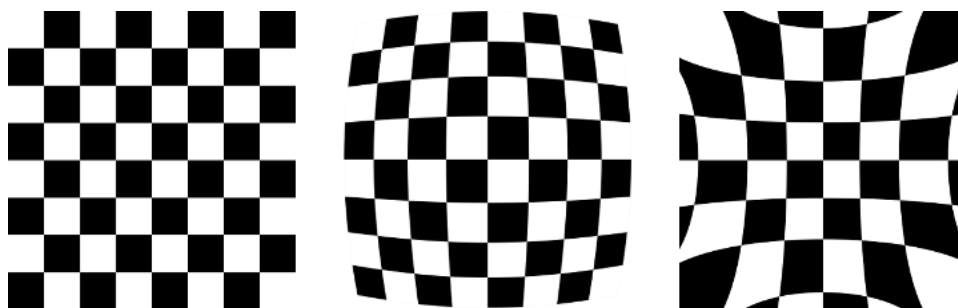


Obrázek 2.10 Hanningovo okno (vlevo), snímek paprik po jeho aplikaci (uprostřed) a vypočtené frekvenční spektrum (vpravo)

Využití obrazová Fourierova transformace nalézá například při zjišťování natočení rysů obrazu. Takovými rysy mohou být například řádky textu naskenovaného dokumentu, kdy prostřednictvím Fourierovy transformace by bylo možné určit, zda byl dokument do skeneru umístěn rovně. Dále lze transformaci využít například k filtraci obrazu. Metody vychází ze znalosti, že hrany (představující skokovou změnu jasové intenzity) budou ve frekvenčním spektru zaujímat vyšší frekvence. Výhodou filtrace ve frekvenční oblasti je nižší výpočetní náročnost, neboť operaci konvoluce v prostorové oblasti odpovídá operace násobení ve frekvenční oblasti. [21] Tedy například odstranění šumu Gaussovým filtrem je možné ve frekvenční oblasti provést násobením frekvenčního spektra obrazu s filtrem odpovídajícím velikosti spektra obrazu, jehož pixelové hodnoty odpovídají koeficientům Gaussova filtru. Jelikož šum je tvořen skokovou změnou jasu, bude z obrazu odstraněn (společně s určitým množstvím validních detailů) právě potlačením vyšší frekvencí pomocí Gaussova jádra.

2.4 Kalibrace kamery

Obraz z kamery bývá zatížen zkreslením, které vede ke ztrátě přesné geometrie v obraze. Hlavní složka zkreslení se nazývá radiální. Je zapříčiněna kulovitostí objektivu, je tedy platná pro konkrétní kombinaci senzoru a objektivu. Rozlišují se dva hlavní typy radiálního zkreslení, a to soudkovitost (barrel distortion) a poduškovitost (pincushion distortion). [23] Obě tato zkreslení jsou na obrázku 2.11.



Obrázek 2.11 Radialní distorze: bez distorze (vlevo), soudkovitost (uprostřed), poduškovitost (vpravo) [24]

Matematicky lze radiální zkreslení vyjádřit jako

$$(x, y)_{dist} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \cdot (x, y)_{undist} \quad (2.1),$$

kde $(x, y)_{dist}$ jsou souřadnice bodu se zkreslením, $(x, y)_{undist}$ jsou souřadnice bodu bez zkreslení, k_1 , k_2 a k_3 jsou koeficienty radiálního zkreslení a složky r_x a r_y vektoru r lze vypočítat podle vzorce

$$(r_x, r_y) = (x, y)_{undist} - (c_x, c_y) \quad (2.2),$$

kde c_x a c_y značí souřadnice středu projekce (tzv. principal point). [25]

Bude-li na obraze prováděno měření, je zapotřebí tato zkreslení kompenzovat. K tomu je nutné provést nejdříve kalibraci kamery. Existuje více typů kalibračních obrazců, často využívaným je právě šachovnice (viz obrázek 2.11). Na šachovnici zachycené kamerou, která je kalibrována, jsou nalezeny rohy jednotlivých políček. Ze znalosti jejich umístění na ideální šachovnici a na šachovnici zkreslené nasnímáním lze určit vektor distorze

$$v_{dist} = (k_1 \ k_2 \ p_1 \ p_2 \ k_3) \quad (2.3),$$

s koeficienty k_1 , k_2 a k_3 do rovnice (2.1) a koeficienty p_1 , p_2 pro tangenciální zkreslení. Tangenciální zkreslení lze zanedbat, protože má menší vliv na výstupní obraz. Je způsobeno nepřesně vycentrovanými čočkami ve složeném objektivu. [25] Dále lze určit i vnitřní matici kamery

$$M_{cam} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4),$$

kde f_x a f_y je ohnisková vzdálenost a c_x a c_y jsou souřadnice středu projekce do rovnice (2.2). [26] Po provedení kalibrace (určení hledaných koeficientů) lze pak korekci zkreslení v obraze provést křivením obrazové informace, kdy je barvená informace z pixelu na souřadnici se zkreslením mapována na pixel na souřadnici bez zkreslení. [25]

3. SOUČASNÉ ŘEŠENÍ

Prvotní návrh samotného hardwarového řešení pracoviště pro provádění částicové analýzy není produktem této diplomové práce. Přípravek – měřicí pracoviště byl převzat jako celek, v rámci následujících kapitol však budou popsány úpravy, které na něm byly za účelem zlepšení výsledků rozpoznávání padajících částic provedeny. Modifikováno bude primárně osvětlení a umístění kamery. K měřicímu přípravku byl původním autorem vypracován i obslužný software v programovacím prostředí LabVIEW, algoritmus na analýzu padajících částic z něj ale nebyl v této práci použit. Vytvořený program tedy bude na vstupu očekávat vysokorychlostní kamerou nasnímaná data, na kterých provede částicovou analýzu a výsledky dá ve vhodné formě k dispozici původnímu programu. Rovněž bude vytvořen skript na nastavení kamery a nasnímaní dat.

3.1 Hardwarové prvky

Snímek zobrazující celou měřicí stanici je na obrázku 3.1. Zde jsou na pravém snímku očíslovány jeho jednotlivé součásti. Na hliníkovém rámu je uchycen ve známé výšce zásobník na sypký materiál (1), na kterém má být provedena částicová analýza. Zásobník se plní z vrchní strany například pomocí trychtýře. Ze spodní strany je uzavřen jednokřídlými dvířky s přídržným elektromagnetickým systémem (2). Po otevření dvířek padá obsah zásobníku do průhledné roury z plexiskla umístěné přímo pod ním (3), ve které probíhá samotná analýza toku částic. Nachází se zde jednak vlnovod pro mechanické měření (5), a zároveň lze díky průhledné rouře snímat padající částice v definovaném proudu i kamerou (4).



Obrázek 3.1 Měřicí stanice: přehledový (vlevo) a boční (vpravo) pohled

Pracoviště bylo převzato s osazenou kamerou Basler scA640-120gm. Jejím bližším popisem se zabývá kapitola 3.1.1. Na přepážce za rourou je namontován LED panel s difuzním plátem sloužící pro přísvit snímané scény. Osvětlení je blíže popsáno v kapitole 3.1.2. Fixace kamery imbusovými šrouby do žlábků v hliníkovém profilu umožňuje její pohyb ve vertikální ose. Dále lze nastavit výšku zásobníku na materiál a výšku průhledné roury. Modifikací těchto dvou parametrů lze přímo ovlivnit rychlost padajících částic. U spodního ústí měřicí roury se nachází prostor na krabici, pytel, či jinou nádobu, do kterého jsou padající částice zachytávány.

Kvůli vysoké prašnosti měřeného materiálu je dále na hlavní rám přípevněno několik plexiskel, jejichž účelem je jednak ochránit elektroniku před přímým kontaktem s padajícím prachem, ale zároveň také uvolněné drobné částičky usměrnit do míst, ve kterých se nachází sběrná nádoba. Tím lze předejít zbytečným materiálovým ztrátám a znečištění okolí. Náhled na měřicí rouru přes plexiskla je z pohledu kamery ukázaný na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2 Pohled ze strany kamery do měřicí roury

3.1.1 Kamera

Použita byla kamera Basler scA640-120gm. Jedná se o vysokorychlostní kameru umožňující snímání až 122 snímků/s. Při použití ořezu scény je možné snímat ještě rychleji. Rozlišení výstupního obrazu je 659 x 494 pixelů. Senzor je schopen snímat v barevné nebo monochromatické škále. Kamera je napájena napětím v rozsahu od 12 VDC do 24 VDC. Na těle kamery se nachází RJ-45 ethernetový konektor a 12pinový kruhový konektor Hirose. Čas expozice může být nastaven v intervalu od 24 μ s po 10 s. [27] Ethernetové rozhraní slouží kameře pro odesílání nasnímaného obrazu, neboť kamera samotná nedisponuje interním uložištěm pro uložení nahraného záznamu. Součástí 12pinového konektoru jsou zdvojené napájecí piny, 2 vstupní a 4 výstupní piny včetně napájecích. Spuštění nahrávání je možné externí elektronikou spouští (triggerem). Při budoucím nasazení je žádoucí, aby bylo spuštění záznamu obrazu ovládáno stejným signálem, jaký slouží pro ovládání magnetických dvířek zásobníku materiálu.

Ke komunikaci počítače s kamerou slouží oficiální software od firmy Basler pro operační systém Windows 10 s názvem Pylon, který lze po registraci jednoduše nainstalovat z webových stránek výrobce. Obsahuje nejenom drivery ke kameře, ale také mnoho užitečných nástrojů, z nichž byl použit pylon IP Configurator a pylon Viewer. Jejich využití pro účely této diplomové práce je popsáno v kapitole 3.2. Řídit snímání obrazu lze i z programovacích jazyků C# a C++ díky oficiálním knihovnám, dále je také na stránce Github dostupná obdobná knihovna pro Python s názvem pypylon.

Prostřednictvím Ethernetu lze kameru dále nastavit, zejména upravit dobu expozice, zapnout automatické funkce vyrovnání bílé a ovlivnit zisk (gain) senzoru. Nastavení těchto parametrů je provedeno v kapitole 3.2. Doba expozice kamery se nastavuje přes násobící parametr s pevnou časovou základnou. Pro použitou kameru je časová základna 20 μ s a hodnota doby expozice se získá vynásobením časové základny nastavenou proměnnou [27].

3.1.2 Osvětlení

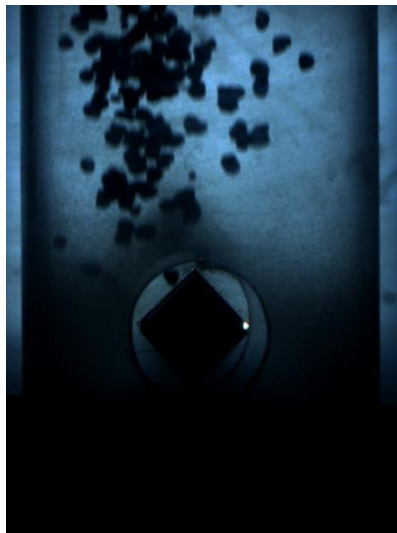
Scéna je osvětlena skupinou elektroluminiscenčních diod tvořících LED panel. Napájen je stejnosměrným 12 V napětím z laboratorního zdroje. LED panel je opatřen plochým difuzním plátem, který slouží k tomu, aby bodový osvit z jednotlivých diod rozptýlil do rovnoměrného světelného čtverce. Na scéně snímané kamerou s tímto osvětlením je dosaženo toho, že pozadí má zhruba jednotnou jasovou intenzitu a nezesnadňuje detekci padajících částic. Intenzitu osvitu snímané scény lze řídit proudem. Samotný LED panel je umístěn přímo proti objektivu kamery na druhé straně měřicí roury. Dosaženo je tak toho, že jsou snímány pouze obrysy padajících částic.

3.2 Úvodní nastavení scény

Po instalaci softwaru pylon byla k počítači připojena kamera ethernetovým kabelem. Nedošlo ale k navázání komunikace. To bylo způsobeno zapnutým firewallem operačního systému, který jakoukoliv komunikace znemožňoval. Pokud tedy chceme na počítači sbírat z kamery data, je nutné mít vypnutý firewall. Kamera se po jeho vypnutí připojila, ovšem komunikace stále neprobíhala. Pomocí nástroje pylon IP Configurator bylo zjištěno, že kamera je sice počítačem detekovatelná, ale měla přidělenou statickou IP adresu mimo podporovaný rozsah síťové karty počítače. Kameře bylo tedy aktivováno dynamické přidělování IP adresy (DHCP), díky čemuž již bylo možné zobrazovat v nástroji pylon Viewer obraz z kamery.

Následně bylo zapotřebí uchytit kameru na hliníkový rám do měřicí pozice. K dispozici byla datová sada snímků z původních měření, dle kterých bylo možné kameru umístit na její původní místo. Ilustrační snímek z těchto datasetů je na obrázku 3.3. Je na něm patrných několik vizuálních nedostatků. Předně je scéna silně zbarvená do modra a jsou patrná tmavá místa po stranách měřicí roury a ve spodní části kolem vlnovodu. To bylo pravděpodobně způsobeno nedostatečným osvětlením vzhledem k požadované

krátké expoziční době kamery, ale zároveň snaze potlačit na snímku přsvětlená bílá místa bez relevantní obrazové informace. Patrné rozostřené hranice padajících částic mohou mít různé původce. Buď při kompromisu slabého osvětlení a doby expozice snímků byla nastavená nedostatečná expoziční doba vzhledem k vysoké rychlosti pádu, anebo byl objektiv špatně zaostřen.



Obrázek 3.3 Ilustrační snímek původního měření

Po uchycení kamery bylo nejdříve nastaveno zaostření objektivu. Do měřicího tubusu bylo umístěno pravítko tak, aby jeho začátek byl opřen o přední stěnu (na straně kamery) a jeho konec o protilehlou stěnu (na straně LED panelu). Ostřicí prstenec objektivu byl pak nastaven tak, aby údaje na pravítku měly co nejostřejší hrany na jeho začátku i konci, reálně je tedy objektiv zaostřen do prostoru středu měřicí roury. Optimální nastavení je na obrázku 3.4. Všechny snímky v této fázi byly pořízeny prostřednictvím softwarového nástroje pylon Viewer.



Obrázek 3.4 Ostření objektivu – optimální nastavení

Dalším krokem bylo softwarové nastavení parametrů senzoru kamery. Pro tento účel byl již vytvořena obslužná aplikace v Pythonu. Realizuje propojení počítače s kamerou, umožňuje nastavení parametrů senzoru a ovládá snímání kamery. Nastavení parametrů senzoru lze provádět buď postupně po jednom, anebo načtením konfiguračního textového souboru kamerou. Prostřednictvím tohoto skriptu se nastavuje počet snímků, které mají být zachyceny. Dále skript převádí data z proprietární datové struktury výrobce do formátu čitelného knihovnou OpenCV. Aby nedocházelo ke zpomalení běhu snímání obrazu, disponuje kamera vyrovnávací pamětí, kterou postupně zaplňuje. A je právě úkolem obslužného programu, aby data z tohoto bufferu dostatečně rychle odebíral, aby nedošlo k jeho přetečení. Proto jsou data postupně z bufferu kamery vyčítána, převedena na OpenCV datové pole a uložena do operační paměti. K uložení snímků dochází až po ukončení sběru dat.

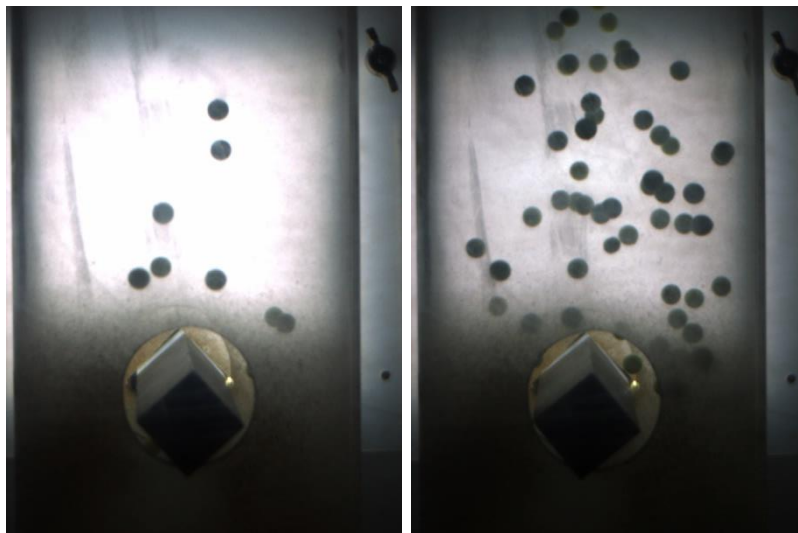
Nejdříve byla zapnuta funkce automatického vyrovnání bílé, srovnání před a po zapnutí jsou na obrázku 3.5. Je viditelné, že zmizelo zabarvení scény do modra. Po nastavení vyrovnání bílé je na pravém snímku ve snímané části stále patrná bílá oblast, ze které senzor neprodukuje relevantní informaci. Nejdříve byl tedy snížen jas LED panelu, aby zde nevznikala oblast s příliš vysokým jasnem. Ovšem toto se ukázalo jako nesprávný postup, protože čím kratší čas expozice je nastaven, tím vyšší jsou nároky na osvětlení scény (chceme, aby za kratší čas dopadlo na senzor kamery stejné množství světla). Došlo tedy k situaci, kdy kamera kvůli nedostatku světla nebyla schopná zachytit žádnou jasovou informaci, i když byla na objektivu nastavena nejnižší clona. Zároveň je ale nutné mít co nejkratší čas expozice, aby byly padající částice zachyceny ostře.



Obrázek 3.5 Snímaná scéna – vlevo před vyrovnáním bílé, vpravo po vyrovnání bílé

Bylo tedy nutné, dříve než jas panelu, nastavit požadovaný čas expozice. Na objektivu byla stále zvolena nejnižší clona. Postupně bylo provedeno několik kontrolních měření pro různé hodnoty násobícího koeficientu expozice (viz kapitola 3.1.1). Rourou padaly

žluté plastové kuličky z dětské kuličkové pistole o průměru 6 mm. Postupně bylo ze stavu, kdy na snímku byly vidět kuličky jen po odraze od vlnovodu a zpomalení, dosaženo stavu, kdy kuličky byly na snímku optimálně viditelné. Takovýto stav ilustruje levý snímek na obrázku 3.6. Postupně byl snižován čas expozice a zvyšována intenzita osvětlení až do doby, než byly obrysy padajících kuliček dobře viditelné. Na konci byl nastaven násobící koeficient na hodnotu 10, tedy doba expozice každého snímku je 200 μ s. Proud osvětlovacím LED panelem byl zhruba 1 A.



Obrázek 3.6 Padající plastové kuličky měřicí rourou – před (vlevo) a po (vpravo) optimalizaci nastavení

V posledním kroku bylo nutné potlačit oblast s příliš vysokým jasem, která je i na levém snímku na obrázku 3.6 stále patrná. Nyní ovšem, když již byla nastavena doba expozice a intenzita osvětlení, bylo možné upravit zisk senzoru na takovou hodnotu, aby tato oblast na snímku nevznikala. Automatické nastavení zisku nepřineslo kýžený výsledek, proto byla jeho hodnota postupně snižována až do stavu, kdy máme obrazovou informaci ze všech relevantních oblastí. Snímek s finálním nastavením parametrů senzoru kamery je na obrázku 3.6 vpravo. Při srovnání tohoto obrázku s původním stavem na obrázku 3.3 je vidět značné rozdíly. Je vyrovnáno množství bílé na snímku, úprava parametru zisku potlačila přepálenou oblast, zároveň jsou ale kontury padajících těles na snímku ostřejší.

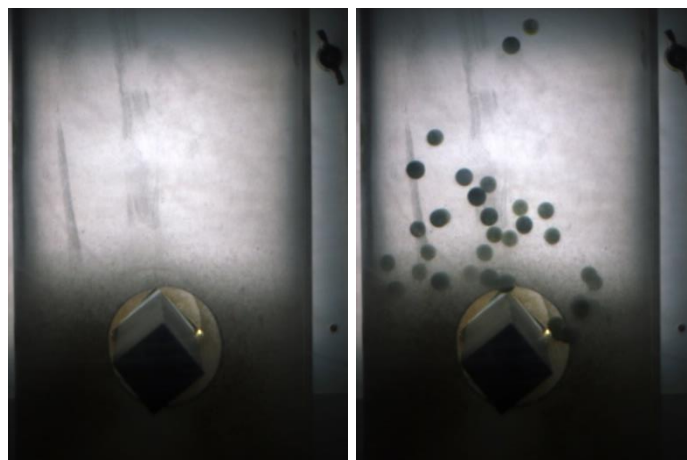
4. ZÁKLADNÍ DETEKCE PADAJÍCÍCH ČÁSTIC

Zadání diplomové práce předpokládá využití principů počítačového vidění ke zjištění velikosti, počtu a rychlosti padajících částic. Proto nepřichází v úvahu žádné mechanické metody popsané v kapitole 1.2, ale pouze ty z kapitoly 1.3. Za předpokladu nejjednodušší možnosti akviziční aparatury, tedy využití světelného zdroje a kamery, bude jejich vhodnou kombinací vytvořen úvodní návrh segmentačního algoritmu, který bude dále umožňovat na nalezených částicích provádět požadovaná měření.

Základní verze softwaru byla vytvořena v programovacím jazyce Python. Tento byl vybrán i z důvodu jednoduché dostupnosti knihoven, kdy existuje například i knihovna pro ovládání použité kamery (viz kapitola 3.1.1). Zadání diplomové práce sice přímo nepožaduje využití volně šiřitelných knihoven pod licencí opensource, z praktických důvodů k tomu ale bylo přistoupeno. Pro funkce počítačového vidění byla použita knihovna OpenCV kvůli jejímu vysokému zastoupení v aplikacích počítačového vidění. Výhodou je také dobrá dokumentace celé knihovny a existence překladů do jazyků C# a C++, které mohou být benefiční při budoucí optimalizaci kódu na výkon. V následující kapitole budou blíže popsány možné algoritmy, které lze použít v procesu segmentace částic pro účely následného měření.

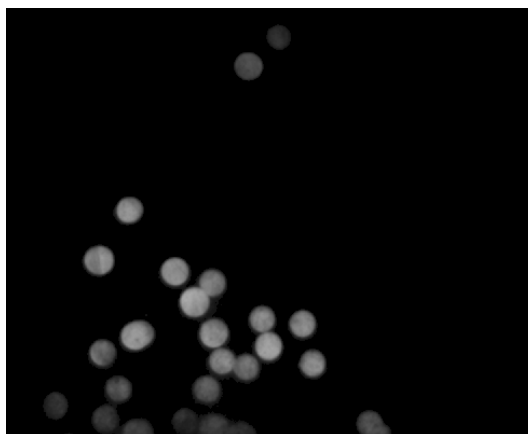
4.1 První verze algoritmu

Po provedení nastavení kamery dle postupu v kapitole 3.2 bylo možné zahájit zkušební měření padajících částic. Jako testovací materiál sloužila náhradní náplň do dětské kuličkové pistole. Jednalo se o kuličky neonově žluté barvy o průměru 6 mm. Začátek snímání kamery byl spouštěn ručně a kuličky byly sypány přímo do měřicí roury, tedy bez využití zásobníku s elektromagnetickými dvířky. Ukázkové snímky zaznamenaných dat jsou na obrázku 4.1. Bylo možné nastavit počet snímků, které se mají zaznamenat. Zvoleno bylo 200 snímků.



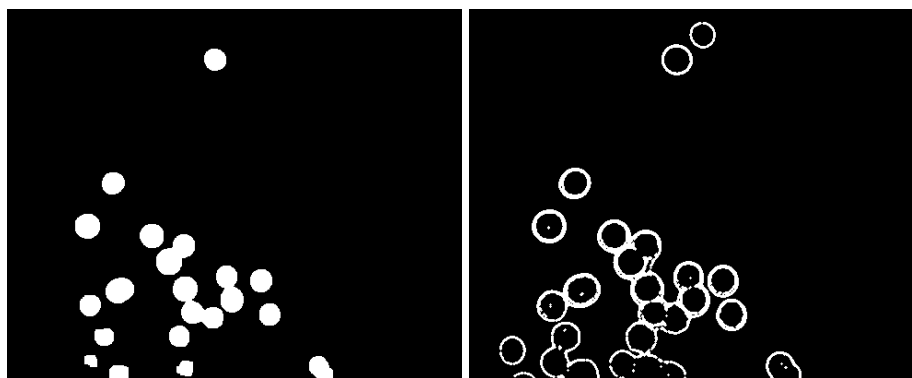
Obrázek 4.1 Ukázkové snímky – bez a s padajícími kuličkami

Z disku byla poté data načtena do prostředí Jupyter Notebook, který díky rozdělení kódu do samostatně spustitelných bloků umožňuje jednoduché prototypování. Barevné obrázky byly přímo převedeny do šedotónových a byly oříznuty na velikost 400 řádků, čímž byla odstraněna spodní část snímků, kde již není dostatek světla k detekci a kde se nachází hranol pro vibrační měření. Dále jsou snímky otočeny o 90° v kladném směru, neboť kamera je takto uchycena na rámu s násypkou. Díky prodlevě, která vzniká mezi spuštěním snímání a průletem první kuličky snímací oblastí kamery je několik prvních snímků bez kuliček. Tento fakt umožnil jednoduché odstranění pozadí snímku, jelikož se předpokládá, že se díky krátké době celého snímání okolní scéna nebude měnit. Výsledkem odečtení snímku bez kuliček od snímku s padajícími kuličkami je obraz, který obsahuje pouze kuličky (viz obrázek 4.2). Snímek byl prahován takovým způsobem, že hodnoty jasových změn menší než 20 byly nastaveny na 0, neboť je pravděpodobné že takto malé změny jsou způsobeny například šumem v obrazu a nenesou užitečnou informaci o padajících částicích.



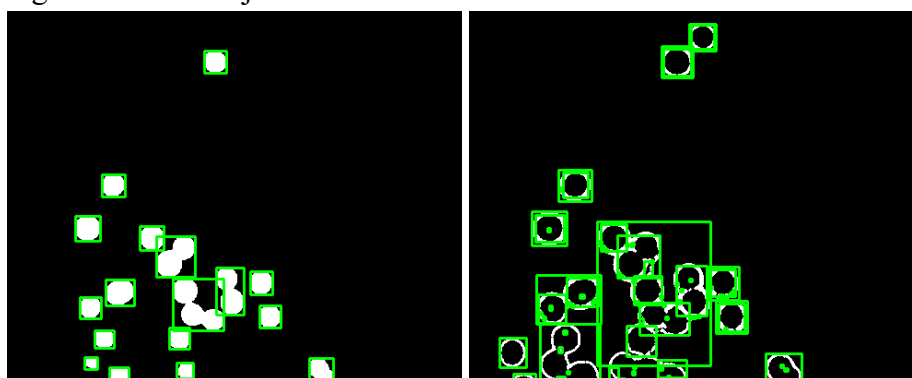
Obrázek 4.2 Výsledek odstranění pozadí

Takto předzpracovaný snímek prakticky představuje vstupy do granulometrické metody stínografie (viz kapitola 1.3.6). Body zájmu, tedy částice, mají světlou barvu, zatímco pozadí je tmavé. Dalším krokem je binarizace obrazu. OpenCV nabízí několik možností, jak tento krok provést. Buď lze nastavit pevnou hranici, která bude jasovou informaci převádět na černou nebo bílou, anebo lze hranici zvolit pomocí adaptivních metod, např. Otsu či Gaussian. Výsledky různých binarizačních přístupů jsou na obrázku 4.3.



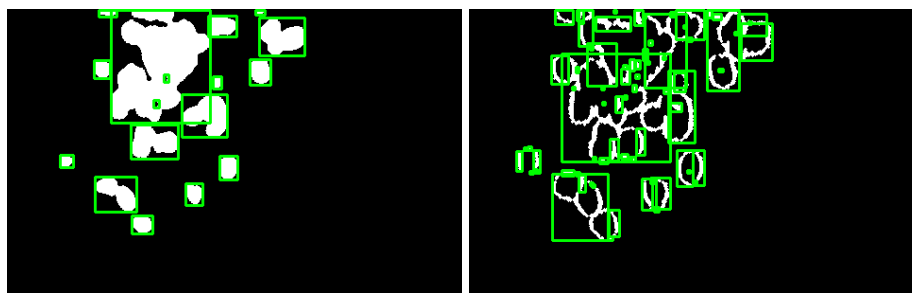
Obrázek 4.3 Binarizace – pevná hranice (vlevo) a Gaussian metoda (vpravo)

Na takto připravené snímky je možné dále aplikovat morfologické operace (viz kapitola 2), kterými lze odstranit případné malé samostatné shluky pixelů vzniklé při prahování. Dalším krokem je nalezení částic. K tomuto účelu byla použita knihovní funkce OpenCV `findContours`. Kolem jednotlivých nalezených kontur objektů lze poté pro vizuální reprezentaci vykreslit čtverec, jemuž je celá nalezená kontura vepsána. Výsledky segmentace částic jsou na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4 Segmentace – pevná hranice (vlevo) a Gaussian metoda (vpravo)

Pro výsledky použitých binarizačních metod a segmentačního způsobu je společné, že nedošlo k rozdělení dotýkajících se částic. Tyto na snímku vzniknou tak, že kuličky měřicím tubusem padají v zákrytu vzhledem k rovině snímače kamery. To, že žádná z metod není schopna segmentace těchto shluků, by vedlo k tomu, že později, pokud by mělo být přistoupeno k určování počtu prolétajících částic a dále jejich velikosti, byly by shluky detekovány jako jedna velká validní částice. Tím pádem by byl chybně určen jak počet, tak i distribuční funkce velikosti částic. Takovýto případ byl ověřen použitím algoritmu na datech ze staršího datasetu, který obsahoval více shluků (viz obrázek 4.5). Z toho důvodu bylo upuštěno od rozvíjení tohoto přístupu, protože beze změny tvaru měřicí trubice nebo násypky za účelem eliminace možnosti průletu částic snímací oblastí v zákrytu by nebylo možné dosáhnout uspokojivé spolehlivosti zjištěných výsledků.



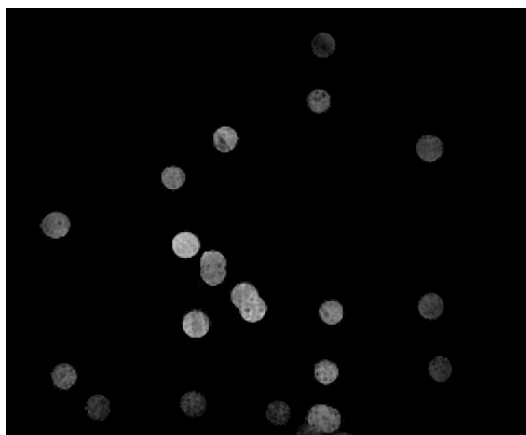
Obrázek 4.5 Segmentace barviva – pevná hranice (vlevo) a Gaussian metoda (vpravo)

4.2 Snaha o segmentaci shluků

Překrývání částic popsané v kapitole 4.1 vedlo k nutnosti navrhnout robustnější algoritmus na segmentaci shluků padajících částic. Na vstupu se předpokládá shodný soubor dat, jaký byl použit v předchozí verzi kódu. Tedy algoritmus pracuje až na datech uložených na disku, která si postupně načítá. Jeho jednotlivými hlavními částmi se budou zabývat následující podkapitoly.

4.2.1 Předzpracování

Při předzpracování je opět odečítán snímek s prázdným pozadím od snímku s částicemi. Následuje rotace a ořez oblasti zájmu. Nakonec je provedena morfologická eroze obrazu jádrem tvaru kříže o velikosti 3x3 pixely. Výsledek takového předzpracování je na obrázku 4.6.



Obrázek 4.6 Výstup předzpracování

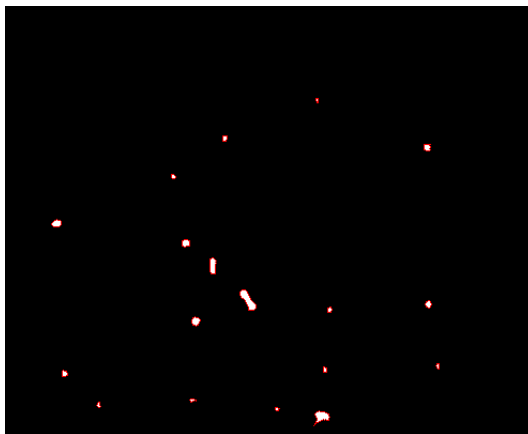
4.2.2 Hledání částic

Na začátku postupu na hledání částic je obraz binarizován pevnou hranicí, která byla experimentálně určena jako 15. Při takovémto nastavení je zachována většina povrchu kuliček, a zároveň se na snímku nevyskytují artefakty kolem hranic. Následuje rozšíření obrazu o 1 černý pixel na každou stranu, čímž je zaručeno, že jsou korektně

segmentovány i kuličky, které jsou na hranici snímané oblasti. Dále je provedeno morfologické otevření strukturním elementem tvaru kříže o velikosti 3x3 pixely.

Kvůli pozdějšímu využití watershed algoritmu (viz kapitola 2.2) je nutné určit jisté pozadí, semínka částic a místa, která jsou sporná. Pozadí je určeno iterativní operací dilatace, která způsobí postupné zvětšování částic a jejich slévání, přičemž díky tomu je zaručeno, že žádná část validní částice nebude označena jako pozadí. Pro zjištění semínek je provedena vzdálenostní transformace (viz kapitola 2.2) pomocí OpenCV funkce `distanceTransform`.

Takto upravený obraz lze opět prahovat, přičemž prahová hodnota je zvolena proporčně k maximální nalezené vzdálenosti distanční transformace. Nyní lze předpokládat, že se na obraze nachází shluk bodů pro každou nasnímanou částici a zároveň jsou shluky bodů pro dvě různé částice, které se ovšem na původním snímku překrývaly, co nejvíce oddělené (mají co nejmenší společnou hranici). Poté lze na obraze nalézt kontury pomocí `findContours` funkce. Výsledek je na obrázku 4.7. Na snímku se stále nachází spojená jádra (delší shluky bílých pixelů), které odpovídají překrývajícím se kuličkám na obrázku 4.6.



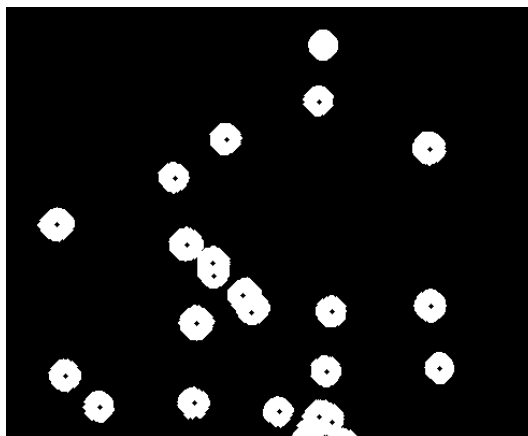
Obrázek 4.7 Nalezené kontury

Z toho důvodu byla zapotřebí další segmentace, tentokrát odděleně pro každou nalezenou konturu. Každá byla vyřezána z předzpracovaného obrazu. Pokud čtverec, jemuž je kontura vepsána, měl zanedbatelnou plochu, byla kontura zahozena. Pro dostatečně velké kontury byla dále prováděna iterativně morfologická eroze strukturním elementem kříže o velikosti 3x3 pixely a na takto získaném novém výřezu byly opět nalezeny hrany. Smyčka pro danou konturu končila buď v případě, že na výřezu nezbyl vlivem eroze již žádný bílý pixel, anebo tehdy, kdy algoritmus hledání kontur našel na výřezu více než jednu konturu. První případ odpovídá validnímu jádru pro jednu částici, zatímco druhý případ vznikne, pokud jsou spojená jádra překrývajících se kuliček náhle rozdělena iterativní morfologickou erozí.

Pro jádra samostatných kuliček byl do obrazu, na němž se zaznamenávala semínka částic, nakreslen malý kruh na pixelovou pozici odpovídající středu původní kontury.

Střed byl určen jako aritmetický průměr x a y souřadnic bodů tvořících hranici (konturu). Pro překrývající se částice byly nové středy určeny tak, aby byly dle počtu pravidelně rozmístěny podél delší osy původní kontury a souřadnice na kratší ose byly nastaveny tak, aby vzniklý bod zaručeně patřil do původní kontury. Takovéto rozmístění se snaží předpokládat pravděpodobné rozmístění středů kuliček na původním snímku.

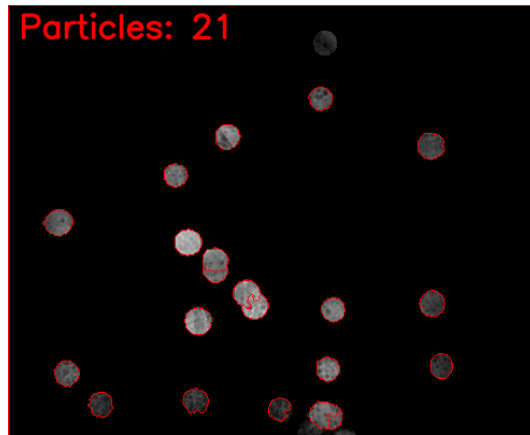
Obrázek 4.8 zobrazuje společně pozadí, sporné oblasti a jádra částic. Pozadí je černé, sporné oblasti (pozadí nebo některá z částic) jsou bílé, jádra částic jsou opět černá. V horní části obrázku je částice bez jádra. Tato situace nastala kvůli tomu, že kulička byla zachycena v části tubusu, která není dostatečně osvětlená použitým světelným panelem, jak je vidět na obrázku 4.6. To mělo za následek, že při prahování obrazu se v těle částice objevily černé pixely, které při distanční transformaci způsobily zmenšení pravděpodobného semínka. Toto bylo dále zahozeno na základě své malé velikosti po nalezení kontur. Vzhledem k tomu, že padající částice je při průletu měřicím tubusem zachycena vysokorychlostní kamerou zhruba 4 až 5krát, nejedná se o závažnou chybu detekce.



Obrázek 4.8 Jádra a pozadí částic

4.2.3 Aplikace watershed algoritmu

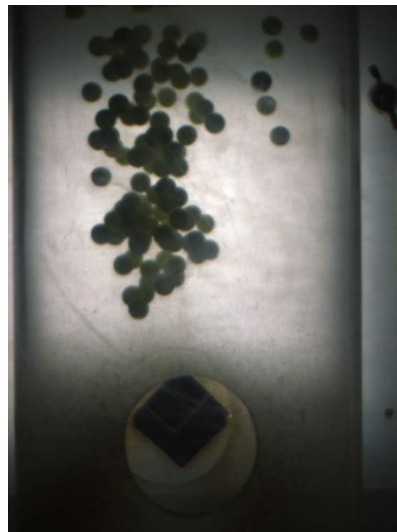
Funkce tohoto algoritmu byla vysvětlena v kapitole 2.2. Je využit k tomu, aby byla zjištěna příslušnost jednotlivých pixelů k různým kuličkám a tím pádem mohlo být provedeno další určování jejich velikosti. Výstup watershed algoritmu s proložením na původní snímek je na obrázku 4.9. V jeho horní části je zobrazen výsledek čítače, který sčítá počet nalezených jader. Zároveň je patrné rozdělení pixelů tak, jak přibližně přísluší jednotlivým částicím.



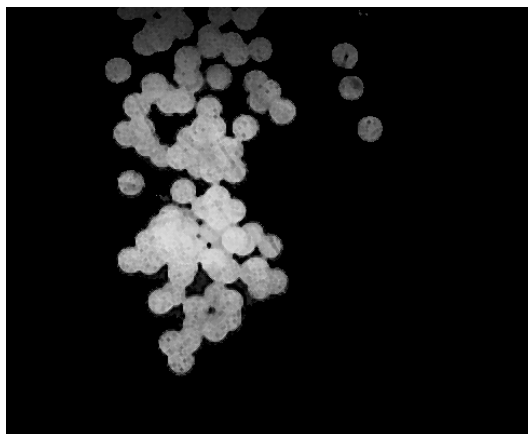
Obrázek 4.9 Nalezené kuličky

4.2.4 Využití elektromagneticky řízených dvířek

Při předcházejícím testování byly kuličky do měřicí roury sypány ručně. To vedlo k tomu, že měřicím tubusem nepadalo tolik částic najednou, jako když se otevře zásobník a z něj vypadne celý obsah v jeden moment. Proto byla pro další testování využita elektromagnetická dvířka u ústí násypky. Příklad zachycení takto vypuštěných kuliček vysokorychlostní kamerou je na obrázku 4.10. Z obrázku je patrné, že při tomto způsobu vypouštění dojde k velké kumulaci kuliček a ty, který ze zásobníku vypadly na začátku potom měřicí trubicí padají po celou dobu v takto kompaktní skupině. Výsledek předzpracování pro tento snímek je na obrázku 4.11.

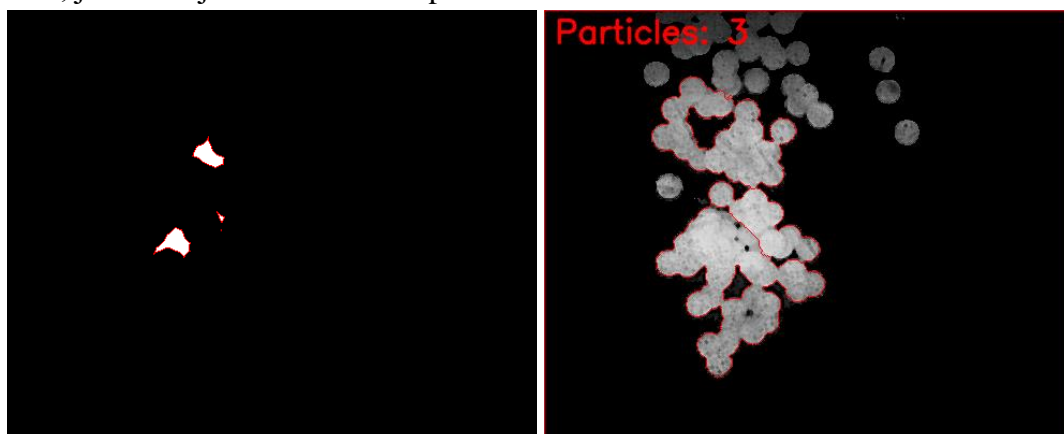


Obrázek 4.10 Padající kuličky z elektromagnetických dvířek



Obrázek 4.11 Kuličky po předzpracování

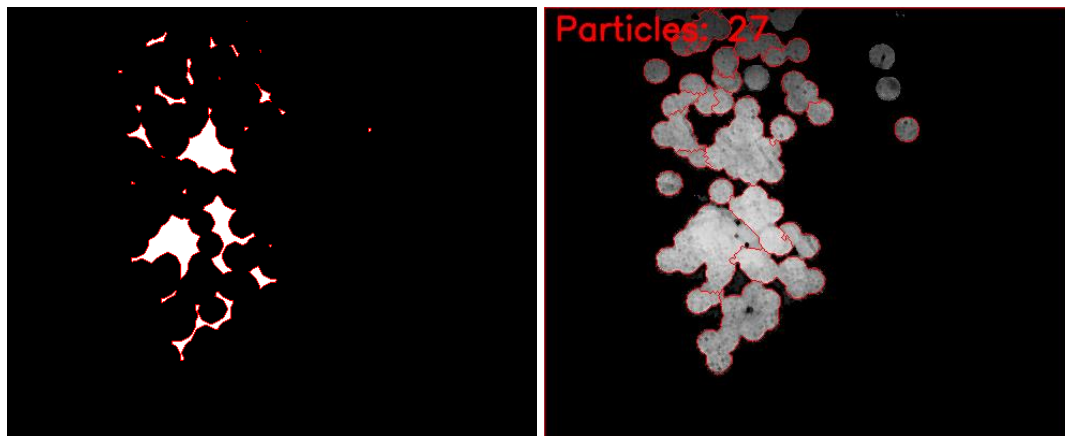
Při aplikaci algoritmu navrženého v této kapitole dochází k problémům se segmentací kuliček. Algoritmu selhává již distanční transformace kvůli zvolenému způsobu prahování. Představíme-li si, že pro každý nečerný pixel z obrázku 4.11 vypočteme vzdálenost k nejbližšímu černému pixelu, je patrné, že pixely ležící uvnitř shluků budou mít tyto vzdálenosti mnohem větší, než pixely ze samostatných kuliček. Zvolené proporční prahování ale způsobí, že vzdálenosti menších shluků a samostatných částic nebudou dosahovat dostatečné hodnoty, aby přesáhly práh nastavený dle velkých shluků. Důsledkem toho je zahození jinak validních částic z následného vyhodnocování. Tento případ je ilustrován v levé části na obrázku 4.12. Na takovémto snímku jsou následně formována jádra kuliček, což ve výsledku povede k situaci, že budou detekovány pouze 3 částice, jak ukazuje obrázek 4.12 vpravo.



Obrázek 4.12 Nalezené kontury v proporčně prahované distanční transformaci (vlevo) a výsledek segmentace (vpravo)

Jako řešení se nabízí nastavení pevného prahu pro binarizaci distanční transformace. Ten byl experimentálně zvolen na hodnotu 10. Tedy to lze interpretovat tak, že jako potenciální střed částice jsou brány takové nečerné pixely, které jsou od nejbližšího černého pixelu vzdáleny alespoň o 10 pixelů. To sice vedlo ke zlepšení detekce potenciálních jader kuliček (viz levá část obrázku 4.13), ovšem stále jsou patrné velké

shluky bílých pixelů odpovídajících středům velkých shluků kuliček. Při aplikaci navrženého algoritmu zmenšování a dělení jader shluků je sice dosaženo zvýšení detekovaného počtu částic, jak ukazuje pravá část obrázku 4.13, číslce 27 je však stále vzdálena od opravdového počtu částic, které byly v danou chvíli zachyceny padající měřicí trubicí.



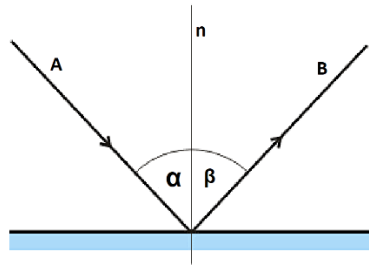
Obrázek 4.13 Nalezené kontury v pevně prahované distanční transformaci (vlevo) a výsledek segmentace (vpravo)

4.3 Hardwarové modifikace

Selhávání detekce shluků kuliček, které bylo popsáno v kapitole 4.2.4, má jasnou příčinu. Způsob umístění kamery, osvětlení a měřicí trubice na podpůrném rámu totiž produkuje snímky připomínající stínografii (metoda viz kapitola 1.3.6). Bod zájmu je tmavý, protože jím neprochází světlo, zatímco pozadí je uniformní a bílé, neboť je kamera namířena přímo do světla, které vytváří díky difuznímu plátu homogenní intenzitu osvitu. Na takovýchto snímcích jsou ale stěží detekovatelné jednotlivé kontury kuliček ve shlucích, množina použitelných metod je proto značně omezená. Z toho důvodu bylo přistoupeno k experimentům se změněným způsobem osvětlení scény, které bylo uzpůsobeno tak, aby zachovávalo co nejvíce detailů jednotlivých kuliček a tím umožňovalo změnu segmentačního algoritmu.

4.3.1 Určení optimálního umístění osvětlení scény

Nové umístění světla ve vztahu ke kameře vychází ze dvou fyzikálních zákonů. Prvním z nich je zákon odrazu světelného paprsku, který je graficky zobrazen na obrázku 4.14. Uvedený případ platí pro objekty větší než je vlnová délka dopadajícího světla. To je pro částice v rámci této diplomové práce splněno. Paprsek A míří od zdroje, paprsek B je paprskem odraženým. Úhel α se nazývá úhel dopadu, úhel β je úhel odrazu. Písmenem n je označena kolmice k povrchu tělesa v bodě dopadu světelného paprsku. Z obrázku je patrné, že úhly jsou si sobě rovny, tzn. že platí, že úhel dopadu je roven úhlu odrazu. [28]



Obrázek 4.14 Odraz světelného paprsku

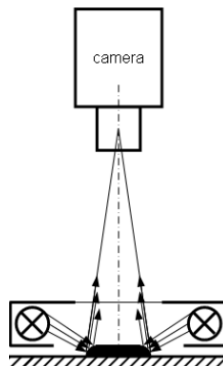
Z obrázku dále vyplývá, že součet úhlů dopadu a odrazu od povrchu určitého tělesa nemůže být větší než 180° . Tedy pro samostatný úhel dopadu (respektive odrazu) bude platit, že nemůže být větší než 90° . Tento poznatek omezuje rozsah možných umístění osvětlení a kamery.

Druhým zákonem, ze kterého hardwarové změny vychází, je Lambertův zákon o intenzitě vyzařování rovinného plošného zdroje. Rovnice

$$I = k_d I_0 \cos\theta \quad (4.1)$$

definuje vztah mezi intenzitou odraženého světla I a intenzitou dopadajícího světla I_0 . Intenzita odraženého světla závisí jednak na koeficientu množství odraženého světla k_d , který nabývá hodnot z intervalu 0 až 1, a také na úhlu odrazu světelného paprsku θ . [28] Je patrné, že při snaze maximalizovat množství odraženého světla je nutné dosáhnout takového úhlu, který by maximalizoval hodnotu kosinu. Tato funkce nabývá maxim v bodech $(0 + 360k)^\circ$, kde $k=0,1,2,\dots$ Úhel odrazu (a dopadu) ale nemůže přesáhnout 90° . Pro maximalizaci intenzity odraženého světla je tak vhodné volit úhel odrazu co nejbližší 0° . Pro tento případ by bylo vhodné využít tzv. ring light, což je kruhový světelný panel s otvorem uprostřed, kterým kamera nahlíží na osvětlenou scénu. Realizací tohoto typu osvětlení se zabývá kapitola 4.3.2

Další možností je provedení osvětlení metodou tzv. temného pole (dark field lighting). Používá se právě v případech, kdy je na scéně zapotřebí zvýraznit tvary, obrysy a okraje. Provedení metody je schematicky rozkresleno na obrázku 4.15.



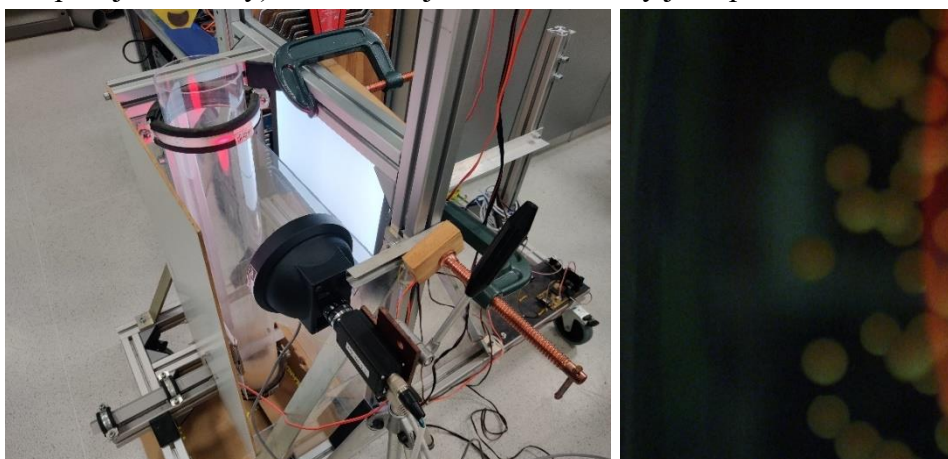
Obrázek 4.15 Osvětlení metodou temného pole [29]

Na obrázku je v horní části umístěna kamera a na podložce v dolní části leží tmavý objekt. Šipkami je naznačeno, že do objektivu kamery se dle zákona dopadu a odrazu odrazí pouze ty paprsky, které narazily na hrany objektu. Požadavky metody, které jsou zohledněny i v obrázku 4.15, jsou následující. Světlo, které se používá k osvětlení scény, musí být umístěno co nejbližší objektům zájmu na scéně. Čím dále se světlo od objektů zájmu nachází, tím méně je patrný kýžený efekt zvýraznění kontur. Optimálního všesměrového efektu je navíc dosaženo, pokud je použit kruhový světelný zdroj (ring light). Ten je umístěn tak, že ze všech stran obkličuje sledovanou scénu. Způsob osvětlení ale lze přizpůsobit například tvaru snímaných částic. [29]

Pokud tedy není nutné na obraze detekovat všechny hrany, je možné scénu nasvítit za použití pouze směrového zdroje z jedné strany. To by dle obrázku 4.15 znamenalo vynechání například „levého“ světelného zdroje, tím pádem by se do objektivu kamery odrážely pouze paprsky dopadající na pravou hranu objektu. Z obrázku vyplývá, že je ale důležité světlo umístit pod úhlem co nejbližším 90° tak, aby světelný zdroj nebyl přímo viditelný kamerou. Intenzita efektu je dále ovlivněna také vlnovou délkou světla, kdy čím kratší je, tím výraznější efekt se dostaví. Proto například vytvoří výraznější efekt osvětlení modrým než červeným světlem. [29] Tento typ osvětlení je proveden v kapitole 4.3.3.

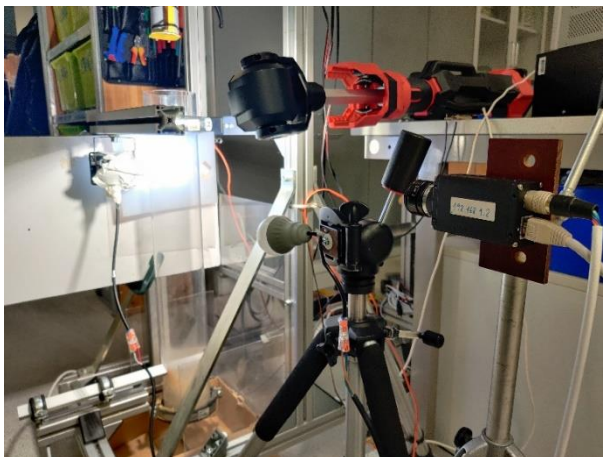
4.3.2 Osvětlení zepředu

Pro otestování tohoto případu bylo nejdříve na vysokorychlostní kameru osazeno světlo Advanced Illumination DL7248 s LED diodami červené barvy. Na snímku 4.16 vlevo je fotografie měřicí stanice s osazeným tímto osvětlením před objektivem kamery. Ukázalo se ovšem, že toto světlo má nedostatečnou intenzitu osvětlení, jak ukazuje pravá část tohoto obrázku. Z něj je patrné, že při snaze kompenzovat tento nedostatek bylo světlo (a tím pádem i kamera) umístěno tak blízko měřicímu tubusu (tak, aby světelné paprsky dopadaly na padající kuličky), že kamera již nezabírala celý jeho průřez.

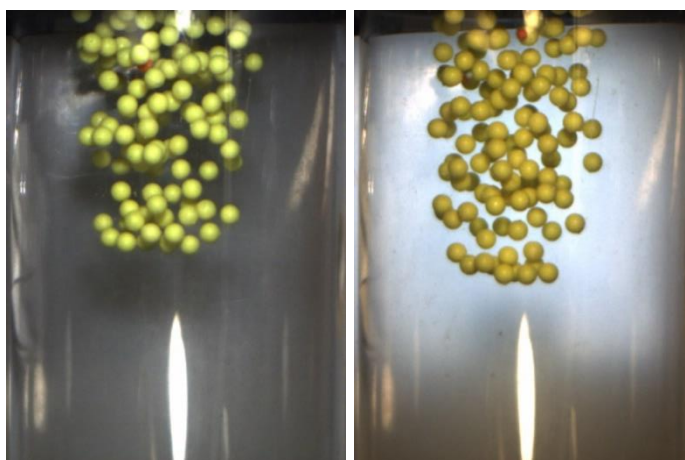


Obrázek 4.16 Kamera s osazeným objektivovým osvětlením (vlevo) a zachycený snímek kamerou (vpravo)

Z toho důvodu bylo zapotřebí použít výkonnější zdroj světla. Jako vyhovující pro účely snímání zkušebních datasetů pro vývoj detekčního algoritmu se ukázala kombinace stavebního LED světla na baterie se stavební LED žárovkou na střídavé napětí 230 V s vestavěným usměřňovačem potlačujícím blikání. Fotografie měřicího pracoviště je na obrázku 4.17, příklad snímku kuliček je na obrázku 4.18 vlevo. Odtud je patrné, že padající kuličky vytváří na pozadí stín. Ten by znesnadňoval odstranění pozadí na základě změn mezi scénou bez kuliček a s padajícími kuličkami, protože by ke změně jasu pixelů docházelo nejenom tam, kde je padající kulička, ale i tam, kde je její stín.



Obrázek 4.17 Osvětlení scény LED žárovkou a stavebním světlem



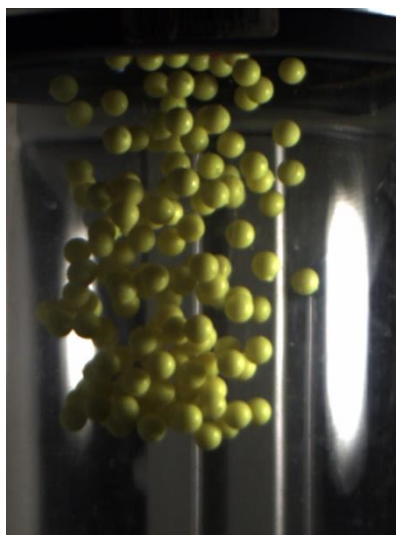
Obrázek 4.18 Padající kuličky – osvětlení ze strany kamery bez (vlevo) a s potlačením stínů (vpravo)

Za účelem potlačení stínů byl za měřicí tubus přidán LED panel s difuzorem, který slouží právě pro jemné nasvětlení pozadí a eliminaci stínů. Výsledný snímek padajících kuliček s předním osvětlením a zadním přísvitom je na obrázku 4.18 vpravo.

4.3.3 Osvětlení z boku

Osvětlení kuliček bylo provedeno následovně. Zdroj osvětlení byl umístěn tak, aby součet úhlu dopadu a odrazu byl roven zhruba 90° . Příklad nasvětlení scény takovýmto

způsobem je na obrázku 4.19. V tomto případě bylo pro nasvícení použito stavební LED světlo s přidanou difusní vrstvou pro rozptýl bodového světla z jednotlivých LED diod. Z obrázku je patrné, že došlo k nasvícení kuliček zboku tak, že na každé vznikla světlá polokoule na přivrácené straně ke světlu a tmavá polokoule na straně odvrácené. Takovéto nasvětlení odpovídá očekáváním od realizace osvětlení metodou temného pole a je výhodné pro další segmentaci vzhledem k tomu, že na obraze je možné detekovat právě světlé polokoule ohraničené od ostatních tmavými částmi.



Obrázek 4.19 Padající kuličky – osvětlení z boku

Je ovšem důležité, aby světelný paprsek prostupoval celým sloupcem padajících částic, tedy aby částice byly osvětleny od strany měřicího tubusu přivrácené ke světlu až po jeho druhou stranu. Toho je ovšem vzhledem k překrývajícím se částicím náročné dosáhnout. Řešením by mohlo být přidání druhého světla, které by scénu osvětlovalo i z opačné strany, to by ovšem vedlo ke ztížení detekce částic, neboť jedné částici by mohlo odpovídat více než jedno jasové maximum. Z toho důvodu byl detekční algoritmus vyvíjen na datech s osvětlením, které odpovídá způsobu popsaném v kapitole 4.3.2.

4.3.4 Intenzita osvětlení

Po orientačním určení požadovaného umístění osvětlení ve vztahu rovněž k umístění kamery bylo zapotřebí určit intenzitu takto umístěného světelného zdroje. Činitelů, které ji ovlivňují, je několik. Předně je požadovaná intenzita závislá na nastavení vysokorychlostní kamery. Na objektivu byla vzhledem k požadavku velmi krátkého expozičního času zvolena nejvíce otevřená clona (za cenu zúžení hloubky ostrosti), jak je uvedeno v kapitole 3.2. Dalším parametrem, kterým lze osvětlení ovlivnit, je zisk (gain) senzoru, což je proměnná, kterou umožňuje kamera nastavit. Čím vyšší je, tím jasnější jsou světlé oblasti v obraze. Lze tak zesílit slabnoucí detaily v tmavých oblastech, ale za cenu ztráty informace v jasných oblastech. Dalším negativním efektem souvisejícím s příliš vysokým ziskem senzoru je zesílení obrazového šumu. Ten značně znesnadňuje

veškerou detekci částic, protože stochasticky znehodnocuje obrazovou informaci a lze ho kompenzovat pouze velmi obtížně. Vzhledem k tomu bude dbáno na to, aby byl zisk senzoru nastaven vždy na co nejnižší hodnotu (kamera umožňuje interval cca. 100 - 1000).

Potřebná intenzita osvětlení je rovněž ovlivněna vzdáleností, kterou musí urazit od zdroje po scénu. Čím delší tato vzdálenost je, tím vyšší intenzita osvětlení je potřebná. [30] Intenzitu dopadlého světla snižují také přechody světelných paprsků přes plexiskla osazená na měřicím přípravku. Jeho různé tloušťky, degradace čirosti slunečními paprsky, znečištění, případně mechanické oděrky zapříčiní zhoršené optické vlastnosti použitého materiálu. Tyto negativní vlivy jsou ovšem těžko kvantifikovatelné, ač mohou intenzitu procházejícího světla významně snížit.

Důležitým činitelem s vlivem na intenzitu osvětlení jsou samotné měřené částice K vysvětlení schopnosti materiálu odrazit světelný paprsek je nutné vysvětlit několik souvislostí. Předně, dopadne-li světelný tok na určitý materiál (v tomto případě na částici), rozdělí se na tři části. Platí rovnice

$$R + T + A = 100 \% \quad (4.2),$$

kde R vyjadřuje odražené světelné kvantum, T je prošlé světelné kvantum a A je pohlcené světelné kvantum. [29] Pro padající kuličky a granulát bude s největší pravděpodobností vždy platit, že se bude jednat o tělesa neprůhledná, tedy činitel T bude roven nule. Rovnice (4.2) se poté zredukuje do formy

$$R + A = 100 \% \Rightarrow r + a = 1 \quad (4.3).$$

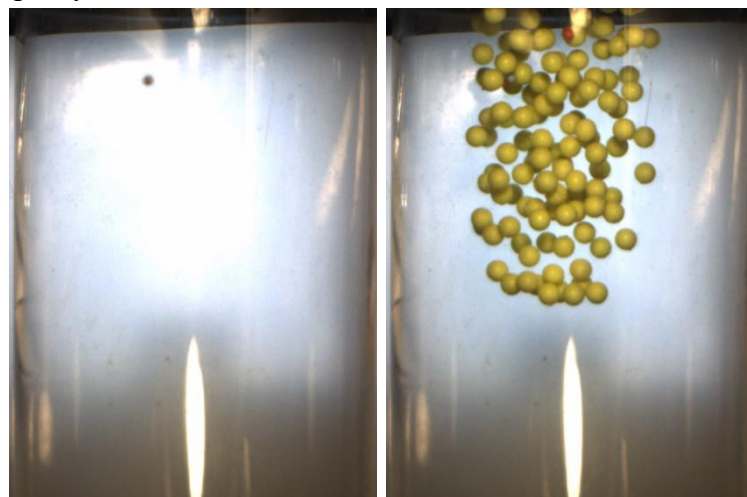
Přechodem z procent lze získat činitele odrazu r a činitele pohlcení a . Pro činitele pohlcení a platí, že pokud nabývá hodnoty 1, je pohlceno veškeré dopadající záření (tzv. absolutně černé těleso). Oproti tomu čím nižší je, tím méně světla je pohlceno. Pro činitele odrazu r platí podobný princip, tedy pokud je roven 1, došlo k absolutnímu odrazu dopadajícího světla, zatímco čím nižší je jeho hodnota, tím méně je těleso schopné světla odrazit. Činitel odrazivosti r závisí na materiálových vlastnostech, jako jsou vlnová délka (barva) osvětlení, barva materiálu, polarizace světla ze zdroje, úhel dopadu světla na materiál a mnoho dalšího. [29]

Teoreticky by bylo možné pro daný materiál určit činitele odrazivosti experimentálně, ovšem tento postup by bylo nutné opakovat pokaždé při změně měřeného materiálu. I vzhledem k množství ostatních činitelů s vlivem na požadovanou intenzitu osvětlení tak lze uvést, že čím silnější zdroj světla, tím je to pro tuto aplikaci lépe. Nejvhodnější je takový zdroj, jehož intenzita je regulovatelná a bude jí možné nastavit v závislosti na scéně. Důležité je, aby světlo bylo dostatečně intenzivní na to, aby co nejvíce nasvětlilo celý sloupec padajících částic. Dále je vhodné, aby vytvářelo rovnoměrný světelný kužel. Vzhledem k vysoké snímkovací frekvenci nesmí blikat, protože nekonzistentní osvětlení scény mezi snímky by způsobovalo problémy při odstraňování pozadí.

5. POKROČILÁ DETEKCE PADAJÍCÍCH ČÁSTIC

Program byl postaven na datech se scénou osvětlenou dle návrhu z kapitoly 4.3.2. Kamera se nacházela u ústí zásobníku do měřicí trubice. K jejímu přesunu ze spodní části trubice bylo přistoupeno kvůli nežádoucím odrazům kuliček od roury pro vložení vibračního senzoru. Vývoj programu probíhal na datasetech s různým množstvím plastových kuliček o průměru 6 mm žluté barvy. K jejich dávkování do měřicí trubice byla využívána manuálně spínaná elektromagnetická dvířka zásobníku.

Na vstupu algoritmu jsou zapotřebí dva snímky. Jeden s prázdnou scénou, a druhý s padajícími kuličkami (viz obrázek 5.1). Snímek s prázdnou scénou je možné zachytit díky předpokládanému zpoždění od spuštění záznamu vysokorychlostní kamery, otevření dvířek a vstupu první letící kuličky do zorného pole kamery. Uživatel může na vstupu definovat interval validních velikostí kuliček, tedy nejmenší a největší možný detekovaný průměr. Popisem jednotlivých fází algoritmu detekce padajících kuliček se zabývají následující podkapitoly.

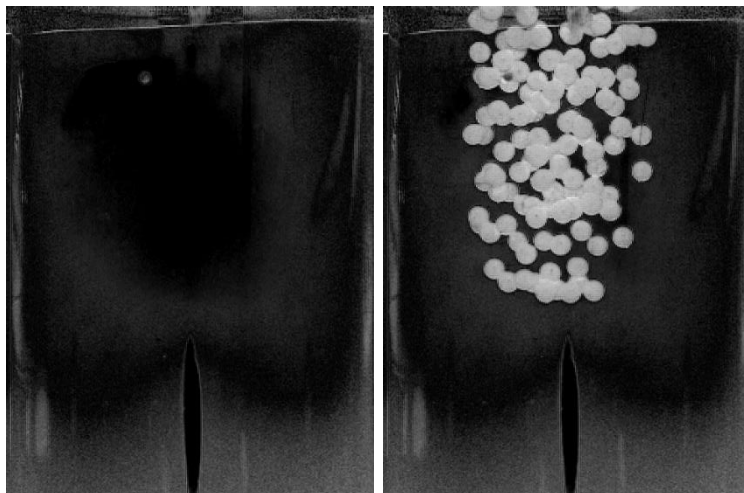


Obrázek 5.1 Vstupní snímky – scéna bez a s kuličkami

5.1 Předzpracování

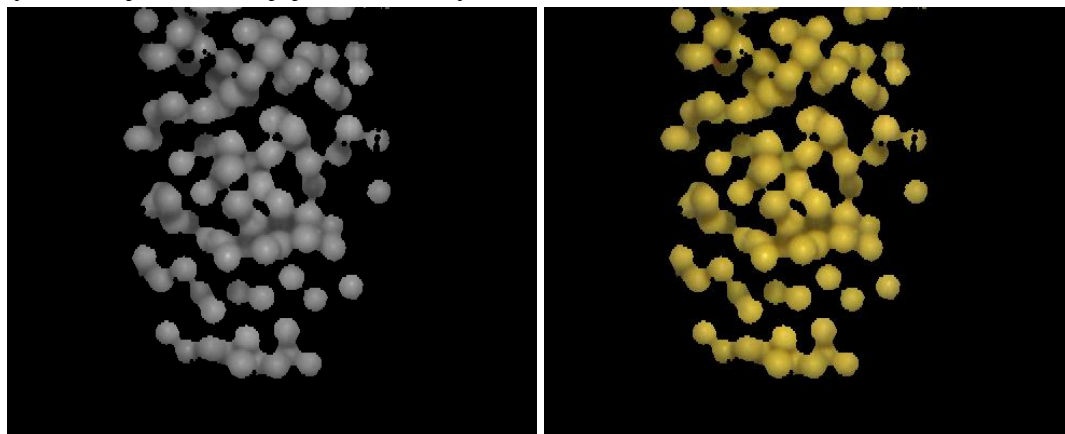
Prvním krokem je odstranění pozadí. Snímek s kuličkami a snímek prázdné scény jsou nejdříve převedeny do HSV barevného prostoru. HSV (Hue, Saturation, Value) je způsob reprezentace obrazové informace, který je přirozenější pro lidské oko. Má tři složky, přičemž hue reprezentuje dominantní vlnovou délku barvy, saturation vyjadřuje sytost barvy (množství přimíchané bílé) a value je jas barvy. [16] Dále je pracováno se saturation složkou. Saturation složka je pro snímek s a bez kuliček na obrázku 5.2. Právě HSV model a saturation složka byla zvolena s přihlédnutím k barvě padajících kuliček a je možné, že ne pro všechny typy částic bude právě tato složka vhodná. V rámci předzpracování lze ale složku, na jejímž základě je rozhodováno o přítomnosti kuliček,

jednoduše zaměnit. Univerzálně lze pak používat přímo šedotónové zobrazení vstupních snímků.



Obrázek 5.2 Saturation složka – scéna bez (vlevo) a s kuličkami (vpravo)

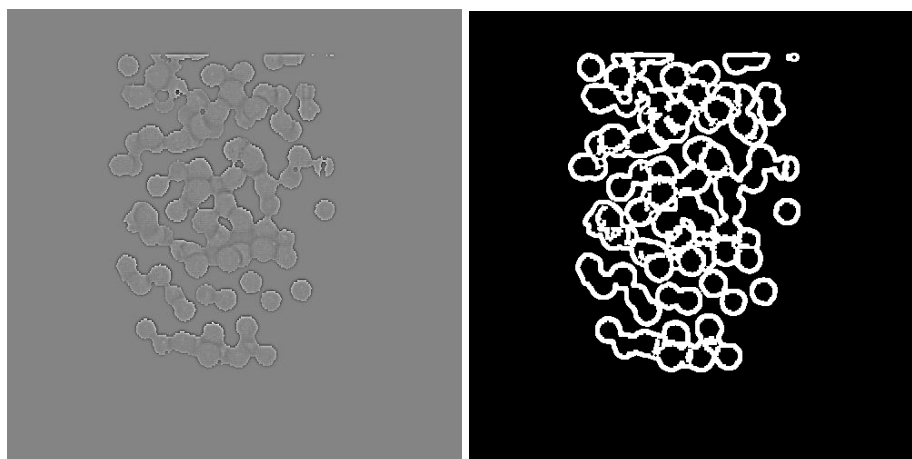
V dalším kroku je vypočten rozdíl snímku s a bez kuliček. Jeho prahováním je vytvořena maska, která má hodnotu 1 tam, kde u pixelů saturation složky došlo k nezanedbatelné změně hodnoty. Její aplikací na původní vstupní snímek a ořezu relevantní oblasti s kuličkami vzniknou snímky, které jsou na obrázku 5.3. Následně je obraz rozšířen tak, aby byl čtvercový, kvůli optimální aplikaci Fourierovy transformace. Šedotónový snímek je také upraven knihovni funkcí OpenCV `equalizeHistogram`, která slouží ke zvýraznění kontrastu snímku. Tím se docílí většího jasového rozdílu mezi tmavými okraji částice a jejím nasvíceným středem.



Obrázek 5.3 Aplikace masky – šedotónový (vlevo) a barevný snímek (vpravo)

5.2 Hranová detekce

Z předzpracovaného šedotónového snímku dle postupu v kapitole 5.1 je zapotřebí získat hrany jednotlivých kuliček. K tomuto účelu je použita Fourierova transformace (viz kapitola 2.3) a filtrace ve frekvenční oblasti. Ze spektra obrazu jsou pomocí hornopropustního filtru (obrácené Gaussovo okno) odstraněny nízké frekvence a zachovány ty vysoké, které uchovávají informaci o hranách. Takto filtrovaný snímek je na obrázku 5.4 vlevo.

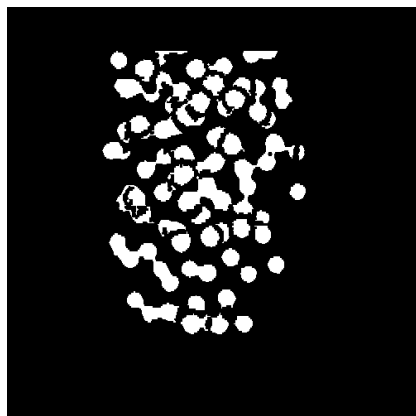


Obrázek 5.4 Snímek po aplikaci filtru typu horní propust (vlevo) a z něj detekované hrany (vpravo)

Takto připravený snímek je dále prahován, jsou na něm aplikovány morfologické operace dilatace a eroze (viz kapitola 2.1) a jsou z něj odstraněny drobné částičky. Snahou je, aby vznikl takový obraz, na kterém jsou bíle obtaženy hranice jednotlivých kuliček, jak ty sousedící s černým pozadím, tak ty nacházející se uvnitř shluků. Výsledek těchto operací je na obrázku 5.4 vpravo.

5.3 Získání oblastí

V dalším kroku je cílem získat takový obraz, kde bílá barva odpovídá tělu kuličky, a černá signalizuje pozadí. Tedy na pravý snímek na obrázku 5.4 je aplikována OpenCV metoda floodFill z levého horního rohu, která svou funkcí odpovídá tlačítku s plechovkou barvy z Windows Malování. Bíle jsou vyplněny ty oblasti, které mají černou barvu a lze se do nich po černých pixelech dostat z levého horního rohu obrázku. Pokud je takovýto snímek negován, dosáhne se požadovaného zobrazení. Takto zpracovaný snímek je na obrázku 5.5.

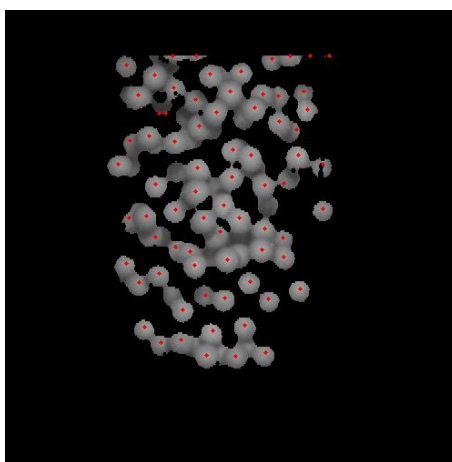


Obrázek 5.5 Výsledek floodFill funkce

Pomocí OpenCV knihovní funkce `findContours` jsou v tomto obraze dále nalezeny hranice spojených bílých oblastí. Takto získané oblasti jsou prostřednictvím implementované třídy uloženy do pole, kde jsou připraveny pro další zpracování.

5.4 Hledání lokálních maxim

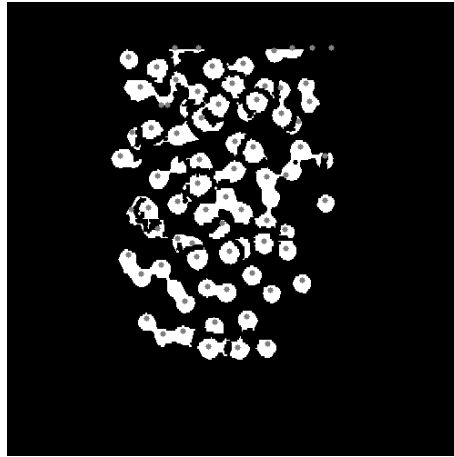
Tato část algoritmu vychází z šedotónového obrazu padajících kuliček (viz obrázek 5.3). Na obraz je aplikován tzv. min max filtr, jehož smyslem je nalezení lokálních obrazových maxim. Díky zvolenému osvětlení (viz kapitola 4.3.2) lze předpokládat, že každé padající kuličce bude odpovídat právě jedno lokální maximum, jak je vidět na obrázku 5.3. Oblasti maxim jsou lokalizovány a je pro ně vypočten jejich střed. Takto získané středy jsou na obrázku 5.6 vykresleny do původního šedotónového obrazu červenou barvou. Je vidět, že byl-li pro danou kuličku nalezen střed, byl pro ni nalezen právě jeden. Ty kuličky, pro které nebyl nalezen střed, jsou příliš překryté sousedními kuličkami a nebo na ně nedopadl, opět kvůli okolním kuličkám, dostatek světla pro jejich zdetekování. Dva středy v horní pravé části snímku pochází z původního obrazu po ořezu, kde se jedná o části přilétajících kuliček.



Obrázek 5.6 Lokální obrazová maxima

5.5 Dělení oblastí

V této části algoritmu dochází ke kombinaci informací na výstupu kapitol 5.3 a 5.4. Pro ilustrační účely slouží obrázek 5.7. Na něm jsou zobrazeny jednotlivé nalezené oblasti, na nichž jsou šedou barvou vyznačeny všechny nalezené středy metodou min max.



Obrázek 5.7 Lokální obrazová maxima vykreslená na nalezených oblastech

Nyní je postupně iterováno nalezenými oblastmi. Jsou jim přiřazeny všechny středy (respektive lokální maxima), které leží uvnitř nich. Ideálně by každé oblasti byl přiřazen právě jeden střed. Může ale nastat situace, že jedné oblasti připadne dva a více středů. Rovněž je možné, že některé z oblastí nepřísluší žádný střed. Všechny případy jsou vidět na obrázku 5.7.

Po úvodním třídění středů jsou v další fázi rozděleny ty oblasti, které obsahují dva a více středů. Pokud jsou uvnitř nich právě dva středy, je vypočtena kolmice vedoucí středem spojnice těchto dvou středů, jejímž prostřednictvím je daná oblast rozdělena na dvě poloviny. Nejdříve je vypočten střed spojnice obou středů a složky směrového vektoru přímky spojující tyto dva středy jako

$$\begin{aligned}v_x &= B_x - A_x \text{ a } v_y = B_y - A_y \\S_x &= A_x + \frac{v_x}{2} \text{ a } S_y = A_y + \frac{v_y}{2}\end{aligned}\tag{5.1},$$

kde A a B jsou středy zkoumané oblasti, v je vektor jejich spojnice a S je střed spojnice těchto bodů. Indexy x a y indikují, že se jedná o souřadnice v osách obrazu. Je provedena normalizace vektoru

$$v_{xn} = \frac{v_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \text{ a } v_{yn} = \frac{v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}\tag{5.2}.$$

Je určen kolmý (neboli normálový) vektor záměnou složek a vzetím jedné se záporným znaménkem, tedy vektor směrnice kolmice na spojnici středů má pak tvar

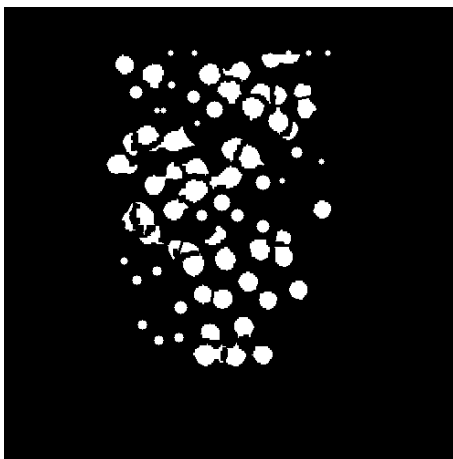
$$v = (v_{xn}, v_{yn}) \rightarrow v_{norm} = (-v_{yn}, v_{xn})\tag{5.3} [31].$$

Ze znalosti souřadnic středu spojnice S a vektoru kolmice v_{norm} lze poté již přímo sestrojít přímkou o zvolené vzdálenosti $2l$ pomocí dvou bodů, C a D , jako

$$\begin{aligned} C &= S + lv_{norm} \\ D &= S - lv_{norm} \end{aligned} \tag{5.4}$$

Pokud některá oblast obsahuje více než dva středy, analytické dělení není prováděno. Namísto toho je vypočtena distanční transformace pixelů oblasti (vysvětlení viz kapitola 2.2). Ve všech středech, které leží ve zpracovávané oblasti, je pak sestrojen kruh bílé barvy o poloměru odpovídajícímu hodnotě distanční transformace v daném středu. Neboli v každém středu je sestrojen největší možný kruh vepsaný zkoumané oblasti. Jako nově vzniklé oblasti rozpadem původní oblasti jsou pak brány právě tyto kruhy.

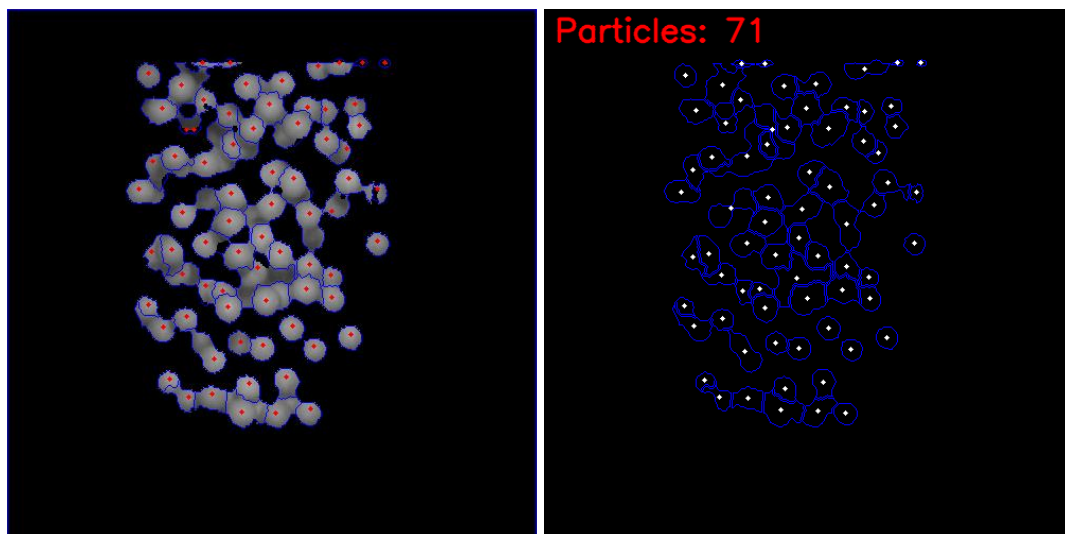
Všechny oblasti jsou opět zkombinovány na jeden snímek, jak lze vidět na obrázku 5.8. Na něm se nachází oblasti s jedním středem, oblasti se dvěma středy rozdělené analyticky i oblasti s více středy rozdělené distanční transformací. Oblasti, kterým nepřípadl žádný střed, jsou zahozeny. Naopak středy, které nepřípadly žádné oblasti, jsou na výsledný snímek také vykresleny jako bílý kruh.



Obrázek 5.8 Výsledek dělení oblastí

5.6 Aplikace watershed algoritmu

Takto získané oblasti jsou použity jako semínka pro watershed algoritmus, který byl vysvětlen v kapitole 2.2. Je spuštěn na původním předzpracovaném barveném snímku, kdy je dosaženo díky největšímu množství obrazové informace nejlepších výsledků. Jeho výsledek je na obrázku 5.9 vlevo. Jako pozadí slouží původní předzpracovaný šedotónový obrázek. Na něm jsou modrou barvou vykresleny hranice nalezených oblastí odpovídajících jednotlivým padajícím kuličkám. Červené body odpovídají nalezeným lokálním jasovým maximům (viz kapitola 5.4).

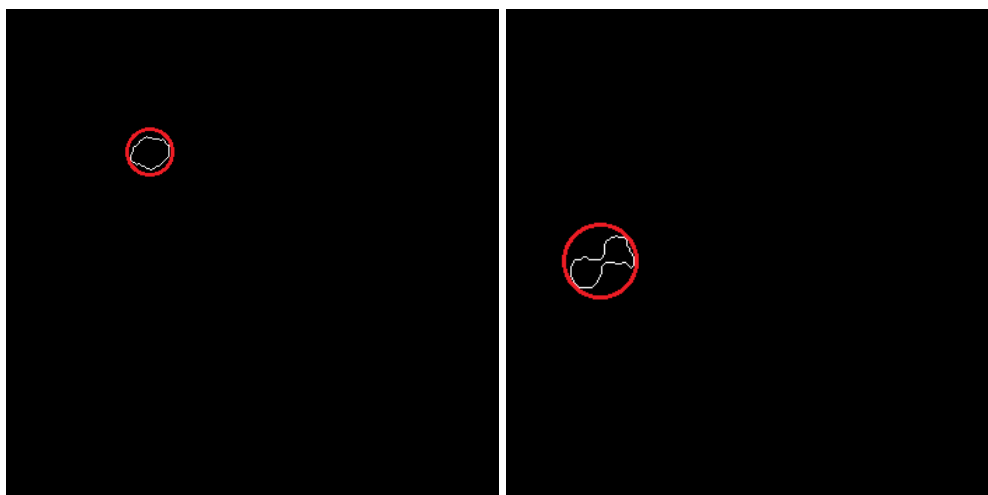


Obrázek 5.9 Výsledek watershed algoritmu – vizualizace přes šedotónový obraz (vlevo) a přes černé pozadí (vpravo)

Pro jednotlivé nalezené oblasti na výstupu metody watershed lze dále vypočítat střed oválu (centroid), případně její obsah a také určit jejich celkový počet. Tyto výsledky jsou zobrazeny na obrázku 5.9 vpravo. Modře jsou vykresleny hranice jednotlivých kuliček. Bíle jsou vyobrazeny středy nalezených oblastí. V horní část je vypsán počet nalezených kuliček na obraze, kterých bylo nalezeno 71. Je vidět, že bíle vykreslené body odpovídají nalezeným červeným lokálním maximům z levého snímku tam, kde byla oblast korektně rozdělena na správný počet kuliček. Na druhou stranu tam, kde stále odpovídá jedna oblast více než jedné částě, si tyto body neodpovídají.

5.7 Dodatečné dělení oblastí

Chybně segmentované oblasti lze dodatečně rozdělit. Algoritmus přistupuje k jednotlivým oblastem zvlášť. Nejdříve je pomocí knihovní funkce OpenCV určen poloměr a střed nejmenší možné kružnice, dovnitř níž se vejde celý obrys (kontura) vyhodnocované oblasti. Tato kružnice je vykreslena pro jednu z kontur na obrázku 5.10 vlevo. V tomto kroku je aplikována filtrace na základě uživatelsky zadané minimální a maximální přípustné velikosti nalezených částěček. V přípravě na další zpracování je vnitřek oblasti vyplněn bíle (nyní je pozadí černé a celá oblast bílá, v předchozích krocích byla bílá pouze kontura) a z takto upraveného obrazu je vypočtena distanční transformace (viz kapitola 2.2). V ní se hledá poloha a hodnota maxima. Poloha je použita jako střed pro sestrojení černé kružnice, jejímž poloměrem je hodnota maxima distanční transformace. Prakticky je tedy uvnitř oblasti sestrojen největší možný vepsaný kruh s černou barvou.

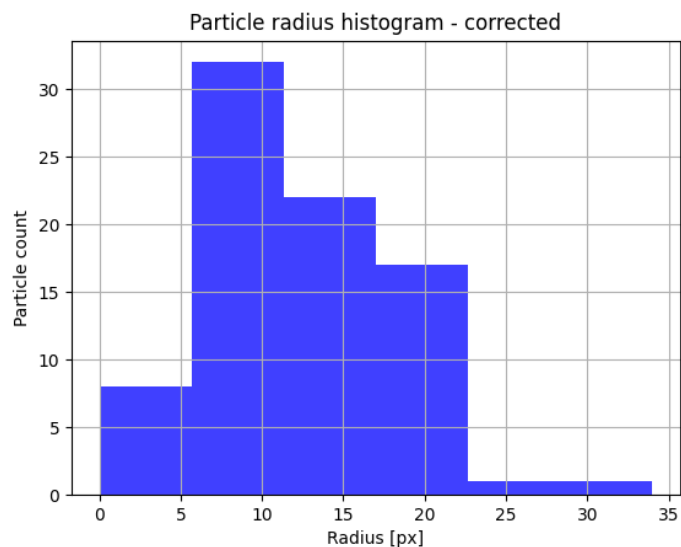


Obrázek 5.10 Opsaná kružnice správně (vlevo) a chybně (vpravo) segmentované oblasti

V takto modifikované oblasti je opět vypočtena distanční transformace a určeno její maximum. Pro správně segmentovanou oblast lze očekávat, že nové maximum bude výrazně nižší než původní maximum. Pokud ale k očekávanému poklesu nedojde, lze učinit závěr, že oblast byla segmentována chybně a stále obsahuje alespoň dvě částice. Takovýmto částicím je přiřazen poloměr, který odpovídá hodnotě maxima jejich distanční transformace. Příklad oblasti, o které bylo algoritmicky rozhodnuto jako o chybně segmentované, je na obrázku 5.10 vpravo. Je vidět, že vznikla slitím dvou sousedních kuliček. Nakonec je tvořen vektor poloměrů nejmenší možné opsané kružnice, jehož hodnota odpovídá délce hlavní diagonály oblasti, respektive maximum distanční transformace.

5.8 Vyhodnocení výsledků segmentace plastových kuliček

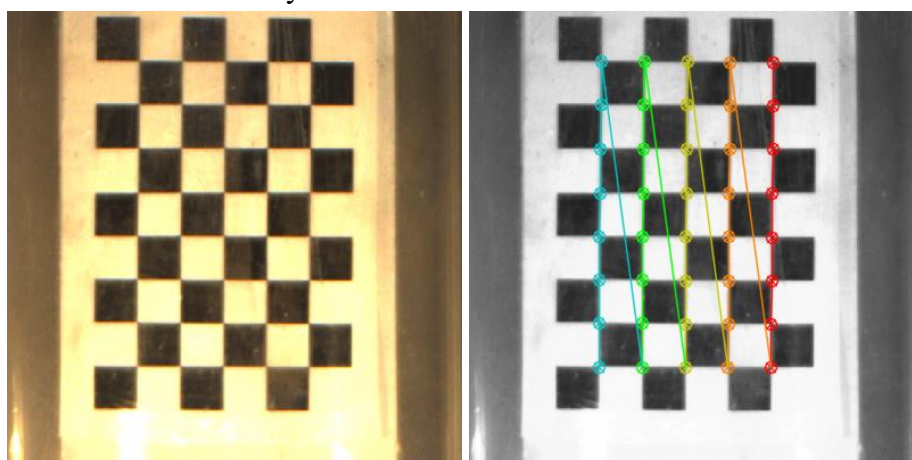
Na původním snímku 5.1 bylo ručně napočítáno 108 kuliček. Po ořezu jich na předzpracovaném snímku 5.3 zbude 89. Programově jich bylo před dodatečným rozdělením detekováno 71 (viz obrázek 5.9 vpravo), po dodatečném dělení 82. Rozdíl mezi skutečným a detekovaným počtem kuliček činí necelých 8 %. Tuto odchylku lze přisoudit překrývajícím se kuličkám, které je obtížné z důvodu nedostatku dopadajícího světla detekovat. Výsledný graf poloměru kuliček v pixelech je na obrázku 5.11. Na grafu je dobře patrné maximum, které bylo možné očekávat vzhledem k faktu, že pro testování byly použity kuličky stejného poloměru. Pro přepočet pixelů na milimetry je nutné provést kalibraci kamery, čímž se zabývá kapitola 5.9.



Obrázek 5.11 Výsledný graf velikosti poloměru kuliček

5.9 Přesun a kalibrace kamery

Kamera byla přesunuta ze stativu na měřicí rám tak, aby snímaná scéna pokrývala horní část průhledné roury a aby tato roura zabírala většinu snímané scény. Tento krok umožnil provedení kalibrace kamery, která je platná pro danou pozici kamery vzhledem ke scéně. Podle kapitoly 2.4 bylo vysokorychlostní kamerou nasnímáno několik obrázků šachovnice o rozměru 6x9 polí (příklad viz obrázek 5.12). Šachovnice byla na snímcích umístěna postupně tak, aby pokryla celou plochu tubusu, kterou padají částice. V jazyce C# byl vytvořen program sloužící ke kalibraci kamery. Zjednodušeně, na vstupních snímcích je pomocí knihovných funkcí OpenCV provedena binarizace, detekce rohů šachovnice a výpočet koeficientů distorze a matice kamery. Výsledky jsou uloženy ve formě textového souboru pro načtení detekčním algoritmem, který na jejich základě provádí korekci distorze snímaných obrázků.

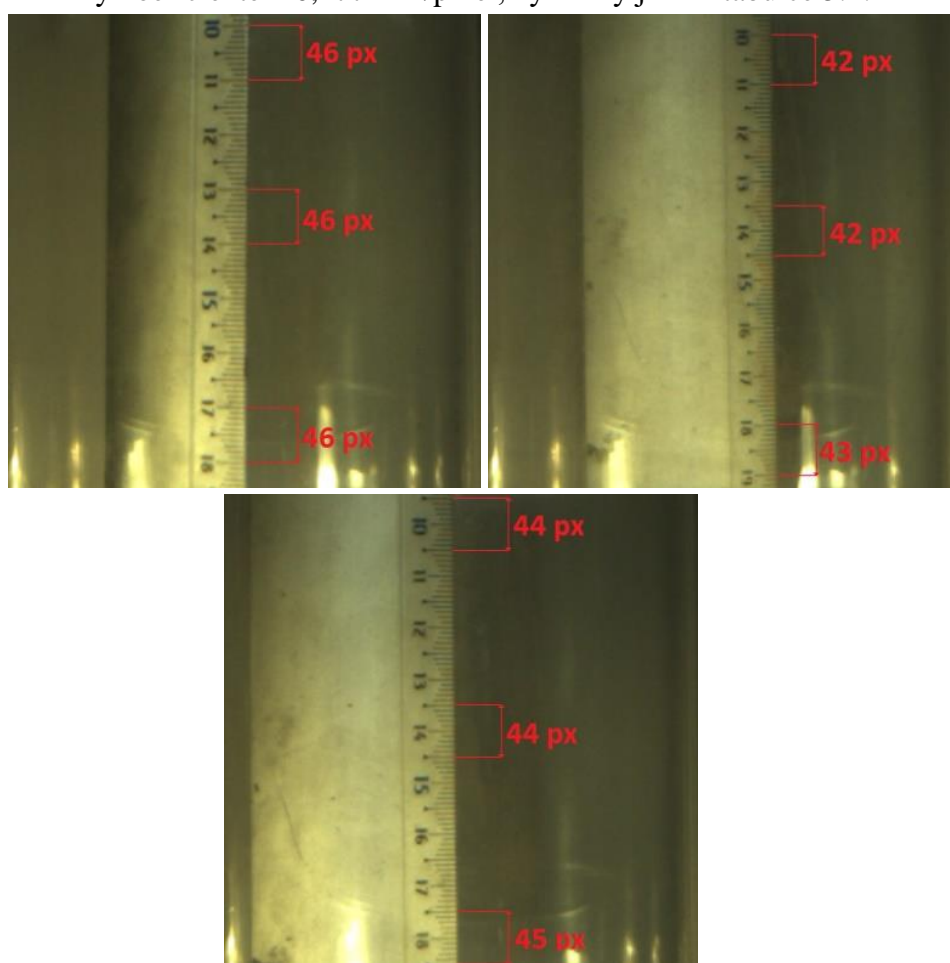


Obrázek 5.12 Kalibrační šachovnice: vstup a detekované rohy

Kromě toho byl v rámci kalibračního algoritmu také určen převodní koeficient pro přepočet pixelu na milimetry, jehož znalost je klíčová právě pro požadované měření velikosti částic v reálných jednotkách. Ze souřadnic nalezených rohů políček (po aplikaci zjištěné transformace) byla určena průměrná velikost políčka na daném snímku v pixelech. Ta byla na základě změřené velikosti políčka v milimetrech přepočítána a tím bylo zjištěno, kolika milimetrům odpovídá jeden pixel obrazu. Pro danou kalibrační sadu obrazů má tento převodní koeficient hodnotu 0,277 mm/pixel.

5.9.1 Ověření platnosti koeficientu

Vzhledem k tomu, že byla kalibrace kamery i výpočet koeficientu prováděna uprostřed (vzhledem k průřezu) měřicí roury, bylo zapotřebí ověřit platnost vypočteného převodního koeficientu pro hraniční případy v přední a zadní části měřicí roury. K tomu účely byly vysokorychlostní kamerou pořízeny tři snímky pravítka v přední, střední a zadní části průřezu měřicího tubusu. Na nich bylo manuálně určeno, kolika pixelům odpovídá 1 cm pravítka tak, jak ukazují snímky na obrázku 5.13. Tyto zjištěné hodnoty byly vynásobeny koeficientem 0,277 mm/pixel, výsledky jsou v tabulce 5.1.



Obrázek 5.13 Počet pixelů – přední (levý), zadní (pravý) a střední (spodní) část měřicí roury

Tabulka 5.1 Přepočít pixelů na milimetry

Počet pixelů	42	43	44	45	46
Převod na délku [mm]	9,534	9,761	9,988	10,215	10,442

Výše provedené výpočty ukazují, že rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou přepočtu v tabulce 5.1 je zhruba 1 mm. Za účelem zpřesnění výsledku určení velikosti částic bylo přistoupeno k úpravě převodního koeficientu. Rozhodující totiž je, aby přepočít byl nejpřesnější tam, kde bude detekováno nejvíce částic (tedy tam, kde jsou nejlépe osvětleny), tzn. mezi přední stranou a středem roury. Pro tyto dva případy byl určen aritmetický průměr počtu pixelů na 1 cm (z levého horního a spodního snímku na obrázku 5.13) jako 45,17. Vydělením 10 mm tímto průměrem se získá koeficient 0,221 mm/pixel.

5.10 Finalizace osvětlení

Způsob osvětlení scény měl nevyhovující podobu (i když fungoval). Světla nebyla pevně spojena s měřicím rámem, což značně znesnadňovalo manipulaci s pracovištěm a také snižovalo opakovatelnost snímání. Proto bylo zapotřebí navrhnout osvětlení, které by zachovávalo principy z vytvořeného prototypu, ale potlačilo jeho nedostatky. Mezi kameru a rouru byla přidána přepážka s otvorem pro snímání, na kterou byly přilepeny LED pásy s difuzní vrstvou (viz obrázek 5.14 vlevo). Umístěny jsou po celém obvodu snímacího otvoru, tedy do obdélníku. Pohled kamery na měřicí rouru přes otvor v přepážce je na obrázku 5.14 vpravo.



Obrázek 5.14 Přepážka s LED pásy (vlevo) a pohled od kamery (vpravo)

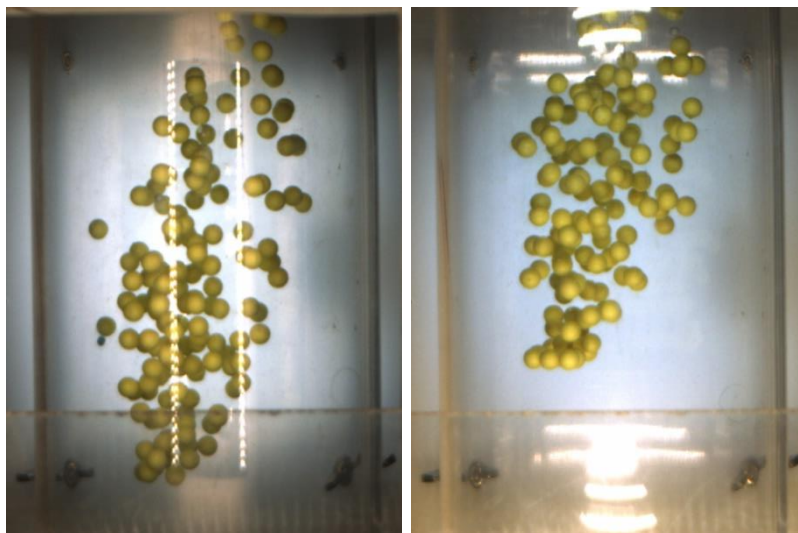
5.10.1 Odlesky

Ukázalo se, že ani difuzní fólie nezabránila vzniku odlesků na průhledné rouře, jak ukazuje obrázek 5.15. Proto byla pořízena lineární polarizační fólie, se kterou bylo provedeno několik experimentů. Dvojice fólií byly postupně umístěny před LED pásky a objektiv, před LED pásky a před rouru, za rouru a před objektiv. Dále byl umístěn polarizační filtr pouze před objektiv. Žádná z konfigurací ale požadovaným způsobem nepotlačila odlesky. Buď došlo k odfiltrování veškerého světla z LED pásky, nebo žádného.

To, že světlo po odrazu nebylo polarizované, pravděpodobně souvisí s tím, jak polarizace odrazem vzniká. Při dopadu světelného paprsku na materiál dochází k úplné polarizaci pouze pro takzvaný Brewsterův úhel

$$\operatorname{tg} \alpha_B = \frac{n'}{n} \quad (5.5),$$

kde n je index lomu prostředí, ze kterého se světlo šíří, a n' je index lomu prostředí, na které světlo dopadá. [32] Dosazením indexu lomu plexiskla 1,48 do čitatele a indexu lomu vzduchu 1,00026 do jmenovatele lze vypočítat pro plexisklo Brewsterův úhel od kolmice dopadu zhruba jako $55,6^\circ$ [33]. Jelikož má ale použitá roura kruhový průřez, dopadá na něj světlo pod výrazně nižšími úhly dopadu, a tak je odražený paprsek světla polarizovaný pouze slabě. Potlačení odlesků tak bylo provedeno přesunem vertikálních LED pásků do horizontální polohy do druhé řady. Snímaný obraz s takovýmto osvětlením je na obrázku 5.15 vpravo.



Obrázek 5.15 Odlesky na měřicí rouře – před (vlevo) a po přesunu (vpravo)

6. TESTOVÁNÍ NA KERAMZITU

Poté, co byla ověřena funkčnost navrženého algoritmu na plastových kuličkách a poté co byla provedena kalibrace kamery a úprava formy osvětlení bylo přistoupeno k testování na částicích keramzitu. Oproti kuličkám, které mají pravidelný tvar a lesklý a hladký povrch, jsou částice keramzitu matné, méně reflektivní, pórovité a mají nepravidelný tvar. Tyto vlastnosti zvyšují obtížnost spolehlivé detekce. K dispozici bylo několik velikostí částic keramzitu, které byly do jednotlivých velikostních intervalů rozděleny metodou přesívání (viz kapitola 1.2.1). Modifikacemi, které bylo nutné na hardwaru i softwaru provést, aby fungoval i na částicích keramzitu, se věnují následující podkapitoly.

6.1 Testování osvětlení

Z obrázku 6.1 vlevo, na kterém jsou padající částice keramzitu zachycené vysokorychlostní kamerou, je patrné, že intenzita osvětlení je pro tento materiál nedostačující. Na snímku nejsou rozpoznatelné hranice jednotlivých částic. Bylo tedy zapotřebí scénu výrazně více osvětlit.

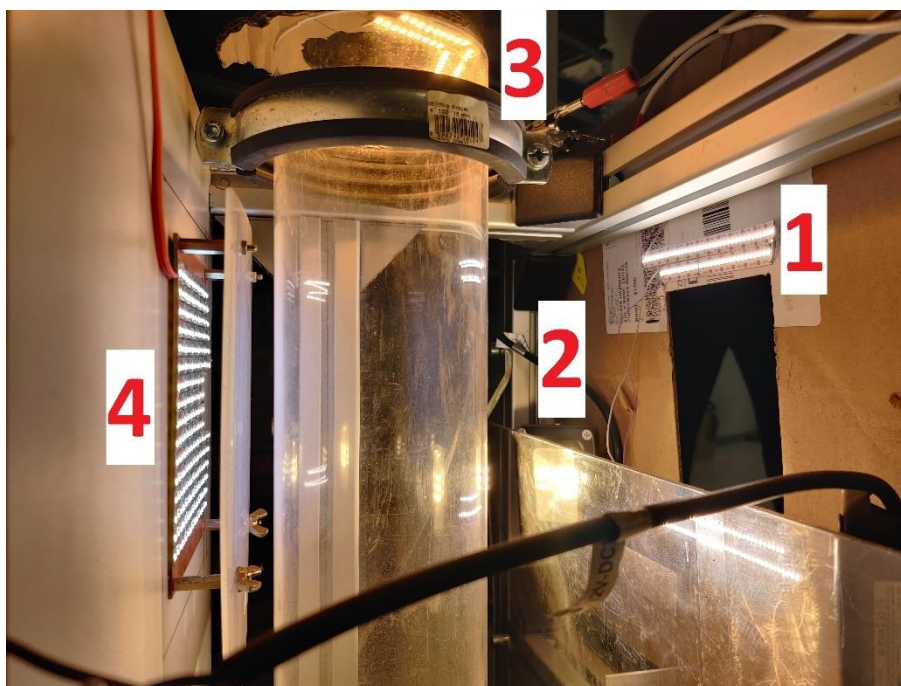


Obrázek 6.1 Padající keramzit – před (vlevo) a po (vpravo) úpravě osvětlení

Jak ukazuje obrázek 6.2 (legenda k očíslovaným světlům viz tabulka 6.1), byly přidány dva postranní LED reflektory (zleva a zprava) tak, aby odlesky, které na rouře způsobí, nezasahovaly do centrální detekční oblasti. Dále byl přidán horní osvit ve formě LED pásků připevněných na kruhové přepážce s otvorem pro průlet částic, který je uchycen u horního vstupu do měřicí roury. LED diody tedy svítí přímo dovnitř do roury. V tabulce 6.1 jsou k jednotlivým LED prvkům uvedeny použité parametry napájení. Na obrázku 6.1 vpravo je pak výsledný snímek padajícího keramzitu.

Tabulka 6.1 Parametry napájení použitých světel

Číslo	Typ	I (A)	U (V)	P (W)
1	Přední panel	0,5	10,0	5,0
2	Reflektor	0,6	24,0	14,4
3	Horní půlkruh	0,5	12,0	6,0
4	Zadní panel	0,1	8,5	0,85



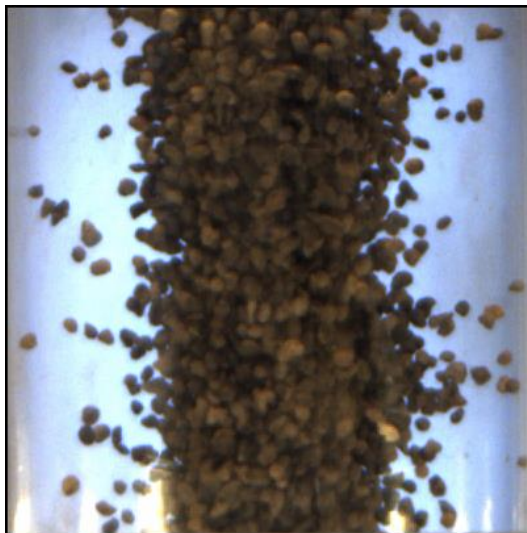
Obrázek 6.2 Osvětlení na měřicím stanovišti

6.2 Testování detekce částic

Po vylepšení osvětlení bylo možné přistoupit k samotnému otestování algoritmu pro detekci a určení velikosti částic na vzorcích keramzitu. Po úvodní sérii detekcí bylo patrné, že algoritmus stále detekuje částice s neuspokojivou úspěšností. Selhávalo hledání lokálních maxim (viz kapitola 5.4) a také určování oblastí watershed metodou (viz kapitola 5.6).

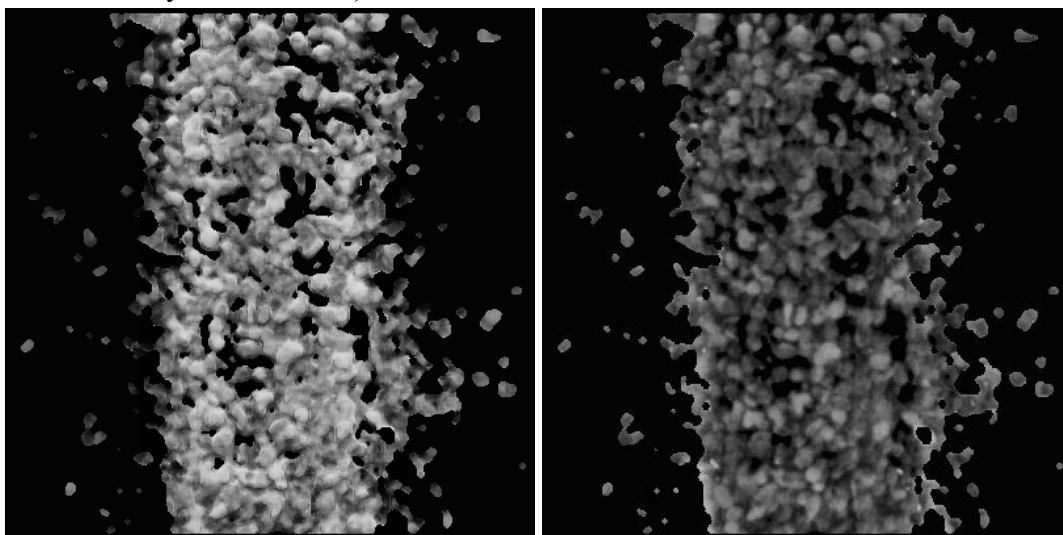
Proto v něm bylo upraveno několik částí. Z datových důvodů byla nastavena vysokorychlostní kamera tak, aby snímala jenom nastavenou oblast zájmu. To také umožnilo pevné nastavení snímkovací frekvence na 145 snímků/s, což je vyšší než výrobcem udávaná hodnota 122 snímků/s. Čím méně pixelů na jeden snímek totiž kamera pořizuje, s tím rychlejší frekvencí může tyto snímky pořizovat. Výsledný ořez je na obrázku 6.4. Další modifikací je odstranění ze vstupního snímku kromě pozadí také tu vrstvu částic, která není přímo osvětlena žádným z LED světel. Na ilustračním obrázku

6.3 se jedná o ty oblasti v proudu padajících částic, které jsou tmavé. Kvůli nedostatečnému osvětlení totiž částice nemají patrné hranice, což znemožňuje jejich další algoritmickou segmentaci. Odstranění je provedeno na základě prahování value složky v HSV reprezentaci vstupního snímku. Výsledek je vidět na obrázku 6.4, kde černá místa v proudu částic vznikla právě tímto prahováním.



Obrázek 6.3 Vstupní snímek zrn keramzitu

Dále bylo experimentálně zjištěno, že saturation složka obrazu s odstraněným pozadím je vhodnější pro hranovou detekci a následné hledání maxim než prostá šedotónová reprezentace. Na obrázku 6.4 je vidět právě toto srovnání. Na saturation složce na levém snímku jsou lépe patrné hranice jednotlivých částic (jas se na hranici mění skokově) a zároveň je také potlačena pórovitost padajícího materiálu (jas v rámci jedné částice se výrazně nemění).



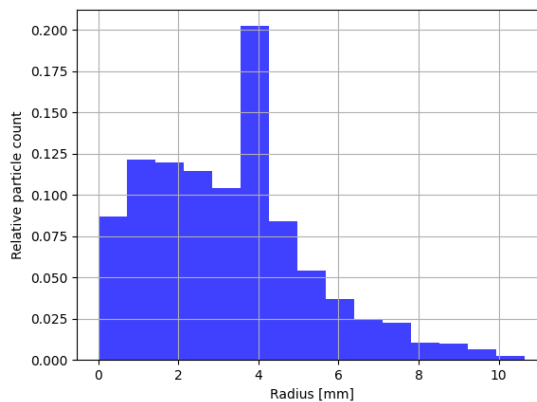
Obrázek 6.4 Zrna keramzitu – saturation složka (vlevo) a šedotónová reprezentace (vpravo)

6.3 Detekce počtu částic na individuálních snímcích

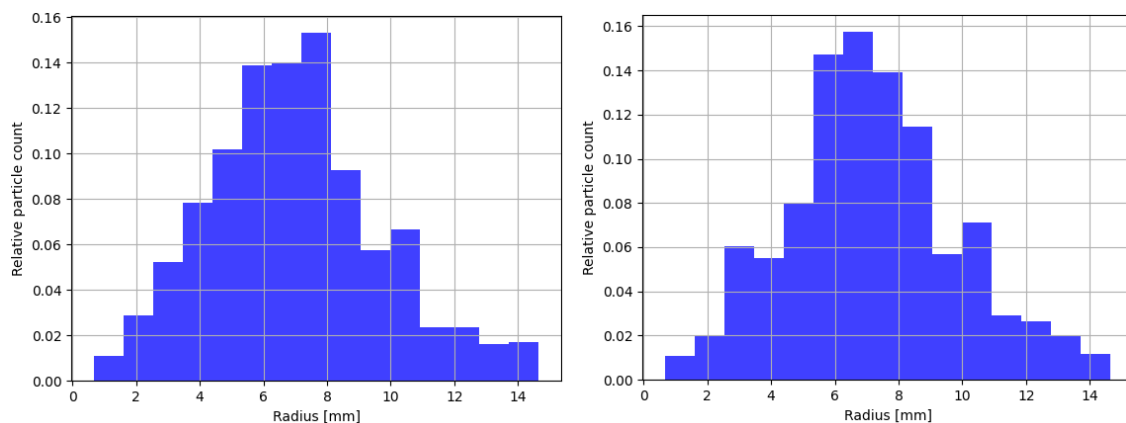
Na jednotlivých snímcích je určován celkový počet nalezených částic při finálním dělení nalezených částic (viz kapitola 5.7). Počítají se ty částice, které mají validní průměr, tedy ty, které leží v uživatelem zadaném intervalu velikosti. Jednotlivé počty pro dílčí snímky jsou dále ukládány do vektoru pro pozdější určení celkového počtu padajících částic (viz kapitola 6.6.2).

6.4 Detekce velikosti částic na individuálních snímcích

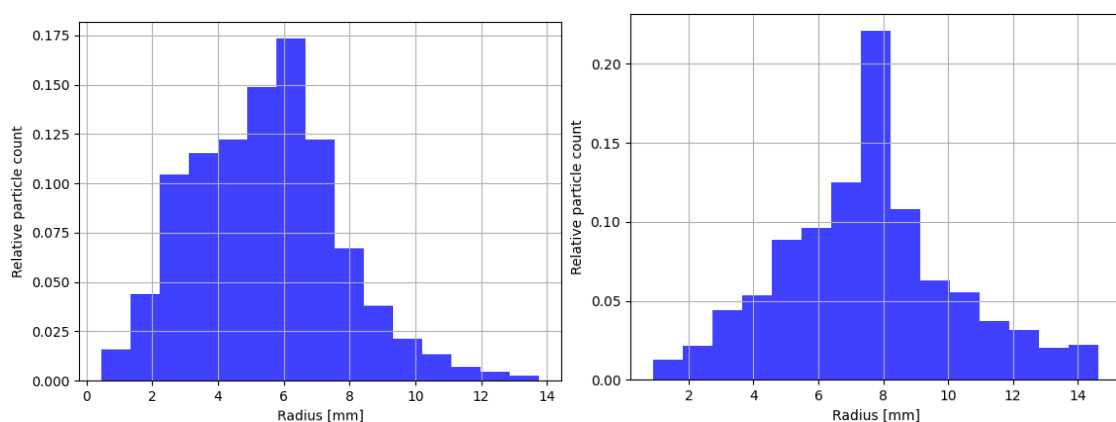
Pro plastové kuličky se kvůli jejich tvaru určovala velikost z poloměru opsané kružnice (viz kapitola 5.7). Pro keramzit bylo vzhledem k podlouhlosti jeho zrn rozhodnuto, že velikost bude vhodnější určovat podle délky hlavní osy opsané elipsy. Pro ověření této teorie byla dále velikost částic algoritmicky určena z opsaných kružnic, vedlejších poloos opsané elipsy a z délek stran opsaného obdélníku. Srovnání histogramů vytvořených z takto určených vzdáleností ze souboru částic keramzitu o známé velikosti zjištěné metodou přesívání (viz kapitola 1.2.1) je na obrázcích 6.5, 6.6 a 6.7. V tomto případě byl měřen keramzit o velikosti zrn 7,1 – 8 mm. Z grafů je patrné, že očekávaný extrém pro interval velikosti částic je v odpovídajícím binu nejlépe zachycen právě na histogramu určeném z délky hlavní poloosy opsané elipsy (na obrázku 6.7). Zároveň je na tomto histogramu patrný i strmý pokles binů okolo maxima.



Obrázek 6.5 Velikost částic – opsaná kružnice



Obrázek 6.6 Velikost částic – strany opsaného obdélníku



Obrázek 6.7 Velikost částic – vedlejší (vlevo) a hlavní (vpravo) osa opsané elipsy

6.5 Detekce rychlosti pádu částic

Očekávanou rychlost částic lze určit ze zákona zachování energie za předpokladu zanedbání odporu vzduchu. Pro energii částice těsně před otevřením elektromagnetických dvířek a v momentu průletu před objektivem kamery platí rovnost

$$E_{P1} + E_{K1} = E_{P2} + E_{K2} \quad (6.1).$$

Částice se před otevřením dvířek nepohybuje, tedy její kinetická energie E_{K1} je nulová. Dosazením za energie do rovnice (6.1) a úpravou vznikne

$$mgh = mgh_1 + \frac{1}{2}mv^2 \rightarrow v = \sqrt{2g(h - h_1)} \quad (6.2),$$

kde m je hmotnost částice (lze vykrátit), g je konstanta tíhového zrychlení, h je výška měřená mezi částicí v zásobníku a podložkou a h_1 je výška měřená mezi středem snímané oblasti a podložkou. Pro výšku h měřenou od magnetických dvířek zásobníku rychlost průletu částice před kamerou vychází 2,43 m/s. Pro výšku h měřenou z horní hrany zásobníku rychlost vychází 4,20 m/s.

Rychlost padajících částic před objektivem kamery by bylo možné počítat také dle vzorce pro rovnoměrně zrychlený pohyb s nulovou počáteční rychlostí

$$v = gt \quad (6.3),$$

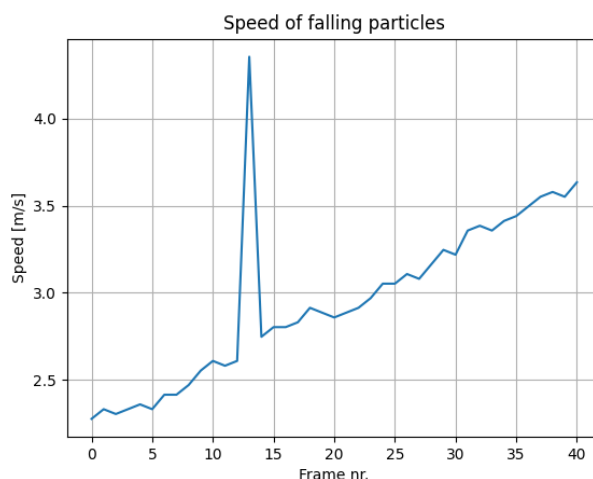
kde g je tíhové zrychlení a t je doba pohybu (pádu). Po vypočtení doby pádu ze známé uražené dráhy částic v nejnižší a nejvyšší části zásobníku by rychlost vycházela shodně s výsledky z rovnice (6.2). Dosazováním dostatečného počtu časových údajů a vynesemím do grafu ale lze z rovnice (6.3) určit průběh, které by algoritmicky určené hodnoty neměly přesahovat.

Detekce rychlosti pádu částic probíhá na dvou po sobě jdoucích snímcích. Výpočet potřebného časového intervalu mezi dvěma po sobě jdoucími snímky vychází ze znalosti snímkovací frekvence kamery, která je před každým měřením pevně nastavena. Poté lze dosazením frekvence 145 snímků/s (vyšší než výrobcem udávaných 122 snímků/s z důvodu využití funkce snímání s aplikovaným ořezem scény) do rovnice

$$t = \frac{1}{f} \quad (6.4),$$

zjistit, že hledaný časový interval je roven 0,0069 s.

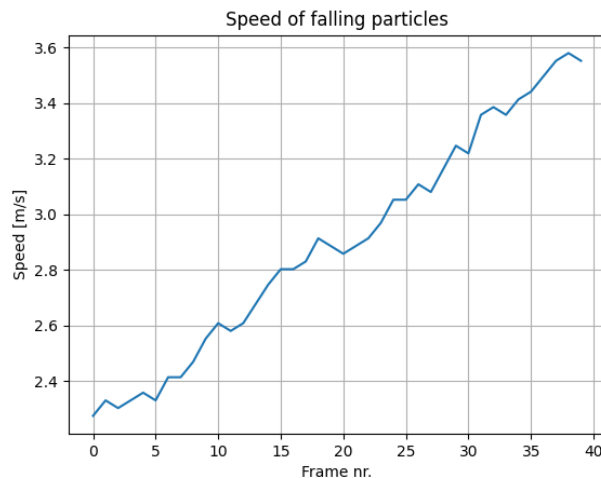
Dalším potřebným údajem pro vypočtení rychlosti pádu je dráha, kterou jednotlivé částice urazí mezi dvěma po sobě jdoucími snímky. Spíše než obtížnou detekcí odpovídajících si částic na po sobě jdoucích snímcích, je rychlost počítána pro jednotlivé bloky částic, které jsou na snímcích hledány pomocí pixelové korelace. Tím se zjistí souřadnice pro aktuální a předchozí polohu, z čehož lze určit dráhu, kterou daný blok částic v pixelech mezi dvěma snímky urazil. Pomocí převodního koeficientu pixelů na milimetry z kapitoly 5.9 se z tohoto údaje dopočítá, kolik milimetrů částice urazily za časový interval mezi dvěma po sobě jdoucími snímky. Z toho lze pak dosáhnout přepočtu na m/s.



Obrázek 6.8 Graf rychlosti pádu částic s odlehlým bodem

Na obrázku 6.8 je graf zobrazující rychlost pádu částic. Na ose x jsou vynesena čísla snímků, na kterých byla daná rychlost zjištěna. Je vidět, že naměřená rychlost v počátku grafu zhruba odpovídá teoretické hodnotě 2,43 m/s spočtené dle rovnice (6.2). Naměřená rychlost na 40. snímku je sice nižší, než spočtených 4,20 m/s pro částice padající od horní hrany zásobníku, to lze ale přisoudit tomu, že zásobník nebyl po tuto hranici naplněn. Mezi snímky 10 a 15 je v grafu vidět bod, pro který byla vypočtena skokově jiná hodnota. To bylo způsobeno nalezením falešného maxima obrazovou korelací. Aby se výskyt těchto odlehlých bodů (outliers) v grafu eliminoval, byl implementován algoritmus na jejich odstranění na základě maximální povolené změny rychlosti mezi dvěma po sobě jdoucími snímky.

Při určování této hodnoty lze vycházet ze směrnice přímky vypočtených hodnot rychlosti, která představuje horní limit pro algoritmicky určené rychlosti na grafu 6.10. Směrnice odpovídá rovnici (6.3) s dosazením hodnoty $9,81 \text{ m/s}^2$ za tíhové zrychlení g . Potom maximální očekávaná změna rychlosti mezi dvěma snímky zjištěná dosazením času mezi dvěma snímky vychází po zaokrouhlení $0,0677 \text{ m/s}$. Při použití takto přísné hraniční hodnoty by mohlo docházet k odstraňování i platných bodů. Proto byla maximální povolená hodnota změny rychlosti mezi dvěma po sobě jdoucími snímky určena jako pětinásobek této hodnoty, tedy $0,3385 \text{ m/s}$. Na grafu na obrázku 6.9 je vidět výsledek odstranění odlehlých bodů určenou hraniční hodnotou.

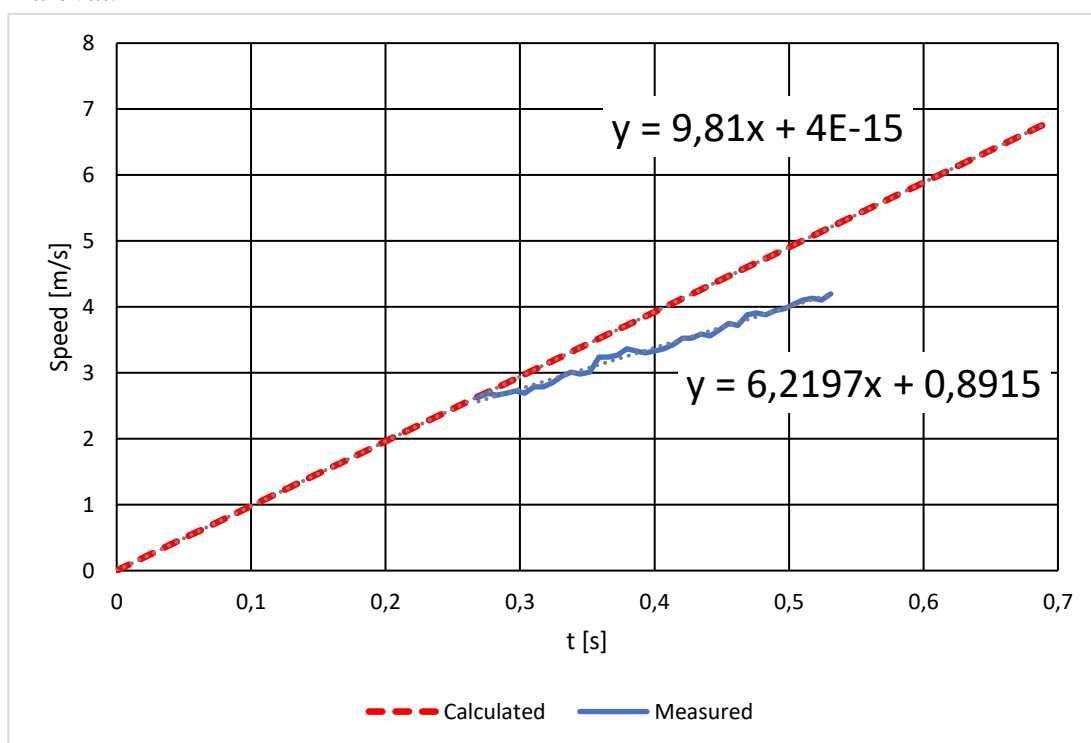


Obrázek 6.9 Graf rychlosti pádu částic po odstranění odlehlých bodů

6.5.1 Ověření vypočtené rychlosti

Na grafu na obrázku 6.10 je vynesena průběh vypočtených hodnot rychlosti dle rovnice (6.3) a algoritmicky určených hodnot dle navrženého algoritmu. Na ose x byl proveden přepočítání čísla snímku na časový údaj. Vzhledem k tomu, že na měřicím přípravku nebyla zprovozněna synchronizace spuštění záznamu kamery a otevření magnetických dvířek zásobníku, není možné přesně určit, kdy přesně byla magnetická dvířka otevřena. Souvislá čára, která představuje změřený průběh, byla tedy umístěna na osu x tak, aby její začátek odpovídal vypočtené rychlosti v daný okamžik. Ve skutečnosti ale mohou z

tohoto důvodu být vůči sobě na ose x oba průběhy posunuty. Z grafu je však patrné, že teoretické hodnoty mají mírně strmější průběh než ty určené algoritmicky. Hodnota tíhového zrychlení, odečtená z rovnice přímky lineárního proložení průběhu hodnot (na grafu šedou tečkovanou čarou), vychází pro naměřený průběh $9,81 \text{ m/s}^2$. Pro určený průběh rychlosti vyšla hodnota zrychlení $6,2197 \text{ m/s}^2$. Rozdíl mezi hodnotami mohl vzniknout z několika důvodů. Jednak byl při výpočtu zanedbán odpor vzduchu. Další chybu do určení vnáší pixelové nepřesnosti zjišťování rychlosti na základě korelace snímků. V neposlední řadě je možné, že částice padají pomaleji, protože než vletí do měřicí trubice, musí nejprve projít zúžením v místě instalace horního osvětlovacího LED panelu. Částice ve zúžení mohou do sebe nebo do stěn trubice více narážet a tím zpomalovat.

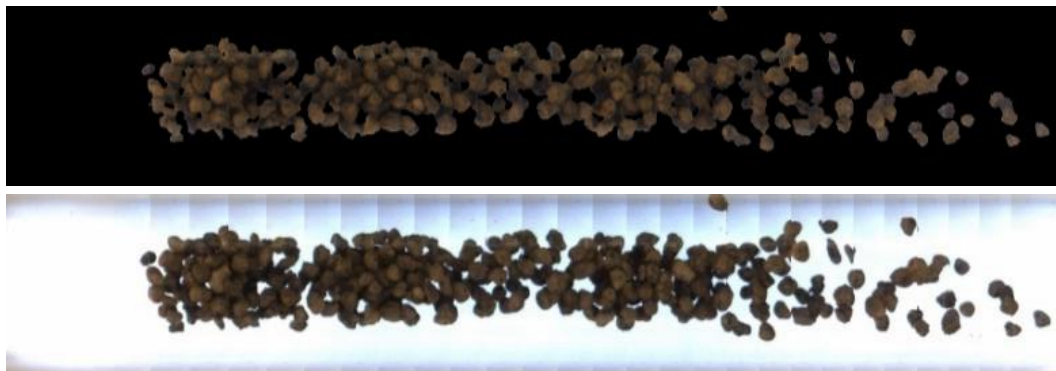


Obrázek 6.10 Graf vypočtené a změřené rychlosti částic

6.6 Detekce celkového počtu částic

Pomocí korelování bloků částic, které bylo využito pro výpočet rychlosti v kapitole 6.5, lze sestavit reprezentaci zobrazující celý soubor částic, který postupně proletěl před kamerou. Příklad takového zobrazení je na obrázku 6.11 (obrázek je rotován o -90° , první padající částice jsou tedy vlevo). Na dvou po sobě jdoucích snímcích jsou nalezeny odpovídající si oblasti, a do výstupního snímku je zkopírována ta část aktuálního snímku, která se nachází nad detekovaným blokem, tedy ta část aktuálního snímku, která se na výstupním snímku ještě nenachází. Referenční blok částic je z předchozího snímku vybrán vždy ze stejné pozice a mrak částic se formuje do té doby, dokud se v této oblasti

nachází nějaké padající částice. Z takto zpracovaných výsledků lze určit celkový počet částic dvěma způsoby, které budou vysvětleny v následujících podkapitolách.



Obrázek 6.11 Mrak letících částic – předzpracovaný (vlevo) a původní (vpravo) (rotace o -90°)

6.6.1 Opětovná detekce min max filtrem

Na přehledový obraz všech částic (viz 6.11) je možné opět aplikovat metodu určení středů jednotlivých částic (viz kapitola 5.4). Kvůli pórovitosti keramzitu docházelo k detekci několika maxim pro jednu částici, i přes experimenty s více barevnými složkami a různým nastavením parametrů samotné min max filtrace (vzdálenost maxim, pokles hodnoty okolních maxim). Jelikož je výsledek zjišťován přímo pouze touto metodou, lze očekávat, že bude zatížen chybou.

6.6.2 Poměrný součet z dílčích počtů částic

Druhým možným způsobem je využit počty částic na jednotlivých snímcích po provedení závěrečného dělení (viz kapitola 5.7). Z korelačního algoritmu lze určit, jak velký obrazový blok byl do výsledné reprezentace z daného snímku převzat. Tedy pro každý snímek se určí poměr převzatých ku celkovému počtu pixelu výšky obrazu. Tímto koeficientem se potom vynásobí počet částic na daném snímku a provede se součet přes všechny snímky, které obsahují částice. Lze předpokládat, že tento algoritmus bude počet částic spíše podhodnocovat, kvůli tomu, že v potaz se budou brát pouze validní částice z jednotlivých snímků, které prošly celým řetězcem zpracování.

6.6.3 Validace výsledků

Oba algoritmy byly srovnány následujícím způsobem. Metodou přesívání byly rozděleny částice keramzitu do intervalů velikosti 7,1 – 8 mm a 5 – 6,3 mm. Odtud bylo ručně napočítáno pro každý z intervalů 300 částic. Pro částice z těchto dvou intervalů odděleně bylo poté zaznamenáno 10 průletů před vysokorychlostní kamerou a na těchto datech byl spuštěn navržený algoritmus. Celkový počet částic pro každé z 10 opakování byl určen metodou opětovné detekce min max filtrem a metodou poměrného sčítání dílčích počtů částic. Výsledky jsou v tabulce 6.2.

Tabulka 6.2 Srovnání počtu detekovaných částic různými metodami

Číslo měření	Min max filtr		Součet dílčích počtů	
	5 – 6,3 mm	7,1 – 8 mm	5 – 6,3 mm	7,1 – 8 mm
1	249	304	213	257
2	186	360	224	284
3	226	327	229	256
4	214	370	209	314
5	237	336	229	309
6	219	332	221	308
7	204	390	227	355
8	206	349	220	331
9	195	354	212	350
10	215	328	202	322
Průměr	215,1	345,0	218,6	308,6

Pro jednotlivé sloupce je v posledním řádku vypočten aritmetický průměr. Je patrné, že metoda prosté min max filtrace počty částic silně nadhodnocuje (pro interval 7,1 – 8 mm bylo detekováno průměrně 345 částic), ale i podhodnocuje (pro interval 5 – 6,3 mm bylo detekováno průměrně 215 částic). Výsledek součtu dílčích počtů částic oproti tomu poskytuje důvěryhodnější výsledky. Počty částic totiž nevychází pouze z jediné metody určení, jak je tomu v případě min max filtrace, ale celkový počet částic je určen proporčně ze zpracovaných počtů na jednotlivých snímcích (viz kapitola 6.3). Pro měřené intervaly bylo napočítáno průměrně 219, respektive 309 částic. Vyšší počet pro interval 7,1 – 8 mm je způsoben tím, že detekce na jednotlivých snímcích vychází také z min max filtru, byť se podrobuje dalšímu zpracování.

6.7 Detekce velikosti částic

Souhrnný histogram celkové velikosti částic je vytvořen ze součtu počtů částic dané velikosti přes všechny vstupní snímky. Pro jednotlivé snímky jsou počty částic určeny metodou vysvětlenou v kapitole 6.4. Získaný absolutní počet částic je poté převeden na relativní.

6.7.1 Validace výsledků

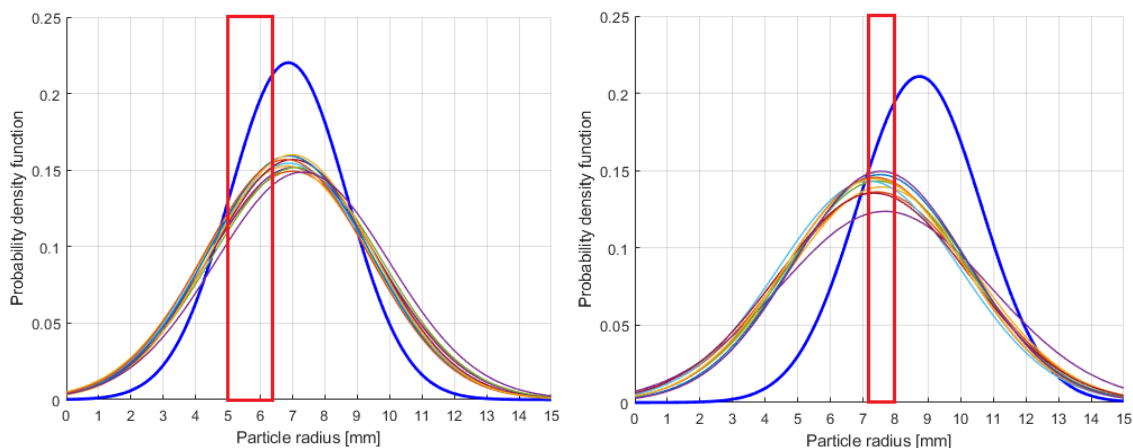
Validace výsledků detekce velikosti částic probíhala následujícím způsobem. Z každé ze dvou skupin 300 částic o velikostech 5 – 6,3 mm a 7,1 – 8 mm bylo náhodně vybráno 30 částic. Pomocí posuvného měřidla byl změřen jejich maximální a minimální průměr. Výsledky měření jsou v přílohách práce v tabulce A.1. Z tabulky je možné pro lepší

vizualizaci sestrojít pro každý interval velikosti částic graf minimálního a maximálního naměřeného průměru. Pro interval 5 – 6,3 mm a 7,1 – 8 mm jsou grafy v přílohách A.2 a A.3. Je z nich patrné, že pod horní mezí intervalu prosetí se pohybuje minimální rozměr částice. Maximální rozměr mnohdy přesahuje tuto horní mez o jednotky milimetrů. Obdobný trend lze sledovat i pro dolní mez a minimální rozměr, kdy opět nejmenší velikost částice je nižší než spodní hranice intervalu. Tyto výsledky lze očekávat vzhledem k principu metody prosévání, kdy záleží, jakou stranou se podlouhlá částice na sítu natočí. Zároveň lze na grafech určit i „kulatost“ částic, kdy čím blíže jsou k sobě pro danou částici v grafu minimum a maximum, tím kulatější měla částice tvar.

K lepší vizualizaci kulatosti částice slouží grafy, na kterých je vyneseno pro jednotlivé částice rozdílné maximálního a minimálního průměru z tabulky A.1. Pro interval velikosti 5 – 6,3 mm a 7,1 – 8 mm je lze najít v přílohách A.4 a A.5. Je z nich vidět, že některé částice mají takřka kulovitý tvar, kdy rozdíl dosahuje necelého 1 mm. Oproti tomu maximální rozdíl velikostí částic přesahuje 6 mm, tyto mají podlouhlý tvar. Tímto měřením tedy bylo určeno, že některé částice nejsou kulovité a právě různé natočení těchto částic při průletu měřicí rourou bude zkreslovat celkový výsledek. Tímto byl také znovu potvrzen výběr elipsy pro určení velikosti částic z kapitoly 6.4.

Při snaze porovnat naměřené velikosti částic posuvným měřidlem a velikosti určené navrženým algoritmem využívajícím počítačového vidění bylo postupováno následovně. Pro obě skupiny 300 částic ze dvou intervalů velikosti bylo provedeno 10 měření vysokorychlostní kamerou. Pro každý z běhů byl sestrojen histogram a pomocí Matlab funkce histfit byl aproximován Gaussovou křivkou. Takto vzniklých 10 křivek pro každý interval velikosti bylo vyneseno na jeden graf. Z maxim a minim z tabulky v příloze A.1 byl sestrojen společný histogram. Opět pomocí Matlab funkce histfit jím byla proložena Gaussova křivka. Spojení rozměrů do jediného histogramu je založeno na předpokladu, že orientace částice v měřicí rouře je náhodná. Tedy pravděpodobnost naměření určité velikosti částice (odpovídající určitému natočení) navrženým algoritmem je pro celý interval mezi minimálním a maximálním rozměrem stejná. Tím, že byly normálním rozložením aproximovány limitní rozměry částice, je jím pokryta i jakákoliv náhodně naměřená velikost částice mezi nimi. A právě tyto velikosti s náhodnou orientací částice měří detekční algoritmus.

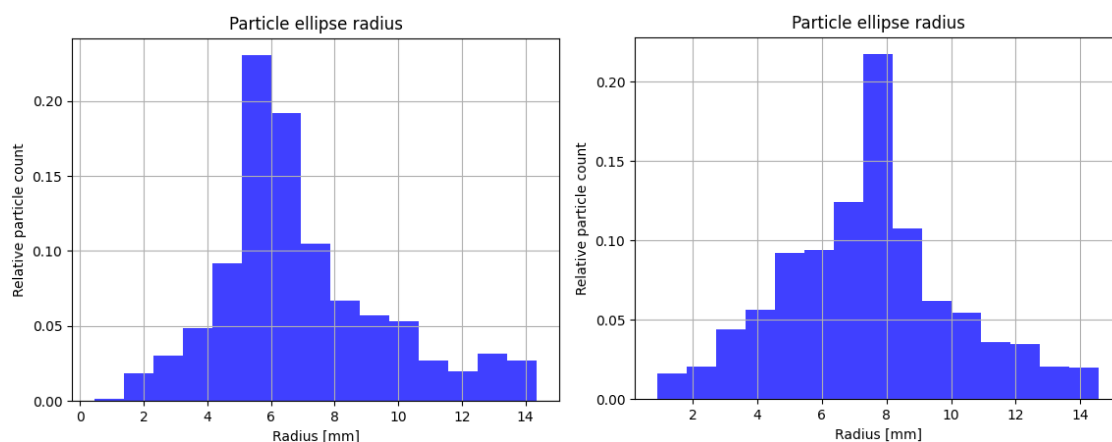
Nyní lze tedy tyto Gaussovy křivky porovnat s těmi zjištěnými z výsledků 10 měření souboru 300 částic. Výsledné grafy pro oba intervaly velikosti částic jsou na obrázku 6.12. Na ose y se nachází probability density function (= PDF, hustota rozdělení pravděpodobnosti). Na levém grafu jsou výsledky měření částic o velikosti 5 – 6,3 mm. Je patrné, že si naměřená data v 10 měřeních odpovídají a že nabývají maxima zhruba pro průměr 7 mm. V tomto bodě nabývá maxima také Gaussova křivka (zobrazena modrou tučnou čarou) určená z měření posuvným měřidlem. Zároveň ale velikost 7 mm leží mimo interval velikosti částic ze sít, který je na grafu znázorněn červeným obdélníkem.



Obrázek 6.12 Výsledky určení velikosti částic: 5 – 6,3 mm (vlevo) a 7,1 – 8 mm (vpravo)

Na pravém grafu na obrázku 6.12 jsou vyneseny výsledky pro interval velikosti částic 7,1 – 8 mm. Zde je vidět, že si maxima 10 měření vysokorychlostní kamerou opět odpovídají a leží zhruba v bodě 7,5 mm. Jak ukazuje červený obdélník na grafu ohraničující velikost částic dle velikosti sít, toto maximum do intervalu spadá. Oproti tomu ale maximum Gaussovy křivky pro měření posuvným měřidlem leží až kolem bodu 9 mm, tedy mimo interval prosetí.

Výsledky měření ale i tak ukazují při porovnání maxim z grafů na obrázku 6.12, že na levém byly měřeny částice menšího rozměru než na pravém. Toto srovnání je dále možné provést i mezi obrázky 6.13, které zobrazují histogramy relativního množství částic pro oba sledované velikostní intervaly. Na obou grafech je patrný vrchol v histogramu, který se nachází v očekávaném intervalu velikosti dle použitých sít. Pomocí 10 Gaussových křivek pro každý velikostní interval tak bylo určeno, že jsou výsledky měření konzistentní, a dle histogramů na obrázku 6.13 pak lze rozhodnout, že algoritmicky určená velikost částic odpovídá opravdové velikosti určené metodou přesívání.



Obrázek 6.13 Příklad histogramu velikosti částic: 5 – 6,3 mm (vlevo) a 7,1 – 8 mm (vpravo)

6.8 Vliv prašnosti

Lze rozlišit dva rozdílné způsoby vlivu prašnosti na detekční algoritmus. Buď lze zkoumat vliv prachu usazeného na čočce kamery, případně na plexiskle oddělujícím kameru od měřicího tubusu, anebo na stěně samotného tubusu. Druhý možný způsob vlivu prašnosti je přítomnost prachu ve vzorku měřených částic.

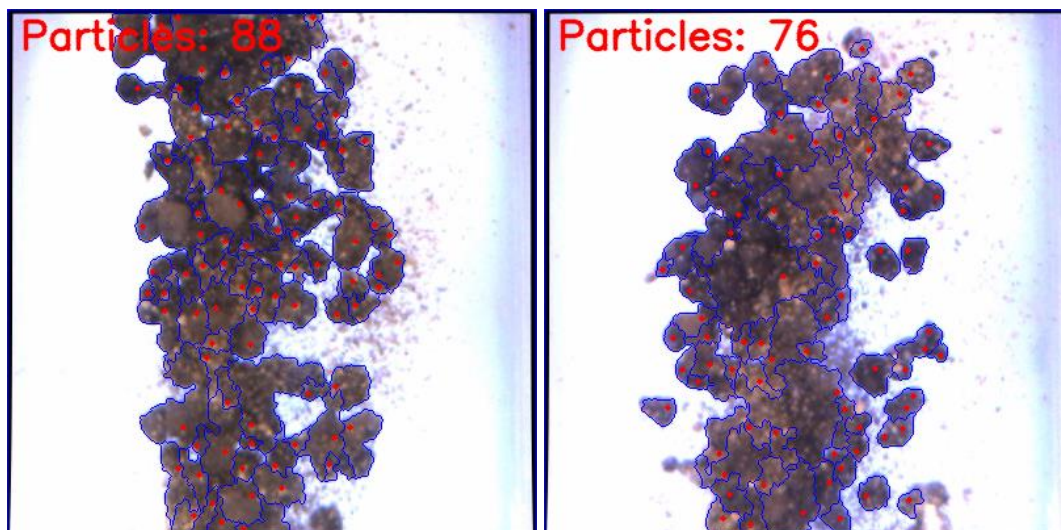
6.8.1 Usazený prach

Prach na čočce kamery a na oddělujícím plexiskle může v závislosti na jeho množství negativně ovlivnit, ba i znemožnit rozpoznávání částic. Představuje totiž překážku v cestě paprsků světla na senzor kamery, tedy tam kde je usazený prach, dojde ke ztrátě obrazové informace. Jelikož je pozadí ze snímků odstraňováno tak, že se detekuje změna oproti snímku s prázdným pozadím, došlo by na zaprášené scéně k situaci, kdy by padající částice, které způsobují na snímku změny, byly „překryty“ konstantními pixely, které obsahují prach. Potom by padající částice byla narušena černými místy, která jsou pokládána za součást pozadí. Bylo by tak detekováno více menších částic místo jedné velké. Negativně ovlivňují detekci i další vlivy s prachem spojené, jako například oděrky na plexiskle, které jsou na scéně vzhledem ke způsobu osvětlení shora viditelné.

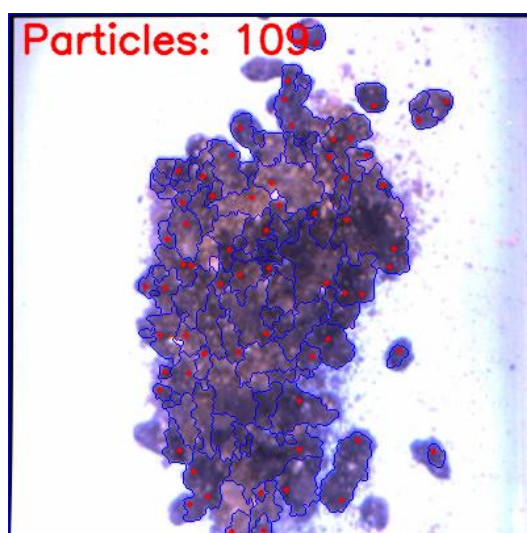
6.8.2 Prach ve vzorku částic

Míra vlivu přítomnosti prachu ve vzorku měřených částic byla prověřena experimentálně. K dispozici bylo 300 částic o velikosti 5 – 6,3 mm a 300 částic o velikosti 7,1 – 8 mm. Do každé z těchto množin bylo postupně přidáváno určité množství jemného písku, který byl vždy promíchán s částicemi. Takováto směs byla následně měřena pomocí vysokorychlostní kamery a navrženého algoritmu.

300 částic o velikost 5 – 6,3 mm vážilo 21,85 g. Postupně k nim bylo přidáno 2,5, 5 a 7,5 g částíček písku (zhruba 10 %, 20 % a 30 % původní hmotnosti vzorku). Na obrázcích 6.14 a 6.15 je patrné, jak ovlivňuje prach ve sloupci padajících částic jejich rozpoznávání. Čím více prachu je v něm, tím hůře jsou rozlišitelné hranice jednotlivých částic, protože tyto jsou vyplněny prachem. Tím dochází ke spojování sousedních částic. Zároveň ale zrníčka prachu vytváří takovou texturu, že jsou min-max filtrací (viz kapitola 5.4) detekovány jako potenciální jádra částic. To vede k tomu, že na vstupu watershed metody (viz kapitola 2.2) je mnohem více počátečních jader. V neposlední řadě také přítomnost prachu ve vzorku vede ke zhoršení osvětlení padajících částic. To způsobuje, že například na obrázku 6.15 jsou již částice i volným okem nerozlišitelné.

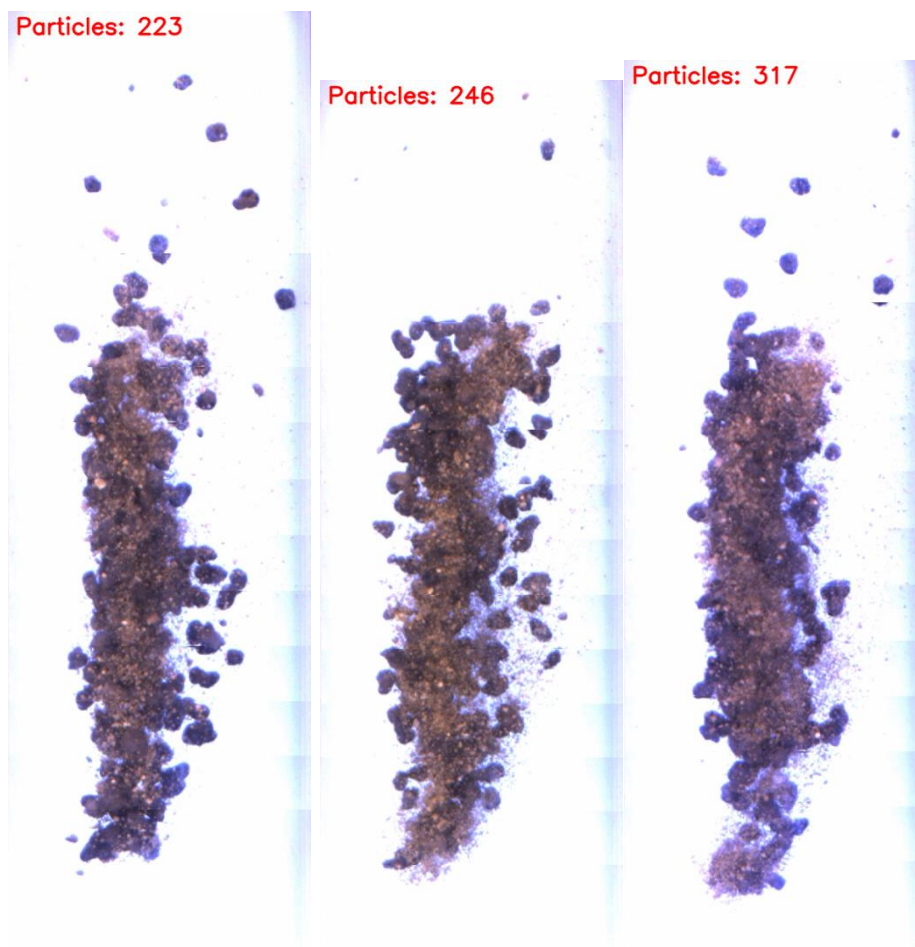


Obrázek 6.14 Prašnost 5 – 6,3 mm: 2,5 g (vlevo) a 5 g (vpravo) prachu



Obrázek 6.15 Prašnost 5 – 6,3 mm: 7,5 g prachu

Na obrázku 6.16 je výstup počítání částic korelačním principem (viz kapitola 6.6). Je patrné, že čím více prachu bylo ve vzorku, tím více částic bylo detekováno. Toto je způsobeno právě detekcí falešných jader min-max filtrem. To, že pak dochází k detekci většího množství menších částic, potvrzují i grafy naměřených velikostí částic v příloze B na grafech B.1, B.2 a B.3, kdy s rostoucí koncentrací prachu roste zastoupení částic s menším průměrem.



Obrázek 6.16 Počet částic 5 – 6,3 mm: 2,5 g (vlevo), 5 g (uprostřed) a 7,5 g (vpravo) prachu

Obdobné výsledky lze sledovat i pro 300 částic o velikosti 7,1 – 8 mm, které vážily 50,81 g. Bylo k nim postupně přidáno 5, 10 a 15 g jemných zrněk písku (zhruba 10 %, 20 % a 30 % původní hmotnosti vzorku). Pro 5 g prachu bylo detekováno 323 částic, pro 10 g prachu 326 částic a pro 15 g prachu 398 částic. Grafy v přílohách B.4, B.5 a B.6, v souladu s tvrzením v minulém odstavci, ukazují postupný nárůst částic s menší detekovanou velikostí s rostoucím množstvím prachu přítomného ve vzorku.

7. ZÁVĚR

Diplomová práce má za cíl určení velikosti, rychlosti pohybu a počtu částic ve vzorku. Podmínkou realizace bylo využití principů počítačového vidění, přičemž částice měly být snímány během letu průhlednou trubicí ze zásobníku do akumulární nádoby. V kapitole 1 byla zpracována literární rešerše granulometrických metod, jak mechanických, tak optických. Na popsané optické metody navazovala kapitola 2, kde byl uveden přehled metod, způsobů a algoritmů počítačového vidění, které jsou k jejich realizaci užitečné. V kapitole 3 bylo popsáno do té doby používané hardwarové řešení měřicího pracoviště pro provádění částicové analýzy, které sloužilo jako výchozí bod pro další úpravy. Součástí měřicího pracoviště byla i vysokorychlostní kamera Basler scA640-120gm, jejímž nastavení a obsluze se věnovala podkapitola 3.2. Byl také vytvořen skript v programovacím jazyku Python, který slouží pro snímání jednotlivých obrázků touto kamerou.

Postupně byl proveden návrh nového způsobu osvětlení (viz kapitola 4.3), neboť původní způsob neposkytoval dostatek užité informace. Dále byla provedena implementace algoritmu kombinujícího metody zpracování tak, aby bylo dosaženo kýžených výsledků. Jeho jednotlivé dílčí kroky, vedoucí k segmentaci a určení velikosti padajících částic, jsou popsány v kapitole 5. Algoritmus byl vypracován v jazyce Python za použití knihovny OpenCV. Funkčnost skriptu byla ověřena jednoduchým pokusem na datech, kdy byly do tubusu vypouštěny plastové kuličky do dětské kuličkové pistole. Osvětlení bylo přesunuto tak, aby byla světla součástí rámu měřicího přípravku, ale zároveň aby byly zachovány principy z prototypového řešení. V podkapitole 5.9 byla provedena také kalibrace kamery na kompenzaci distorze a výpočet převodního koeficientu pixelu na milimetry. K tomuto účelu byl vytvořen samostatný program.

V závěrečné kapitole 6 je popsáno testování navrženého algoritmu na obtížněji detekovatelných částicích keramzitu různé hrubosti zrn. K tomu účelu byl nejdříve proveden náhodný výběr 300 částic z každého ze dvou prosetých vzorků. Pro každý z nich bylo provedeno 10 měření navrženým algoritmem. Test přesnosti určování celkového počtu částic ukázal, že zatímco pro částice 5,3-6 mm bylo detekováno průměrně 219 částic (tedy nedetekována zůstala $\frac{1}{4}$ vzorku), u velikosti 7,1-8 mm byl průměrný počet 309 částic. Z toho lze usoudit, že výsledky jsou závislé na velikosti částic, neboli že na větších částicích je vzhledem k pórovitosti povrchu větší pravděpodobnost chybného dělení. Zároveň je ale z výsledku pro menší velikost patrné, že část vzorku nebyla detekována vzhledem k překryvům při průletu měřicím tubusem. Pokud částice totiž v průběhu celého letu trubicí zůstane v zákrytu jiných částic, není možné ji s využitím jedné kamery detekovat.

Ověřena byla také opakovatelnost určování velikosti částic. Výsledky 10 měření pro každý z měřených vzorků byly proloženy Gaussovými křivkami, které se při vynesení do společného grafu překrývaly a nabývaly maxim zhruba ve stejném bodě. Tyto křivky byly

dále srovnávány s fyzicky naměřenými velikostmi posuvným měřidlem, přičemž ze společných grafů bylo patrné, že reálné velikosti částic jsou detekovány správně. Při porovnání se známými intervaly velikosti měřených částic lze prohlásit, že naměřené histogramy nabývají maxim právě v nich a algoritmus tedy správně určuje i velikosti částic. Za správné lze považovat také výsledky měření rychlosti pádu, i když vzhledem k množství činitelů, které byli při teoretickém výpočtu zanedbané, se od těchto vypočtených hodnot mírně odchylovaly. Naměřená křivka rychlosti měla směrnici $6,22 \text{ m/s}^2$, což je zhruba o třetinu nižší než hodnota tíhového zrychlení $9,81 \text{ m/s}^2$. Odchylka byla vysvětlena vlivem zanedbání odporu vzduchu při teoretickém výpočtu a pixelovými nepřesnostmi obrazové korelace. V podkapitole 6.8 byl nakonec otestován vliv prašnosti ve vzorku na detekční algoritmus, kde bylo pro několik velikostí částic zjištěno, že segmentační algoritmu je odolný vůči prašnosti ve vzorku do zhruba 10 % hmotnosti prachu ku hmotnosti vzorku. Poté se postupně určování počtu částic i velikosti stává nepřesným.

Ke všem vytvořeným skriptům byl zpracován podrobný návod, který je k práci přiložen jako příloha C. Díky tomu je možné nasazení detekčního algoritmu při granulometrických měřeních v měřicí laboratoři. Další zlepšení algoritmu je možné dosáhnout změnou násypky tak, aby do měřicího tubusu nepadalo tolik částic najednou. To by vedlo ke snížení překryvů částic, které momentálně snižují přesnost měření na úkor nutné robustnosti. Při snaze nasnímat větší množství částic by bylo vhodné přidání druhé kamery, která by mohla mířit na měřicí trubici z boku. Lépe by tak byly viditelné částice letící v zadní části. Osazení druhé kamery by ovšem s sebou přineslo nutnou změnu osvětlení, kdy by pravděpodobně bylo nutné přidat LED panel mířící na scénu ze strany druhé kamery.

LITERATURA

- [1] ALLEN, Terence. *Powder sampling and particle size determination*. 1. Amsterdam: Elsevier B.V., 2003. ISBN 0-444-51564-X.
- [2] SYVITSKI, James P. M., ed. *Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis* [online]. Cambridge University Press, 1991 [cit. 2022-10-03]. ISBN 9780511626142. Dostupné z: <https://www.cambridge.org/core/books/principles-methods-and-application-of-particle-size-analysis/A6DDAB2EBDD035A0D3C972CD8CCE52B3>
- [3] HRYCIW, Roman, Hyon-Sohk OHM a Jie ZHOU. Theoretical Basis for Optical Granulometry by Wavelet Transformation. *Journal of Computing in Civil Engineering* [online]. 2015, **29**(3) [cit. 2022-10-03]. ISSN 0887-3801. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000345
- [4] PYE, Kenneth a Simon BLOTT. Particle size analysis of sediments, soils and related particulate materials for forensic purposes using laser granulometry. *Forensic Science International* [online]. 2004, **144**(1), 19-27 [cit. 2022-10-03]. ISSN 03790738. Dostupné z: doi:10.1016/j.forsciint.2004.02.028
- [5] *European Pharmacopoeia*. 10th. EDQM Council of Europe, 2019. ISBN 978-3-7692-7453-0. Dostupné také z: https://dl1.cuni.cz/pluginfile.php/1085697/mod_resource/content/3/sieve%20analysis.pdf
- [6] *Industrial vibrating sieve VS-12* [online]. In: . [cit. 2022-10-28]. Dostupné z: <https://www.minipress.ru/pharma/english/wp-content/uploads/Promyshlennoe-vibratsionnoe-sito-serii-VS-2.jpg>
- [7] OHM, Hyon-Sohk, Andhika SAHADEWA, Roman HRYCIW, Dimitrios ZEKKOS a Nicholas BRANT. Sustainable Soil Particle Size Characterization Through Image Analysis. *Geotechnical and Geological Engineering* [online]. 2013, **31**(6), 1647-1652 [cit. 2022-10-17]. ISSN 0960-3182. Dostupné z: doi:10.1007/s10706-013-9657-z
- [8] ALEXANDER, Marcela a Douglas DALGLEISH. Dynamic Light Scattering Techniques and Their Applications in Food Science. *Food Biophysics* [online]. 2006, **1**(1), 2-13 [cit. 2022-10-16]. ISSN 1557-1858. Dostupné z: doi:10.1007/s11483-005-9000-1
- [9] STETEFELD, Jörg, Sean MCKENNA a Trushar PATEL. Dynamic light scattering: a practical guide and applications in biomedical sciences.

- Biophysical Reviews* [online]. 2016, **8**(4), 409-427 [cit. 2022-10-16]. ISSN 1867-2450. Dostupné z: doi:10.1007/s12551-016-0218-6
- [10] PECORA, R. Dynamic Light Scattering Measurement of Nanometer Particles in Liquids. *Journal of Nanoparticle Research* [online]. **2**(2), 123-131 [cit. 2022-10-16]. ISSN 13880764. Dostupné z: doi:10.1023/A:1010067107182
- [11] MARUTA, Ricardo, Hae KIM, Danilo HUANCA a Walter SALCEDO. A New Correlation-Based Granulometry Algorithm with Application in Characterizing Porous Silicon Nanomaterials. *ECS Transactions* [online]. 2010, **31**(1), 273-280 [cit. 2022-10-17]. ISSN 1938-5862. Dostupné z: doi:10.1149/1.3474170
- [12] OLIVEIRA, Elisângela, Andrea BIANCHI, Luiz MARTINS-FILHO a Romuel MACHADO. Granulometric analysis based on the energy of Wavelet Transform coefficients. *Rem: Revista Escola de Minas* [online]. 2010, **63**(2), 347-354 [cit. 2022-10-17]. ISSN 0370-4467. Dostupné z: doi:10.1590/S0370-44672010000200020
- [13] ZADOROŹNY, Andrzej, Hong ZHANG a Martin JAGERSAND. *Granulometry using image transformation techniques* [online]. Edmont, Canada [cit. 2022-11-06]. Dostupné z: <https://www.cipprs.org/archive/vi/VI2002/pp433-438-Zadorozny-et-al-2002.pdf>
- [14] VINCENT, Luc. Local Grayscale Granulometries Based on Opening Trees. *Mathematical Morphology and its Applications to Image and Signal Processing* [online]. Boston, MA: Springer US, 1996, 273-280 [cit. 2022-10-17]. Computational Imaging and Vision. ISBN 978-1-4613-8063-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4613-0469-2_31
- [15] *Granulometry of Snowflakes* [online]. In: . [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/images/granulometry-of-snowflakes.html>
- [16] SOLOMON, Chris a Toby BRECKON. *Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab*. Wiley-Blackwell, 2011. ISBN 978-0-470-84472-4.
- [17] WANG, Hua, Francisco FELIS, Severine TOMAS, Fabien ANSELMET a Muriel AMIELH. An improved image processing method for particle characterization by shadowgraphy. *Proceedings ILASS–Europe 2017. 28th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems* [online]. Valencia: Universitat Politècnica València, 2017, - [cit. 2022-10-13]. ISBN 9788490485804. Dostupné z: doi:10.4995/ILASS2017.2017.4614

- [18] SHAHI, Shivam a Ergun KURU. An experimental investigation of settling velocity of natural sands in water using Particle Image Shadowgraph. *Powder Technology* [online]. 2015, **281**, 184-192 [cit. 2022-10-13]. ISSN 00325910. Dostupné z: doi:10.1016/j.powtec.2015.04.065
- [19] CASREJÓN-GARCÍA, R., J. CATREJÓN-PITA, G. MARTIN a I. HUTCHINGS. The shadowgraph imaging technique and its modern application to fluid jets and drops. *Revista Mexicana de Física* [online]. 2011, **57**(3) [cit. 2022-10-13]. Dostupné z: <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmf/v57n3/v57n3a16.pdf>
- [20] SHIH, Frank Y. *Image processing and mathematical morphology: fundamentals and applications*. Boca Raton: CRC Press, 2009. ISBN 978-1-4200-8943-1.
- [21] HLAVÁČ, Václav a Miloš SEDLÁČEK. *Zpracování signálů a obrazů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-010-2114-9.
- [22] *Benefits of pappers* [online]. In: . [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: https://hips.hearstapps.com/hmg-prod/images/sweet-pepper-colorful-sweet-bell-peppers-natural-royalty-free-image-1611355757.?crop=0.66635xw:1xh:center,top&resize=640:*
- [23] DRAP, Pierre a Julien LEFÈVRE. An Exact Formula for Calculating Inverse Radial Lens Distortions. *Sensors* [online]. 2016, **16**(6) [cit. 2023-05-09]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s16060807
- [24] *Radial.png* [online]. In: . [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://d33wubrki0l68.cloudfront.net/b762e422b403d0866a8d269638eea19e4a6f6261/2fea2/images/ai/radial.png>
- [25] CHARI, V. a A. VEERARAGHAVAN. *Lens Distortion, Radial Distortion* [online]. 1. Boston, MA: Springer, 2016 [cit. 2023-03-01]. ISBN 978-0-387-31439-6. Dostupné z: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-0-387-31439-6_479
- [26] *Camera calibration* [online]. In: . [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: https://docs.opencv.org/4.x/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html
- [27] BASLER. *Basler scout: User's manual for GigE vision cameras* [online]. 16, AW000119. 2012 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.manualslib.com/manual/902138/Basler-Scout-Gige.html>
- [28] RICHTER, Miloslav. *Základní fyzikální principy využitelné v počítačovém vidění* [online]. In: . 2015 [cit. 2022-10-31]. Dostupné z: https://www.uamt.fekt.vut.cz/~richter/vyuka/MAPV/fyzika_prez.html

- [29] HORNBERG, Alexander, ed. *Handbook of Machine Vision*. Weinheim: Wiley-VCH, 2006. ISBN 978-3-527-40584-8.
- [30] HABEL, Jiří. *Základy světelné techniky* [online]. Praha, 2012 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/18762728-Zaklady-svetelne-techniky.html>. Studijní text. České vysoké učení technické v Praze.
- [31] *Směrový a normálový vektor* [online]. In: . [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: http://www.aristoteles.cz/matematika/analyticka_geometrie/vektor/smerovy-a-normalovy-vektor.php
- [32] KRÁLOVÁ, Magda. Způsob polarizace. In: *Techmania Science Center* [online]. [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/svetlo/polarizace-svetla/zpusoby-polarizace>
- [33] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2007. Pomocné knihy pro žáky (Prometheus). ISBN ISBN978-80-7196-345-5.

SEZNAM PŘÍLOH

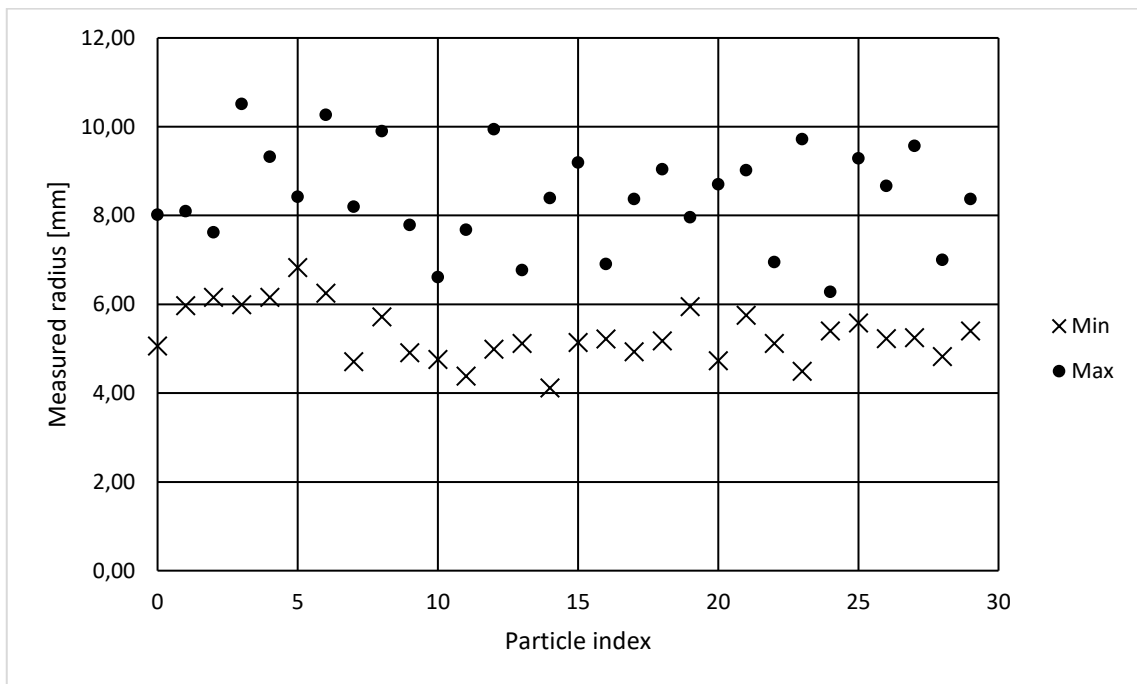
PŘÍLOHA A - MĚŘENÍ VELIKOSTI ČÁSTIC	83
PŘÍLOHA B - OVĚŘENÍ VLIVU PRAŠNOSTI.....	86
PŘÍLOHA C - NÁVOD NA POUŽÍVÁNÍ APLIKACÍ.....	89
PŘÍLOHA D - OBSAH PŘILOŽENÉHO MÉDIA	93

Příloha A - Měření velikosti částic

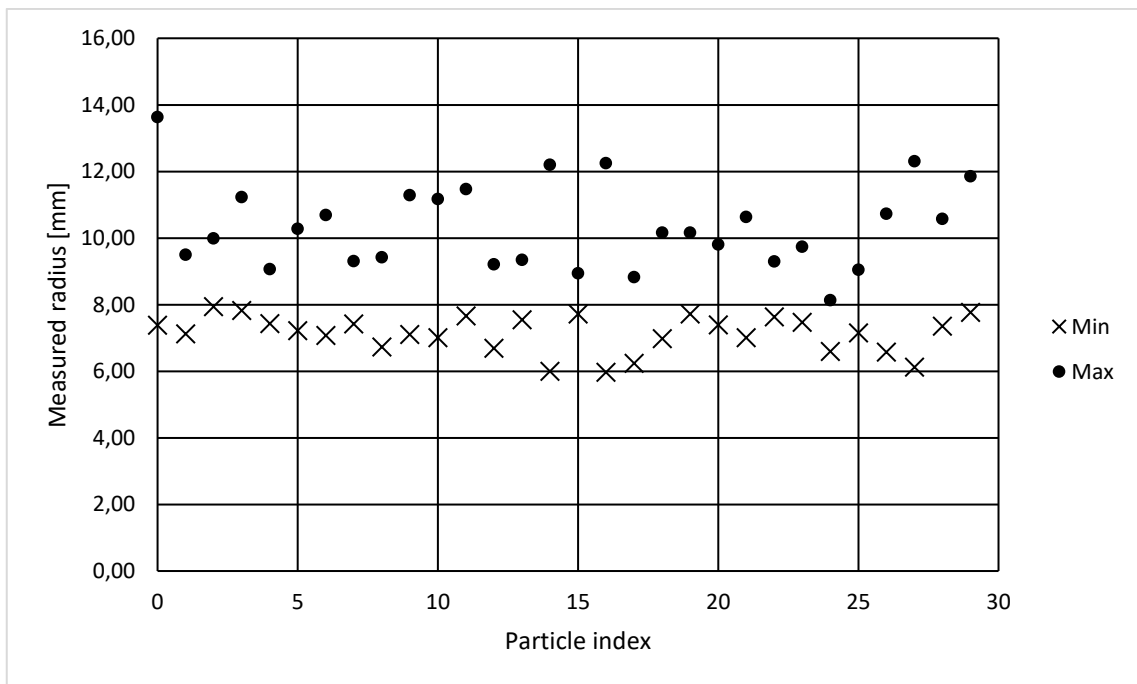
A.1 Tabulka velikosti částic naměřených posuvným měřidlem

Číslo měření	5 – 6,3 mm			7,1 – 8 mm		
	Min [mm]	Max [mm]	Rozdíl [mm]	Min [mm]	Max [mm]	Rozdíl [mm]
1	5,06	8,02	2,96	7,38	13,63	6,25
2	5,97	8,10	2,13	7,12	9,50	2,38
3	6,16	7,62	1,46	7,94	9,99	2,05
4	5,99	10,51	4,52	7,82	11,23	3,41
5	6,16	9,32	3,16	7,43	9,06	1,63
6	5,99	8,42	1,59	7,22	10,27	3,05
7	6,16	10,27	4,02	7,07	10,69	3,62
8	6,83	8,20	3,49	7,42	9,30	1,88
9	6,25	9,90	4,18	6,73	9,42	2,69
10	4,71	7,79	2,88	7,10	11,28	4,18
11	5,72	6,61	1,85	7,01	11,17	4,16
12	4,91	7,68	3,30	7,66	11,47	3,81
13	4,76	9,94	4,95	6,69	9,21	2,52
14	4,38	6,77	1,65	7,54	9,34	1,80
15	4,99	8,39	4,27	6,00	12,20	6,20
16	5,12	9,19	4,05	7,72	8,94	1,22
17	4,12	6,91	1,69	5,97	12,25	6,28
18	5,14	8,37	3,44	6,24	8,82	2,58
19	5,22	9,04	3,86	6,98	10,16	3,18
20	4,93	7,96	2,01	7,72	10,16	2,44
21	5,18	8,70	3,97	7,39	9,80	2,41
22	5,95	9,02	3,27	7,01	10,63	3,62
23	4,73	6,95	1,83	7,63	9,29	1,66
24	5,75	9,72	5,23	7,47	9,74	2,27
25	5,12	6,28	0,88	6,59	8,13	1,54
26	4,49	9,29	3,71	7,15	9,04	1,89
27	5,40	8,67	3,44	6,57	10,73	4,16
28	5,58	9,57	4,32	6,12	12,30	6,18
29	5,23	7,00	2,18	7,35	10,57	3,22
30	5,25	8,37	2,97	7,77	11,85	4,08

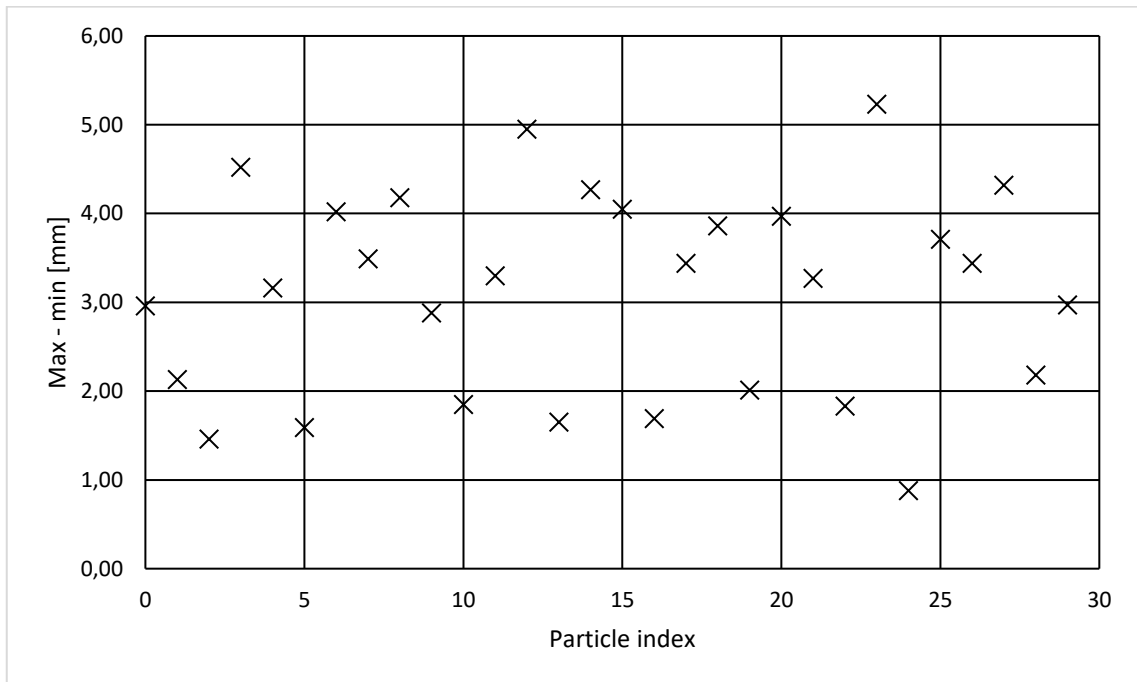
A.2 Graf maximálního a minimálního průměru částic: 5 – 6,3 mm



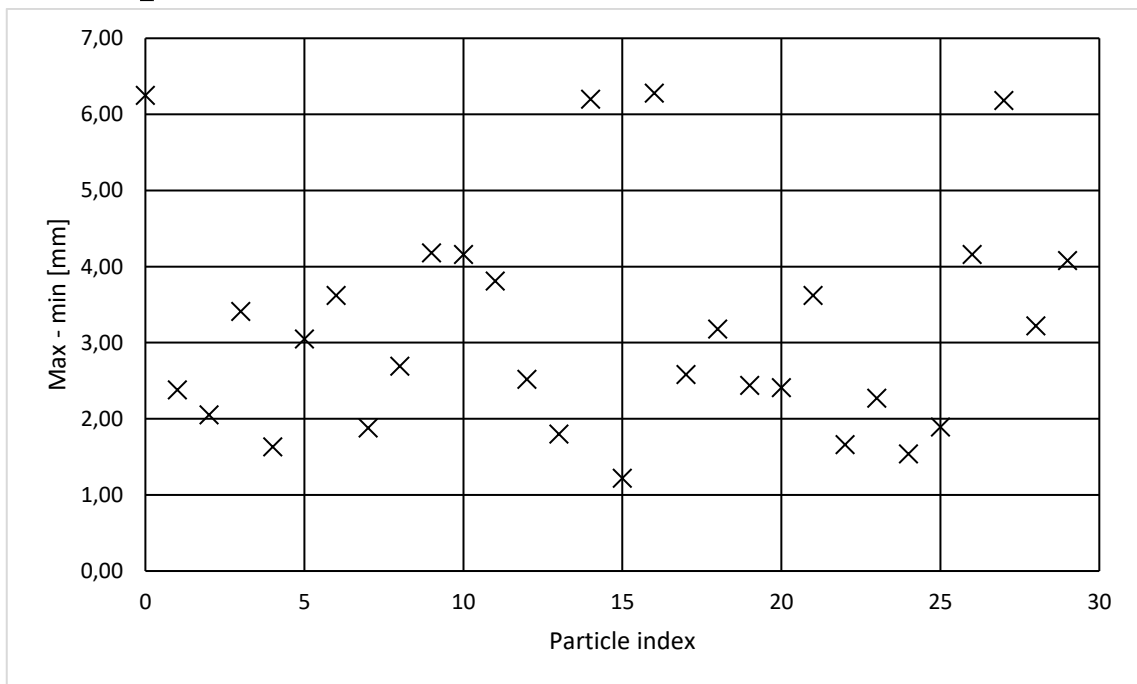
A.3 Graf maximálního a minimálního průměru částic: 7,1 – 8 mm



A.4 Graf rozdílu maximálního a minimálního průměru částic: 5 – 6,3 mm

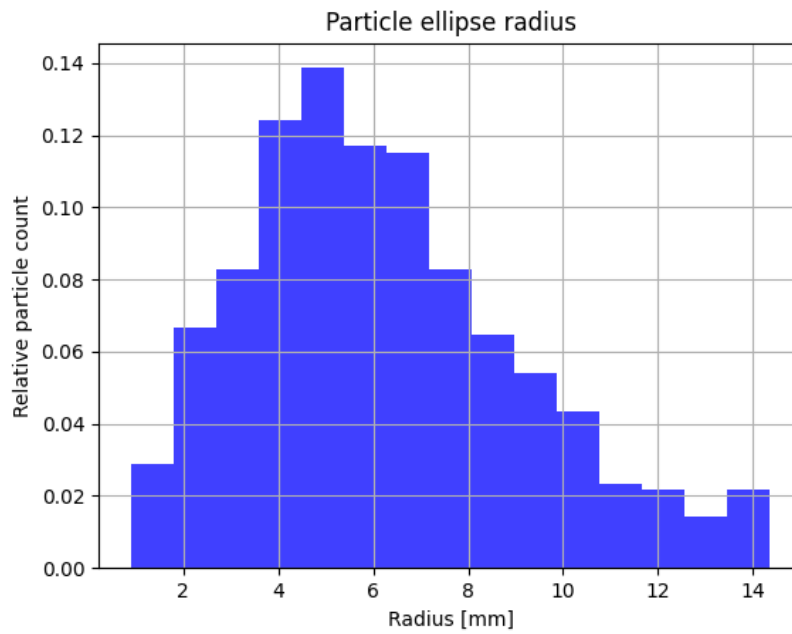


A.5 Graf rozdílu maximálního a minimálního průměru částic: 7,1 – 8 mm

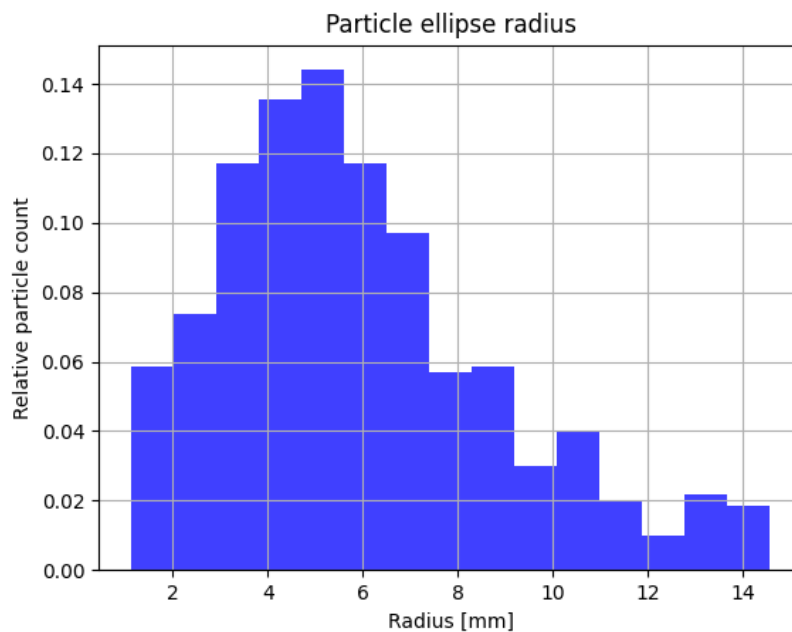


Příloha B - Ověření vlivu prašnosti

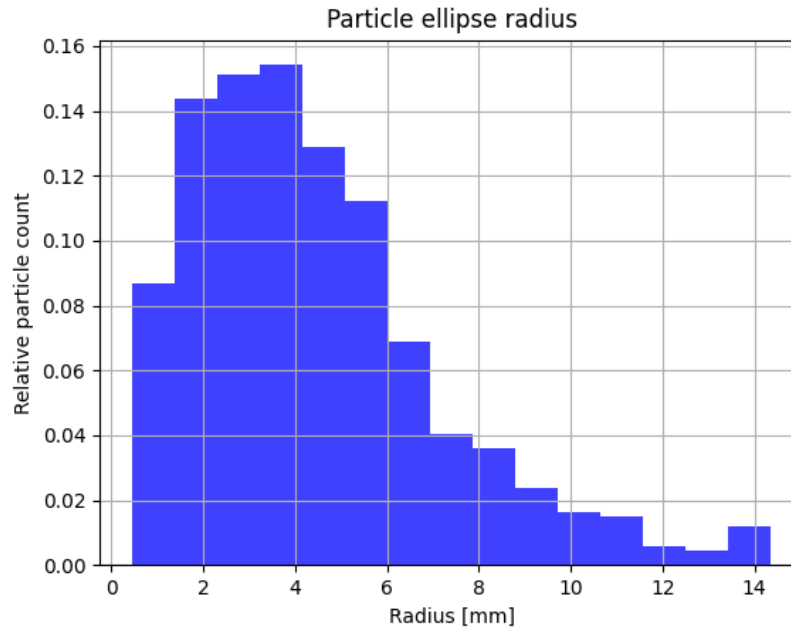
B.1 Graf relativní velikosti částic 5 – 6,3 mm: 2,5 g prachu



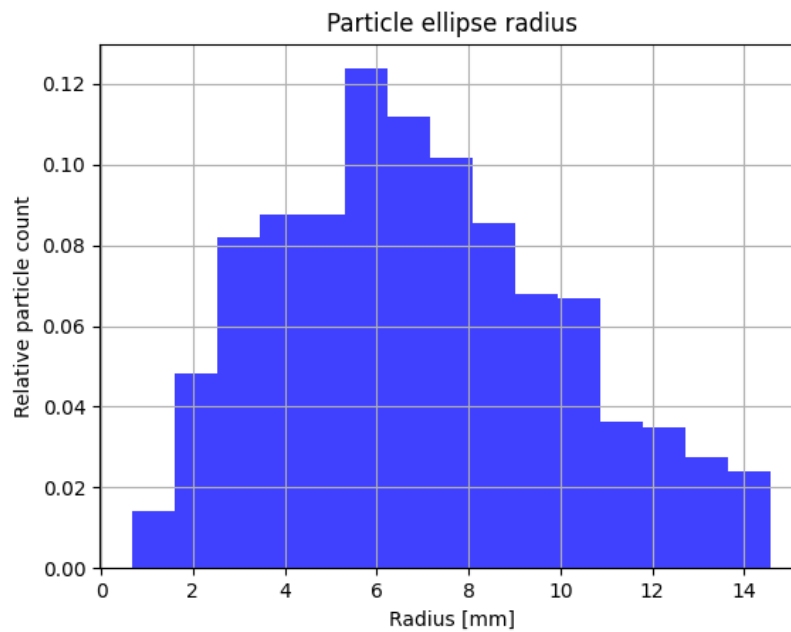
B.2 Graf relativní velikosti částic 5 – 6,3 mm: 5 g prachu



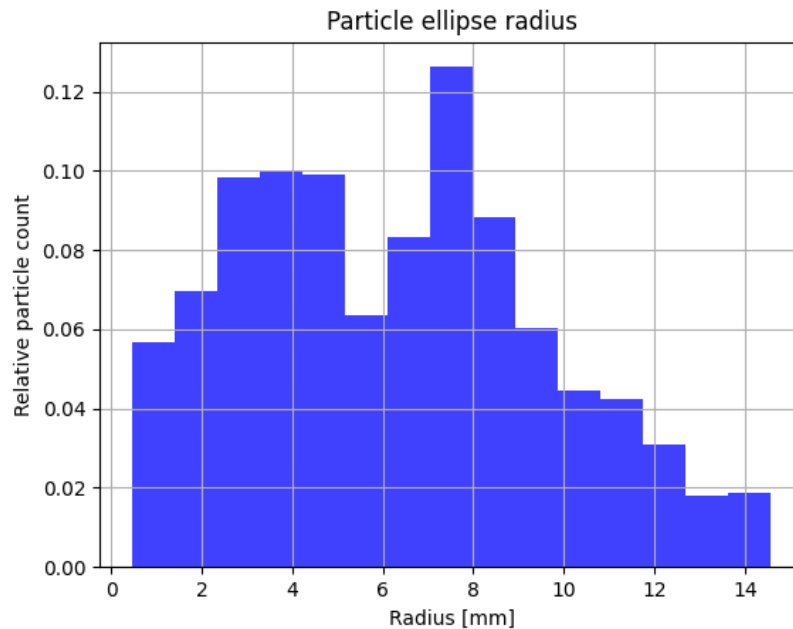
B.3 Graf relativní velikosti částic 5 – 6,3 mm: 7,5 g prachu



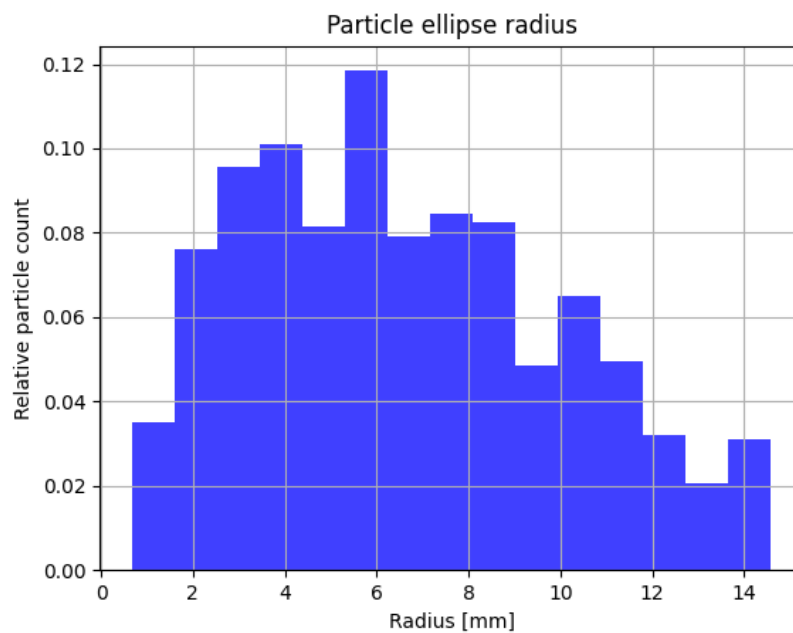
B.4 Graf relativní velikosti částic 7,1 – 8 mm: 5 g prachu



B.5 Graf relativní velikosti částic 7,1 – 8 mm: 10 g prachu



B.6 Graf relativní velikosti částic 7,1 – 8 mm: 15 g prachu



Příloha C - Návod na používání aplikací

C.1 Kalibrační program

Program je vytvořen v jazyce C#. K práci je přeložen jeho zdrojový kód – solution ve Visual Studio, ale je také proveden build tohoto řešení. Uživateli tak stačí spouštět přes příkazový řádek program **CameraMatrixCalculator.exe**. Přes argument *--help* lze zobrazit nápovědu k programu s možnými argumenty, kterými lze ovlivňovat běh programu. Všechny argumenty jsou také sepsány a vysvětleny v tabulce v příloze C.2. V defaultním nastavení program vyhledává nasnímané kalibrační obrázky ve složce input. Cestu ke vstupní složce lze nastavit pomocí argumentu *-i*. Pomocí argumentu *-f* lze nastavit příponu obrazu, která bude ve vstupní složce vyhledávána.

Přes argumenty *-h* a *-w* se nastavuje počet obdélníků kalibrační šachovnice ve vertikálním a horizontálním směru. Podle nich algoritmus určuje počet průsečíků obdélníků, které má detekovat. Přes přepínač *-b* lze zapnout binarizaci obrazu v rámci předzpracování a přes argument *-t* lze nastavit hraniční hodnotu binarizace. Přes argument *-s* se nastavuje výška v milimetrech políčka na kalibrační šachovnici, která se používá pro určení převodního koeficientu pixelů na milimetry. Přepínač *-p* slouží k zapnutí módu, který slouží pro detekci na hůře osvětlených vstupních datech.

Po spuštění programu dojde k načtení vstupních obrázků. Na více vlákních paralelně je na jednotlivých obrázcích prováděna detekce rohů šachovnice. Detekované rohy jsou vykresleny na vstupní snímky a uloženy do složky output pro případné vizuální ověření správnosti. V případě, že na jednom ze snímků nebyl nalezen správný počet rohů políček šachovnice, je tento snímek přeskočen. V případě, že nebyl nalezen dostatečný počet rohů na žádném ze vstupních snímků, běh končí. V opačném případě je algoritmem určena vnitřní matice kamery a vektor distorze a oba jsou uloženy do výstupního souboru **matrices.txt**. Tam je také uložen převodní koeficient pixelů na milimetry. Nedoporučuje se do tohoto souboru provádět zásahy, vzhledem k tomu, že jakékoliv změny by mohly způsobit chybu načítání segmentačním algoritmem nebo chybné provádění kompenzace distorze.

C.2 Tabulka argumentů kalibračního programu

Argument	Význam
--help	Zobrazení nápovědy k programu
-i	Cesta ke vstupní složce
-f	Přípona vstupních obrazů
-h	Počet čtverců na výšku kalibračního obrazce
-w	Počet čtverců na šířku kalibračního obrazce
-b	Přepínač, zapnutí binarizace vstupních obrázků
-t	Hraniční hodnota binarizace obrázků
-s	Rozměr políčka kalibračního obrazce v mm
-p	Přepínač, zapnutí robustního módu detekce hůře osvětlených obrázků

C.3 Program pro snímání z kamery

Doporučuje se využití Python Virtual Environments. Před spuštěním skriptu je nutné nainstalovat knihovny, které využívá, například pomocí příkazu `pip`. Názvy knihoven jsou uvedeny ve standartním **requirements.txt** souboru. Skript pro snímání z použité kamery Basler se jmenuje **camera_acquisition.py** a nachází se v kořeni složky s Python soubory a lze ho spustit přes příkazový řádek. Přes argument `-h` lze zobrazit nápovědu k jednotlivým jeho argumentům. Jednotlivé argumenty jsou také shrnuty v tabulce v příloze C.4. Před spuštěním je nutné mít k počítači připojenou podporovanou kameru.

Skript provede propojení s kamerou a nastavení jejích parametrů podle souboru **cam_config.txt**, který se nachází v kořeni složky. Nachází se zde například nastavení ořezu obrazu kamery, snímkovácí frekvence, délky trvání expozice snímku atd. Dalším parametrem pro kameru, který lze nastavit přímo z příkazové řádky přes argument `-g`, je velikost zisku senzoru kamery. Posledním argumentem, přes který se nastavuje počet snímaných snímků, je `-c`.

Po spuštění skriptu s nastavenými požadovanými argumenty je uživateli zobrazeno okno obsahující nasnímaný snímek z kamery. Lze zde ověřit například osvětlení, pozici kamery či zjistit, zda uživatel nezapomněl odmontovat krytku objektivu. Toto okno se zavírá křížkem. Poté již skript čeká na stisknutí kláves ENTER, které vyšle signál kameře, aby začala periodicky dle zvolené snímkovácí frekvence snímat. Kamera je schopná udržovat buffer snímků, ze kterého si je obslužný program postupně načítá do operační paměti. Snímky se ukládají na disk až po nasnímaní posledního snímku dle zadaného počtu do složky output. Kromě snímků je do výstupní složky uložen také aktuální **cam_config.txt** soubor, ve kterém je uloženo použité nastavení kamery.

C.4 Tabulka argumentů snímacího programu

Argument	Význam
-h	Zobrazení nápovědy k programu
-g	Hodnota zisku senzoru kamery
-c	Počet snímaných snímků

C.5 Program pro analýzu vzorku částic

Doporučuje se využití Python Virtual Environments. Před spuštěním skriptu je nutné nainstalovat knihovny, které využívá, například pomocí příkazu `pip`. Názvy knihoven jsou uvedeny ve standardním **requirements.txt** souboru. Skript pro analýzu vzorku částic se nachází v kořeni Python projektu a spouští se jako **process_images.py** přes příkazovou řádku. Argumentem `-h` lze zobrazit nápovědu k jeho jednotlivým argumentům. Argumenty jsou přehledně uvedeny také v tabulce v příloze C.6.

Přes argument `-i` se nastavuje cesta ke vstupní složce, která obsahuje snímky z vysokorychlostní kamery. Příponu obrázků lze nastavit přes argument `-f`. Argumentem `-o` se nastaví cesta k výstupní složce, do které bude skript ukládat naměřená data. Přepínačem `-b` se nastavuje ukládání všech dílčích obrázků, nejenom těch výsledných. Slouží pro vývojářské účely. Argumentem `-m` a `-n` se nastavuje největší a nejmenší možná velikost měřených částic v milimetrech.

Po spuštění si skript načte z kořene složky soubor **matrices.txt** vygenerovaný přes program na kalibraci kamery. V něm uvedená matice kamery a vektor distorze jsou použity při předzpracování každého snímku. Načten je také převodní koeficient pixelů na milimetry. Po jednom jsou načítány obrázky ze vstupní složky. První obrázek je načten jako pozadí. Na obrázcích jsou poté postupně provedeny kroky vedoucí k segmentaci a detekci velikosti jednotlivých částic. Zároveň s detekcí velikosti se počítá také rychlost pádu částic a celkový počet částic. Po zpracování posledního obrázku jsou na disk do výstupní složky uloženy všechny výsledky.

Výstupní složka obsahuje podsložky s čísly snímků, na kterých byly detekovány částice. Uvnitř nich jsou při nastavení vývojářského přepínače uloženy jednotlivé mezivýsledky předzpracování a segmentace pro daný snímek. V podsložce **visuals** se pak nachází podoby částic a zda byly správně, či chybně segmentovány. V kořeni výstupní složky se nachází snímky s proložením výsledku segmentace na vstupním snímku a uvedeným počtem detekovaných částic. Soubory **cloud.tif** a **cloud_color.tif** obsahují vizualizaci celého padajícího vzorku dat složeného ze vstupních snímků. Ve druhém jmenovaném se také nachází informace o počtu částic, které byly v daném vzorku detekovány. Soubor **histogram.png** obsahuje histogram velikostí měřených částic ze vzorku. V textovém souboru **particles.txt** se nachází vzestupně seřazené naměřené průměry částic, ze kterých byl sestaven histogram. Je možné je načíst v jiných

programech a dle potřeby je vizualizovat a porovnávat. V souborech **speed_px.png** a **speed_mpers.png** se nachází graf naměřené rychlosti pádu částic.

C.6 Tabulka argumentů snímacího programu

Argument	Význam
-h	Zobrazení nápovědy k programu
-i	Cesta ke vstupní složce se snímky
-f	Přípona vstupních snímků
-o	Cesta k výstupní složce pro uložení výsledků
-b	Přepínač, ukládání všech průběžných snímků
-m	Největší možná velikost částic v mm
-n	Nejmenší možná velikost částic v mm

Příloha D - Obsah přiloženého média

Kořenová složka disku:

- calibration nástroje a data pro kalibraci osazené kamery
 - executable složka obsahující spustitelný .exe soubor
 - input vstupní kalibrační snímky
 - project Zdrojový kód Visual Studio
 - results výstupy kalibračního algoritmu
 - boards.docx kalibrační obrazce pro tisk
- data data zaznamenaná kamerou
 - 300castic pořízené snímky napočítaných 300 částic
 - 5-6.3 částice o velikosti 5-6,3 mm
 - 10 podsložek s opakováním snímání téhož vzorku
 - 7.1-8 částice o velikosti 7,1-8 mm
 - 10 podsložek s opakováním snímání téhož vzorku
 - keramzit pořízené snímky částic keramzitu
 - Podložky s intervaly velikosti částic, případně směsi
 - kulickovka pořízené snímky plastových kuliček
 - podsložky s několika opakováními různého vzorku
 - prach pořízené snímky s přidaným prachem do vzorku
 - 5mm vzorek částic o velikosti 5-6,3 mm
 - Podsložky s různou hmotností přidaného prachu
 - 7mm vzorek částic o velikosti 7,1-8 mm
 - Podsložky s různou hmotností přidaného prachu
- granulometry zdrojové kódy k optické granulometrii
 - jupyter.. složka s JupyterLab soubory s implementací různých metod
 - output výchozí složka pro výstup snímání kamerou
 - results výchozí složka pro výstup optické granulometrie
 - cam_config.txt konfigurace kamery
 - matrices.txt kalibrační matice kamery
 - requirements.txt nutné knihovny pro běh skriptů
 - camera_acquisition.py viz příloha C.3
 - process_images.py viz příloha C.5
 - ostatní .py soubory importované ve skriptech
- matlab složka s Matlab skripty
 - Složka obsahuje skripty pro zpracování statistiky do textu práce
- results výsledky optické granulometrie
 - Složka kopíruje strukturu složky *data*, struktura naměřených dat je vysvětlena v návodu k aplikaci, viz C.5
- xdohna46_DP2023_text.pdf text diplomové práce