



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

STROJOVÉ VIDĚNÍ PRO KONTROLU VÝLISKŮ

MACHINE VISION FOR THE CHECK OF MOLDINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Grepl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Vetiška, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Pavel Grepl
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Jan Vetiška, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Strojové vidění pro kontrolu výlisků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřená na teoretické a praktické zvládnutí aplikace strojového vidění na kontrolu výlisků z umělých hmot. Cílem práce je navrhnout kontrolní stanoviště výrobního systému daného produktu.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše dané problematiky.
Návrh uspořádání testovací buňky.
Výběr HW.
Sestavení a oživení testovací aplikace.
Testování.

Seznam doporučené literatury:

HORNBERG, Alexander. Handbook of machine vision. 1. [Chichester: John Wiley, distributor], c2006. ISBN 978-3-527-40584-8.

PETROU, Maria. a Panagiotá. BOSDOGIANNI. Image processing: the fundamentals. New York: Wiley, c1999. ISBN 04-719-9883-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá návrhem uspořádání automatického kontrolního stanoviště konkrétních výrobků pomocí strojového vidění. Teoretická část se věnuje specifikování kontrolního systému a řeší v oblasti komponent tvořících strojové vidění, jako jsou kamery, objektivy a osvětlení. Praktická část obsahuje několik možných návrhů řešení, samotné řešení zvolených variant, včetně programování i testování aplikace pomocí software Vision Assistant. Na závěr bylo provedeno ekonomické zhodnocení investice automatizace kontroly kvality pomocí strojového vidění.

ABSTRACT

Bachelor's thesis deals with the design of arrangement of an automatic inspection unit for specified products using machine vision. The theoretical part is focused on specification of the inspection system and research in the area of machine vision components, such as cameras, lens and illumination. The practical part consists of multiple possible arrangements of the inspection unit. Solutions of the chosen arrangements, including programming and testing the application using Vision Assistant software. Finally, economic evaluation of the automation of the quality inspection using machine vision has been made.

KLÍČOVÁ SLOVA

Strojové vidění, kontrola kvality, optická kontrola, automatizace, zpracování obrazu, průmyslové kamery, Vision Assistant, LabVIEW.

KEYWORDS

Machine vision, quality control, optical control, image processing, automation, industrial cameras, Vision Assistant, LabVIEW.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

GREPL, Pavel. *Strojové vidění pro kontrolu vylisků* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116779>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Vetiška.

PODĚKOVÁNÍ

V první řadě bych chtěl poděkovat panu Ing. Janovi Vetiškovi, Ph.D. za cenné rady a náměty při vypracování bakalářské práce. Dále pak rodině a přítelkyni za podporu během studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Vetišky, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 1.5.2019

.....
Grepl Pavel

OBSAH

1 ÚVOD	15
2 SPECIFIKOVÁNÍ KONTROLNÍHO SYSTÉMU	17
2.1 Popis kontrolovaného objektu a jeho defektů	17
2.2 Požadovaná přesnost	17
2.3 Způsob a rychlost snímání	18
2.4 Okolní prostředí	18
3 KOMPONENTY KONTROLNÍHO SYSTÉMU	19
3.1 Systémy strojového vidění	19
3.1.1 Rozložení pixelů	19
3.1.2 Zpracování barvy obrazu	20
3.1.3 Kontrola doby expozice	21
3.1.4 Snímkovací frekvence	21
3.2 Optická soustava – objektiv	21
3.2.1 Typy objektivů	21
3.3 Osvětlení	22
3.3.1 Analýza vlastností snímaného objektu	23
3.3.2 Stanovení potřebných vlastností světla	23
3.3.3 Geometrie osvětlení	23
3.3.4 Výběr typu osvětlovače	24
3.3.5 Rušivé vlivy	27
4 NÁVRHY ŘEŠENÍ.....	29
4.1 Kontrola průchodnosti otvoru	29
4.1.1 Tlaková (průtoková) kontrola	29
4.1.2 Strojové vidění – konfigurace zadní osvětlení	30
4.1.3 Strojové vidění – konfigurace přední osvětlení s jasným zorným polem	31
4.2 Kontrola přítomnosti přetoku	32
4.2.1 Statický kamerový systém a dopravník s rotační hlavou	32
4.2.2 Pohyblivá kamera i osvětlení, dopravník bez rotační hlavy	33
4.2.3 Statický kamerový systém i snímaný objekt	33
4.2.4 Fixovaná výchozí poloha snímaného objektu	34
5 ŘEŠENÍ ZVOLENÉHO USPOŘÁDÁNÍ.....	37
5.1 Výběr vhodné kamery	37
5.1.1 Výpočet minimálního rozlišení kamery	37
5.1.2 Výběr objektivu	40
5.2 Konfigurace uspořádání	42
5.2.1 Kontrola průchodnosti	42
5.2.2 Kontrola přetoku	43
5.3 Vytvoření snímků	43
5.4 Programování algoritmu kontroly průtoku	44
5.4.1 Vyhledávací tabulka (angl. Lookup Table)	44
5.4.2 Segmentace prahováním (angl. Threshold)	44
5.4.3 Pokročilá morfologie (angl. Advanced Morphology)	44
5.4.4 Analýza částic (angl. Particle analysis)	45
5.5 Programování algoritmu kontroly přetoku	47
5.5.1 Filtr	47
5.5.2 Monochromatická morfologie	47

5.5.3	Analýza obrazu	47
6	ZHODNOCENÍ A DISKUZE	51
7	ZÁVĚR	53
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	55
9	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	57
9.1	Seznam zkratk a použitých symbolů	57
9.2	Seznam obrázků	57

1 ÚVOD

Strojové vidění má mnoho různých definic a názvů podle vědní disciplíny, do které lze danou aplikaci zařadit. Mezi ně patří například počítačové vidění (angl. computer vision), digitální analýza obrazu, zpracování obrazu. Obecně se jedná o systém, jehož účelem je zpracování obrazových informací s využitím výpočetní techniky. Snímané objekty mohou být téměř jakékoliv – lidská tvář, dopravní provoz, či výrobní proces. Za zmínku také stojí vývoj autonomních řídicích jednotek automobilů za použití počítačového vidění.

Zjednodušeně lze princip funkce systému strojového vidění popsat následovně. Obraz vytvořený kamerou je pomocí systému analýzy obrazu a předem definovaného algoritmu vyhodnocen, poté dochází k předání vyhodnocení jiným částem systému, které provedou požadovanou akci, např. odstranění vadného kusu z výrobního procesu.

Důvody proč implementovat systém strojového vidění do výrobního procesu jsou nejrůznější. Mezi nejčastěji zmiňované patří snížení nákladů, taktu výroby a zvýšení přesnosti kontroly.

Cílem této práce je seznámit se se systémy strojového vidění a jejich využitím v kontrole kvality na konci i během výrobního procesu, návrh uspořádání kontrolního stanoviště pro daný objekt, včetně výběru vhodného hardware, nastavení a oživení kontrolního procesu.

Rešeršní část práce se zpočátku věnuje specifikováním systému strojového vidění, kapitola poskytuje stručný výčet informací, které by měl mít designer kontrolního stanoviště při jeho tvorbě na paměti, popis okolního prostředí a v poslední řadě i kontrolovaného objektu. Poté následuje přehled částí, které tvoří kontrolní snímací systém a jejich stručný popis.

Praktická část práce začíná popisem návrhů možných způsobů řešení, princip kontroly pomocí jednotlivých variant je podrobně popsán včetně jejich výhod i nevýhod a poté je nejvhodnější varianta zvolena. Následuje řešení vybrané varianty, obsahující potřebné výpočty pro stanovení technických parametrů jako je například rozlišení kamery a její ideální pracovní vzdálenost. Poté následuje vytvoření dostatečného množství snímků, programování a testování aplikace. Na závěr je provedeno ekonomické zhodnocení investice automatizace kontroly kvality pomocí strojového vidění.

2 SPECIFIKOVÁNÍ KONTROLNÍHO SYSTÉMU

Detailní specifikování požadavků zákazníka je jedna z prvních částí algoritmu pro tvorbu vhodného návrhu uspořádání kontrolního stanoviště. Teprve poté, co jsou k dispozici všechny potřebné údaje, je možné vhodně zvolit počet a druh kamer, osvětlení a rozhodnout o celkovém uspořádání kontrolního stanoviště [1].

Kapitola definuje kontrolovaný objekt a popisuje různé aspekty kontrolního procesu, které by měl mít designer kontrolního stanoviště na paměti včetně konkrétního přístupu k daným aspektům vzhledem k zadání této práce.

2.1 Popis kontrolovaného objektu a jeho defektů

Kontrolovaný objekt, viz obr. 1, je modré barvy, válcového tvaru, se dvěma vnitřními otvory. Větší otvor slouží pro odvod kapaliny a menší pro odvod plynů z plněné nádrže. V horní části objektu se nachází závit, který slouží k připevnění objektu například ke kanystru na benzín pro snazší manipulaci s kapalinou. Spodní část objektu je zúžena pro usnadnění vložení do plněné nádrže. Střední část objektu je příčně drážkovaná za účelem zvýšení poddajnosti a lepší manipulace.

Při výrobě daného objektu může dojít ke vzniku celkem dvou různých vad. První vadou je částečné, případně úplné ucpání vnitřních otvorů a druhou je tzv. přetok, který vzniká po obvodu příčně drážkované části. Přítomnost obou defektů bude kontrolována snímacím systémem.



Obr. 1) Kontrolovaný objekt

2.2 Požadovaná přesnost

Požadovaná přesnost se odvíjí od znaků kvality daného výrobku a její velikost by měla odpovídat alespoň polovině rozměru nejmenšího hledaného prvku [2].

V případě námi kontrolovaného objektu je nejmenší hledaný prvek, který je třeba zkontrolovat tvořen přetokem. Bylo rozhodnuto, že přítomnost přetoku převyšujícího drážkování o více než 0,5 mm je považováno za defektní, a požadovaná přesnost byla tedy stanovena jako 40 % maximálního povoleného rozměru, tedy 0,2 mm.

2.3 Způsob a rychlost snímání

Faktorů, podle kterých se rozlišují různé způsoby snímání, je několik. Podle toho, zda se během snímání objekt pohybuje, či nikoliv se dělí způsoby snímání na statické a dynamické. Dále je třeba stanovit, jestli v dané chvíli bude snímán pouze jeden objekt či více. Pokud je snímáných více objektů současně, tak je třeba řešit také možné případy, kdy se objekty navzájem překrývají [1].

Dynamické snímání je plynulý pohyb snímáných objektů zajištěn dopravníkem. Při takovém způsobu snímání je třeba mít informace o tom, jakou rychlostí, popřípadě s jakým zrychlením se dané objekty pohybují. Dynamické snímání je časově mnohem úspornější v porovnání se statickým snímáním, ovšem také ekonomicky nákladnější, protože kamery musí být schopny provádět více snímku za sekundu [1].

Statické snímání probíhá za klidu objektu. V tomto případě je třeba vyhodnotit, kolik času je na snímání potřeba a případně se snažit tento čas co nejvíce redukovat [1].

Z důvodu jednoduchosti implementace a zároveň snížení nákladů byla jako vhodná metoda snímání zvolena statické snímání vždy jen jednoho objektu v daný okamžik. Čas, vyhrazený na kontrolu, plyne z plánovaného množství vyrobených objektů za 24 hodin (25 000) a je tedy maximálně 2,9 sekund.

2.4 Okolní prostředí

Také charakter prostředí, do kterého je kontrolní stanoviště integrováno hraje při výběru spolehlivého vybavení značnou roly. Důležité je vědět nejen, zdali můžeme při instalaci kamerového systému narazit na určitá rozměrová omezení, ale také do jakého prostředí vybavení vybíráme. Mezi faktory ovlivňující volbu vybavení patří například

- vibrace od jiných strojních jednotek
- okolní osvětlení
- teplota pracoviště, popřípadě možné teplotní výkyvy
- okolní znečištění (například prašné prostředí) [3].

V našem případě nejsme omezeni prostorem při tvorbě kontrolního stanoviště. Rušivý vliv okolního osvětlení bude minimalizován pomocí světlem neprůchodných krytů uvnitř stanoviště. Vibrace způsobené vibračním dopravníkem je možno minimalizovat izolací stanoviště od podlahy haly. Prostor není prašný ani jinými způsoby znečištěný.

3 KOMPONENTY KONTROLNÍHO SYSTÉMU

Kapitola poskytuje stručný úvod do oblasti hardware strojového vidění, popisuje tedy kamery, objektivy a osvětlení. Kapitola poskytuje čtenáři stručný návod pro výběr vhodných komponentů při implementaci strojového vidění v optické kontrole kvality výrobků.

3.1 Systémy strojového vidění

V dnešní době existují čtyři druhy systémů strojových vidění a těmi jsou kamerové senzory, PC systémy, zákaznické systémy a v poslední řadě inteligentní kamery, které jsou nejnovějším přírůstkem do oboru strojového vidění, viz obr. 2 [4].

Systémy strojového vidění v dnešní době používají často takzvané inteligentní kamery (angl. smart camera). Výhodou takového zařízení je, že se zjednodušeně řečeno jedná o „vše v jednom“. Inteligentní kamera obsahuje senzor pro záznam obrazu, procesorovou jednotku pro jeho zpracování a vyhodnocení, digitální vstupy a výstupy pro propojení s ostatními zařízeními, a mnohdy dokonce i integrované osvětlení. Konfigurují se přes počítač pomocí grafického uživatelského rozhraní, známého také jako GUI (angl. Graphical User Interface). Během samotného chodu není třeba, aby byl počítač připojen, protože kamera má vlastní procesorovou jednotku, která zajišťuje vyhodnocení výsledků [4] [2].

Následuje dělení kamer podle jednotlivých charakteristik s jejich stručným popisem.



Obr. 2 Inteligentní kamery firmy Cognex [5]

3.1.1 Rozložení pixelů

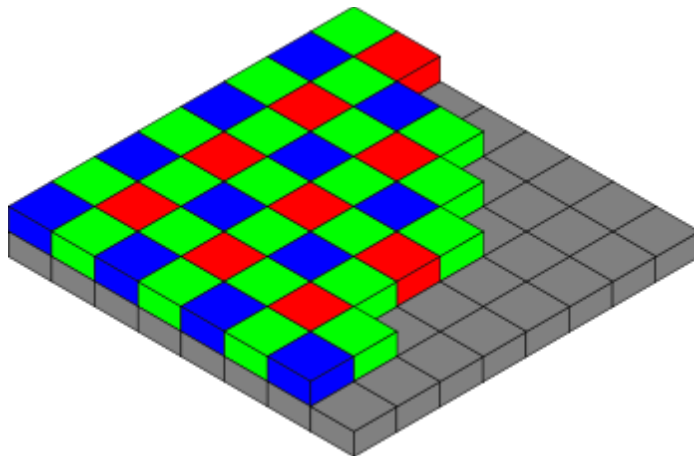
Jedná-li se o vysokorychlostní aplikaci, kde jsou objekty přepravovány pásovým dopravníkem, řádková kamera je vhodná volba, jelikož je schopná zaznamenávat obraz s vyšším rozlišením i za vysokých rychlostí snímaných objektů. Tyto kamery používají jednu řadu pixelů (někdy dvě nebo tři) pro nasnímání obrazu. Řádkové kamery nacházejí své uplatnění například v kontrole barevného tisku (například obalů, či etiket), povrchu plechu, LCD obrazovek [1] [6] [7].

Pokud se jedná o statické snímání (snímání za klidu objektu), nebo je třeba detailnější kontroly je vhodnější použít plošnou kameru. Tyto kamery mají dvojrozměrný obdélníkový senzor, který nasnímá celý obraz najednou. Plošné kamery jsou využívány například v aplikacích kontroly kvality a robotice [1] [6].

3.1.2 Zpracování barvy obrazu

Monochromatické kamery jsou vhodnou volbou, pokud daná aplikace nevyžaduje barevnou analýzu. Díky absenci barevného filtru je zaznamenaný obraz v porovnání s barevnými kamerami detailnější [6].

Barevné kamery používají takzvanou Bayerovu masku pro nasnímání barevného obrazu. Což je sada barevných filtrů před pixely na barevném CCD snímači, viz obr. 3. Každý pixel měří množství dopadajícího světla v plné šíři spektra. Tak dostaneme černobílý obraz. Pro vytvoření barevného obrazu je před každým pixelem umístěn barevný filtr, který propouští pouze světlo v určitém rozsahu vlnových délek. Na senzoru se tedy střídají červené, zelené a modré filtry. Tomuto se říká Bayerova maska, nebo také Bayerův filtr. Každý pixel tedy obsahuje pouze informaci o jedné barevné složce. Pro získání barevného obrazu v plném rozlišení je třeba v každém pixelu dopočítat chybějící barvy z okolních pixelů. Tento proces dopočítání se nazývá debayerizace [6] [8].



Obr. 3 CCD snímač s Bayerovou maskou [7]

Obrazový snímač kamery je zodpovědný za převod světla do elektrických signálů. V dnešní době máme na výběr ze dvou technologií: CCD (angl. Charged Coupled Device) a CMOS (angl. Complementary Metal Oxide Semiconductor).

CCD snímač je zařízení přeměňující energii dopadajících fotonů na energii elektrického signálu. Jedná se o světločivý křemíkový plátek uložený nad kovovou elektrodou, která je izolována vrstvou křemene. Záznam obrazu probíhá následovně. Dopadající fotony uvolňují z atomů křemíku elektrony. Tento jev se nazývá fotoelektrický. Kladně nabitá elektroda, umístěna pod každým pixelem zachycuje tyto uvolněné elektrony. Čtení obrazu probíhá tak, že se kladný náboj vlnivě přesouvá podél elektrod v každém sloupci pixelů a „stahuje“ elektrony z jednoho pixelu na druh směrem k výstupu k obrazovému zesilovači a převodníku obrazu z analogového na digitální. [9]

Výhodou CCD snímačů je vysoká citlivost a malý šum. Mezi nevýhody patří například nízká rychlost snímání a hrozba tzv. přesvětlení. Časté použití nacházejí v hvězdářských dalekohledech. [6] [9]

CMOS snímače fungují také na základě fotoelektrického jevu. Avšak na rozdíl od CCD snímačů obsahuje často každý pixel vlastní zesilovač. CMOS snímače jsou méně nákladné na pořízení i provoz a mají vyšší rychlost snímání v porovnání s CCD snímači. Díky individuálním zesilovačům a rychlosti snímání umožňují zachycení například velmi jasně osvětlené poznávací značky automobilu a současně méně osvětlené postavy řidiče na jednom obraze [1] [6].

3.1.3 Kontrola doby expozice

Globální uzávěrka nasnímá celý obraz v jeden časový okamžik, protože umožňuje vystavení celé plochy senzoru světlu současně. Výhodou této varianty je zachování kvality obrazu i při vyšších rychlostech. Ovšem je také nákladnější [6].

Rolovací uzávěrka snímá obraz po jednotlivých řádcích a poté je složí a vytvoří ucelený obraz. To má za následek zkreslení obrazu, pokud se objekt pohybuje příliš rychle nebo je špatně osvětlen. Výhodou je nižší pořizovací cena a možnost redukovat zkreslení obrazu změnou doby expozice a osvětlením. Použití této uzávěrky je možné pouze u CMOS snímačů [6].

3.1.4 Snímkovací frekvence

Snímkovací frekvence je frekvence, s jakou senzor snímá unikátní snímky. Obvykle se udává v jednotkách fps (angl. frames per second), neboli počet snímků za sekundu [3].

3.2 Optická soustava – objektiv

Optickou soustavu tvoří ve většině případů kamerový objektiv a vhodné osvětlení. Úkolem objektivu je vytvořit dvojrozměrný obraz trojrozměrného objektu [10].

Senzor použitý v kameře přímo ovlivňuje volbu vhodného objektivu. Mezi parametry, které mají na volbu objektivu největší dopad, patří velikost senzoru a velikost pixelu. Objektiv totiž musí zajistit osvětlení celé plochy senzoru, v opačném případě dochází k tzv. stínování [11].

Kvalita objektivu je kvantitativně popsána pomocí modulační přenosové funkce, zkráceně MTF (angl. modulation transfer function) a také ovlivněna zkreslením signálu. MTF popisuje, jak dobře budou přeneseny jednotlivé prostorové frekvence z původního obrazu do výsledného obrazu a je definována jako podíl kontrastu výsledného signálu ku kontrastu vstupního signálu. V ideálním případě by byla hodnota MTF rovna 1, to ovšem není v praxi možné. Hodnota MTF klesá s rostoucí frekvencí. Jako limitní prostorové rozlišení se udává frekvence, kdy MTF nabývá hodnoty 0,1 a její jednotkou je počet párů čar na milimetr (angl. line pairs per millimetre lp/mm) [11] [12].

3.2.1 Typy objektivů

Na trhu je celá řada různých druhů objektivů, každý se svými specifickými přednostmi a nedostatky a z nich plyne vhodnost jejich použití v různých aplikacích. Níže jsou popsány a na obr. 4 zobrazeny tři nejčastěji používané objektivy.

Objektivy s pevným ohniskem mají fixní ohniskovou vzdálenost, které se u objektivů pro senzory s rozlišením kolem jednoho megapixelu pohybuje v intervalu 4,5 až 100 mm a MTF v intervalu 70 až 90 lp/mm. Pro senzory s vyšším rozlišením se používají objektivy

s ohniskovou vzdáleností do 75 mm a MTF větší než 120 lp/mm. Tyto objektivy jsou vhodné pro statické aplikace spojené s přesným měřením rozměrů nebo malou velikostí pixelů [11].

Makro objektivy jsou konstruovány po kvalitní zaostření obrazu při krátké pracovní vzdálenosti od snímaného objektu. Jejich zorné pole je přibližně stejně velké jako plocha senzoru kamery. Mají velmi dobré MTF charakteristiky a zanedbatelné zkreslení, ovšem za cenu flexibility. Kamery s makro objektivy mají tedy obvykle fixní pracovní vzdálenost [11].

Telecentrické objektivy jsou používány ve speciálních metrologických aplikacích k odstranění rozměrové a geometrické variability v obrazech. Tyto objektivy nezpůsobují zkreslení, protože paprsky vstupující pod různými úhly do objektivu jsou transformovány na paprsky vůči sobě rovnoběžné. Aby tento děj byl uskutečnitelný, musí být plocha vstupní části objektivu alespoň stejně velká, jako zorné pole. Tento proces tedy způsobuje zobrazování s konstantním zvětšením nezávisle na vzdálenosti snímaného objektu bez zkreslení. Nevýhodou je ovšem přímá úměra mezi velikostí zorného pole a vstupní části objektivu, fixní pracovní vzdálenost a nemožnost doostření na místě. [11].



Obr. 4 a) objektiv s pevným ohniskem, b) makro objektiv, c) telecentrický objektiv [13]

3.3 Osvětlení

Osvětlovací soustava je stejně důležitá část systému strojového vidění, jako kamera. Chybějící informace způsobená nesprávným osvětlením ztěžuje následnou analýzu obrazu či ji dokonce znemožní. S nadsázkou lze strojové vidění interpretovat jako computerizované měření světla. Účelem osvětlení v oblasti strojového vidění je dosáhnout maximálního kontrastu částí objektu, které jsou určeny ke kontrole (zájmové části), oproti částem, které nejsou předmětem inspekce (rušivé části). Současně je potřeba zajistit co nejmenší vliv okolního prostředí, aby inspekční algoritmus vykazoval opakovatelné výsledky [1] [2].

Pro každý objekt může být vhodná jiná osvětlovací soustava. Je tedy potřeba mít ke každému pozorování individuální přístup. Ať už se jedná o různé objekty, nebo různé vady na stejném objektu.

3.3.1 Analýza vlastností snímaného objektu

Nejprve je třeba se zaměřit na samotný snímaný objekt a jeho interakce se světlem. Důležité jsou přitom tyto vlastnosti objektu:

- velikost absorpce nebo odrazivosti světla v zájmových oblastech, ty určují kontrast a odlesk (souvisí s barvou objektu)
- struktura povrchu zájmových oblastí
- členitost objektu (otvory, výstupky)
- tvar a velikost objektu (pro určení velikosti a vzdálenosti osvětlovače)
- průsvitnost a průhlednost částí objektu, které mohou být využity, nebo musí být potlačeny
- pozadí objektu
- variabilita polohy objektu [14].

3.3.2 Stanovení potřebných vlastností světla

Světlo dopadající na snímaný objekt se podle zákonů optiky rozdělí na čtyři části: část dopadajícího světla se odrazí, část způsobí v objektu emisi sekundárního záření, část se absorbuje a část projde objektem, viz obr. 5 a). Interakci světla s objektem závisí na barvě objektu a barvě (vlnové délce) světla. V praxi se nejčastěji používají černobílé kamery v kombinaci s osvětlovačem s červeným světlem [1].

3.3.3 Geometrie osvětlení

Podle uspořádání konfigurace kamera – objekt – osvětlení, viz obr. 5 b), se geometrie osvětlení dělí na:

- přední osvětlení s jasným zorným polem (angl. bright-field lighting)
- přední osvětlení s tmným zorným polem (angl. dark-field lighting)
- zadní osvětlení (angl. back lighting) [14].

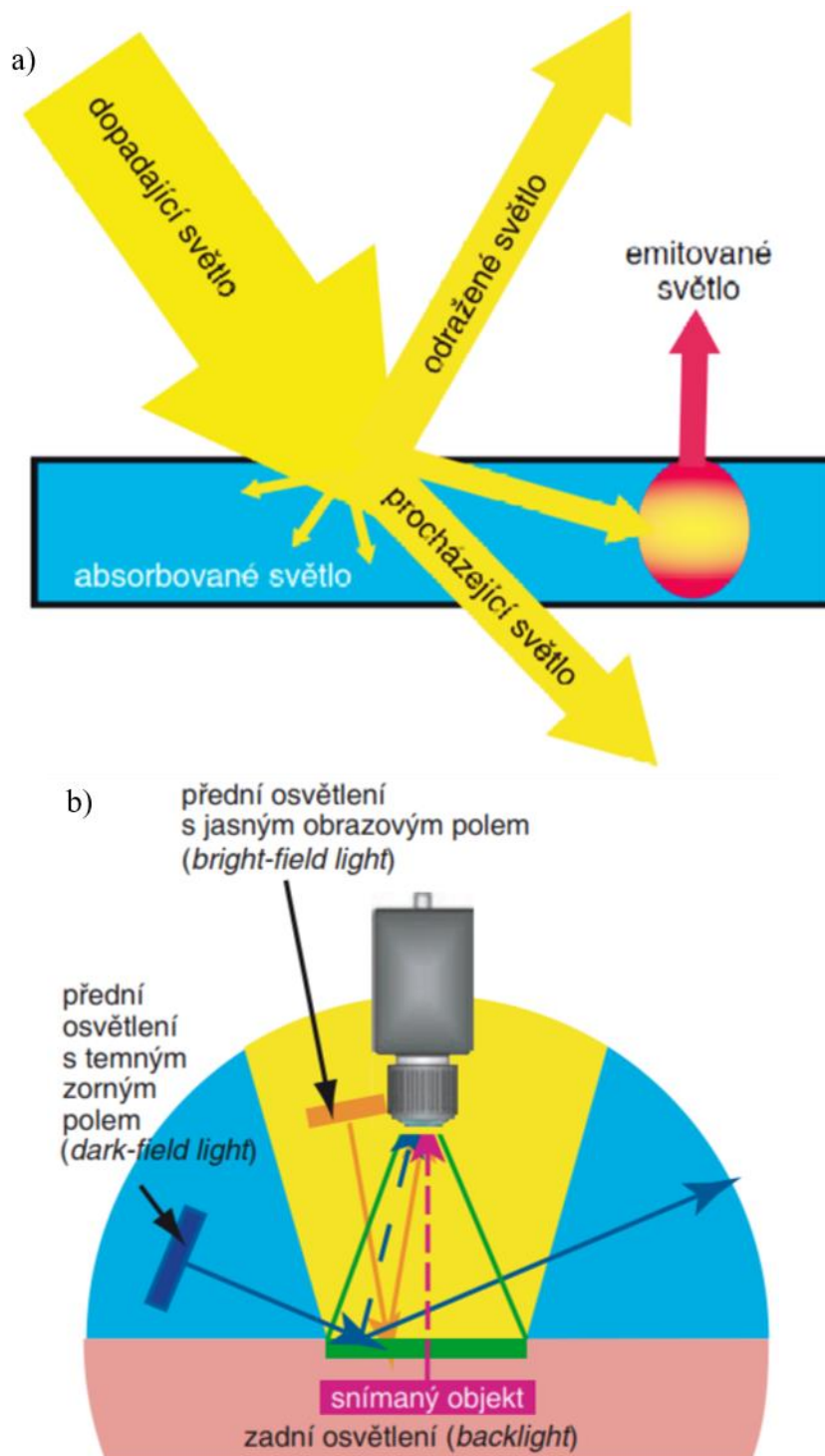
Podle složení svazku světla se dále geometrie osvětlení dělí na **směrové** (kolimované) světlo, jehož paprsky jsou vzájemně rovnoběžné, a **rozptýlené** (difuzní) světlo, které má paprsky rovnoměrně rozložené ve všech směrech [14].

Obecně platí, že rozptýlené světlo zmenšuje kontrasty způsobené členitostí objektu a strukturou povrchu a zvýrazňuje kontrasty způsobené absorpcí a směrové světlo má opačný účinek [14].

Přední osvětlení s jasným zorným polem – světlo odražené od objektu dopadá přímo do objektivu. Tento typ osvětlení se nejčastěji kombinuje s rozptýleným světlem pro vytvoření kontrastů na základě rozdílné absorpce [14].

Přední osvětlení s tmným zorným polem – členité části objektu odrážejí světlo do objektivu, zatímco povrch objektu odráží světlo mimo. Vzniká kontrastní obraz členitosti povrchu v tmném poli [14].

Zadní osvětlení – použití v kombinaci nejčastěji s rozptýleným světlem k zobrazení obrysu objektu pro měření rozměrů [14].

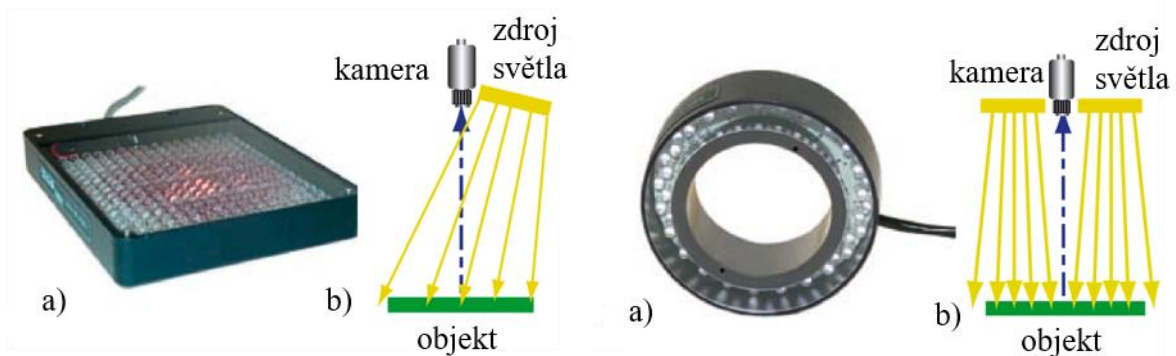


Obr. 5 a) Působení světla na objekt v úlohách strojového vidění [12]
 b) Geometrie osvětlení [14]

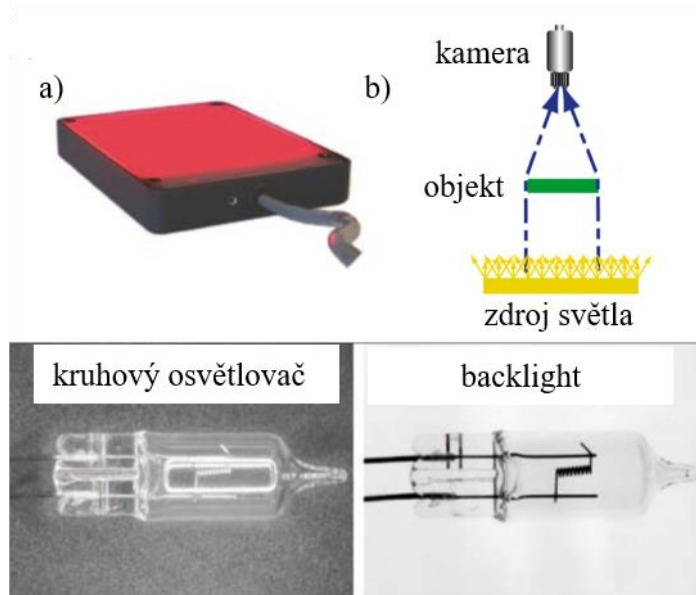
3.3.4 Výběr typu osvětlovače

Světelných zdrojů existuje celá řada, mezi neznámější patří: halogenové, xenonové, fluorescenční a LED osvětlovače. LED diody jsou v dnešní době nejpopulárnější volbou nejen pro úlohy strojového vidění. LED osvětlení má spoustu výhod, mezi které patří například: vysoká životnost, malé rozměry, vysoká účinnost, snadná regulace světelného toku. Díky svým velice malým rozměrům lze pomocí LED diod vytvářet svítidla nejrůznějších tvarů a rozměrů. Dále jsou tedy popsány pouze LED osvětlovače. [15].

- **Plošné osvětlovací pole** – diody jsou uspořádané do tvaru obdélníku či čtverce, viz obr. 6 vlevo. Rozptýlení je dáno vyzářovacím úhlem diod. Vhodné pro nenáročné úlohy pro směrové osvětlení s temným zorným polem [3].
- **Kruhové osvětlovače** – diody uspořádané do kruhu, viz obr. 6 vpravo. Rozptýlení je větší než u plošného osvětlovacího pole. Jedná se o osvětlovač pro osvětlení s jasným obrazovým polem a rozptýleným světlem. Provedení je často ve tvaru kruhu okolo objektivu kamery, což není ve většině případů dostatečné osvětlení [14].
- **Osvětlovače Backlight** – nejčastěji používaný typ zadního rozptýleného osvětlení, viz obr. 7. Jak již bylo zmíněno, zadní osvětlení se používá převážně u měření, nebo také pro nalezení objektu a kontroly polohy. Například kontrola vlákna žárovky [3] [14].



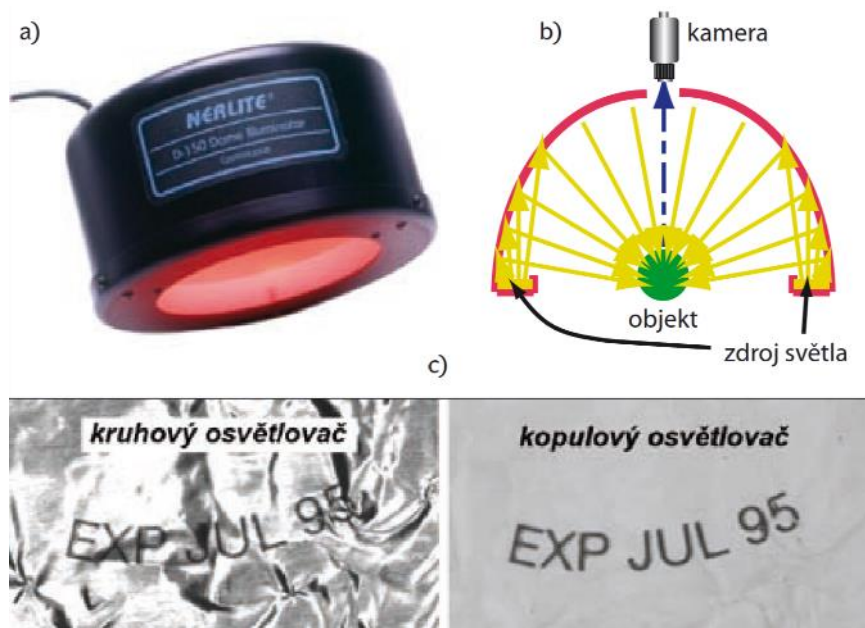
Obr. 6 Vlevo – plošné osvětlovací pole, vpravo – kruhový osvětlovač
 a) osvětlovač, b) schéma uspořádání osvětlovače [14]



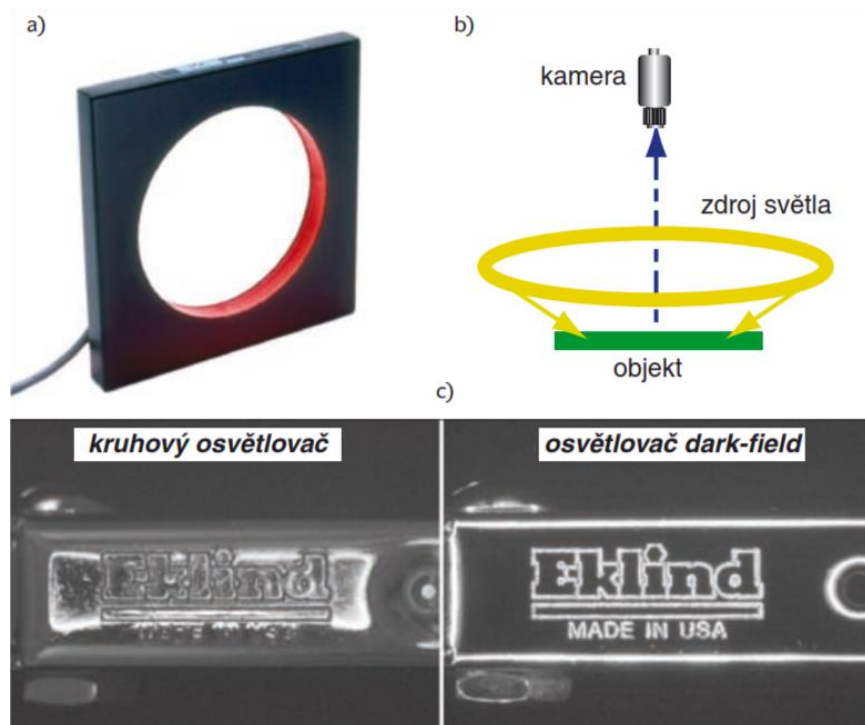
Obr. 7 Osvětlovač Backlight – a) osvětlovač, b) schéma uspořádání osvětlovače,
 c) porovnání osvětlovačů [14]

- **Kopulové osvětlovače** – diody uspořádané do kopule, viz obr. 8. Rozptýlení světla je velmi značné. Takové osvětlení je obzvlášť vhodné pro lesklé povrchy, například čtení nápisů na zmačkané lesklé fólii [3].
- **Osvětlovače DOAL** (angl. Diffused on axis lighting) – jasné obrazové pole a rozptýlené světlo. Difuzor zajišťuje lepší rozptýlení světla. Díky konstrukci s polopropustným zrcadlem světlo dopadá rovnoměrně z celé plochy nad objektem [14].

- **Osvětlovače dark-field** – do kruhu uspořádané diody s úzkou vyzářovací charakteristikou, které svítí téměř v rovině kruhu do jeho středu, viz obr. 9. Jedná se o přední osvětlení s tmným zorným polem. Používají se například při kontrole laserem vypálených nápisů [3]



Obr. 8 Kruhový osvětlovač, a) osvětlovač, b) schéma osvětlovače, c) porovnání osvětlovačů [14]



Obr. 9 Osvětlovač dark-field a) osvětlovač, b) schéma osvětlovače, c) porovnání osvětlovačů [14]

3.3.5 Rušivé vlivy

V úlohách strojového vidění je žádoucí dosahovat, pokud možno co nejvíce neměnných pracovních podmínek, aby byly inspekce opakovatelné a správně vyhodnocované. Rušivý vliv okolního osvětlení, ať už se jedná o denní světlo, které se neustále mění, nebo o umělé osvětlení provozu, lze minimalizovat například použitím osvětlovače, jehož osvětlení je několikanásobně vyšší než okolního prostředí, a takto tyto rušivé vlivy minimalizovat, ale to má za následek vyšší spotřebu a případně nepříjemné pracovní podmínky pro okolní lidskou obsluhu.

Proto, je-li to možné, je vhodnější tento problém vyřešit pomocí krytů, kterými se obklopí co největší část kontrolního stanoviště a tím dojde ke snížení vlivu nejen okolního světla na kamerový systém, ale také případného vlivu silného osvětlovače na lidskou obsluhu a také v poslední řadě se tím sníží množství prachu, které může také mít vliv na vyhodnocení [1] [3].

4 NÁVRHY ŘEŠENÍ

Tato kapitola se zabývá různými návrhy řešení kontroly kvality objektu pomocí strojového vidění. Samotná kontrola je rozdělena na dvě části. Tedy průchodnost vnitřního otvoru a přítomnost přetoku jsou kontrolovány na sobě nezávisle.

4.1 Kontrola průchodnosti otvoru

V objektu se nacházejí celkem dva vnitřní otvory. Hlavní, větší otvor, který slouží pro přenos kapaliny např. z kanystru benzínu do palivové nádrže. Vedlejší, znatelně menší otvor, který slouží k odsávání plynů z plněné nádoby a tím zajišťuje kontinuální proudění kapaliny.

Mezní hranice pro vyhodnocení průchodnosti byla stanovena jako 50% průchodnost výstupního otvoru. Pokud tedy průměr výstupního otvoru dosahuje alespoň poloviny své nominální hodnoty, označujeme hlavní otvor za průchozí. Tím je zajištěn dostatečný průtok kapaliny a objekt tedy plní svůj účel. Pro kontrolu průchodnosti se nabízelo několik technických řešení, měření tlaku (průtoku) a strojové vidění v různém uspořádání, které jsou v dalších bodech popsány.

4.1.1 Tlaková (průtoková) kontrola

Tento návrh vycházel z postupu, výroby objektu. Bylo zjištěno, že pokud dojde k ucpání výstupního otvoru, tak nejprve nastane ucpání odsávacího otvoru a až poté dochází k ucpání hlavního otvoru.

Jelikož k ucpání dochází výhradně v místě výstupního otvoru objektu, tak je přítomnost odsávacího otvoru u vstupní části objektu zaručena. Pro kontrolu průchodnosti tedy postačí kontrola průchodnosti odsávacího otvoru.

Osvětlení, umístěné nad objektem, nasvítí vstupní část objektu, kamera, umístěná také nad objektem tuto oblast nasnímá, vyhodnocovací software lokalizuje polohu odsávacího otvoru a předá ji řídicí jednotce robotu.

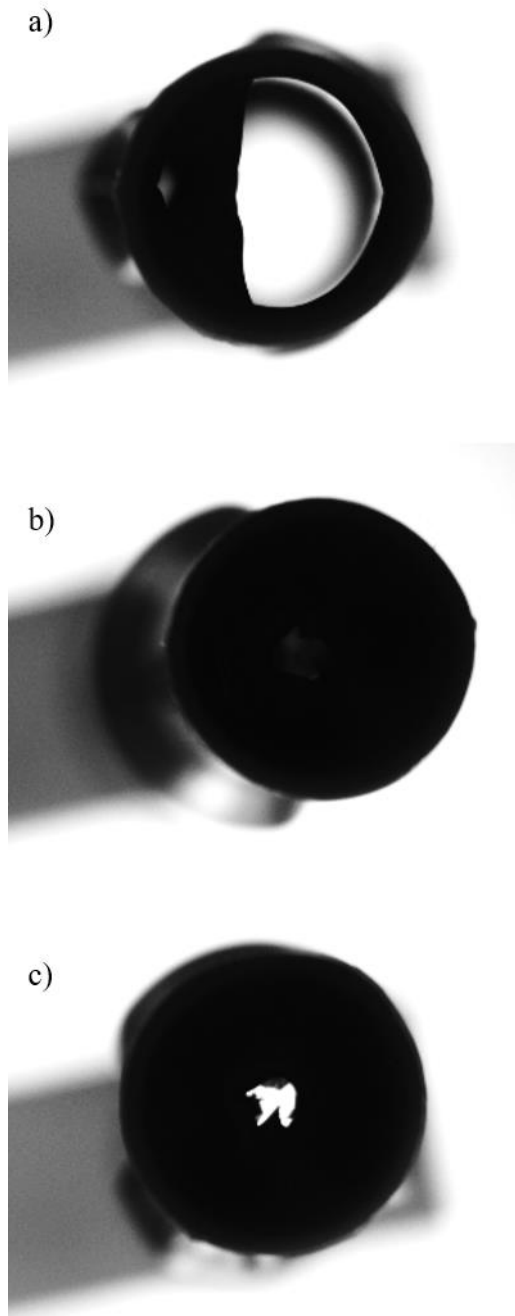
Kamerou naváděný koncový efektor robotu se stlačeným vzduchem vstříkne do odsávacího otvoru stlačený vzduch. Průtok vzduchu změní průtokový senzor umístěný pod výstupním otvorem. V případě, že neproteče otvorem žádný vzduch, objekt bude vyhodnocen jako zmetek. V opačném případě je přítomnost odsávacího otvoru zajištěna, a tedy i průchodnost výstupního otvoru pro kapalinu.

Při použití tohoto návrhu není třeba prohnuté objekty narovnávat. Další výhodou je kvalita výrobků, které projdou kontrolou, protože tyto výrobky mají přítomný odsávací otvor, a tím je tedy při plnění nádrže uživatelem zaručen kontinuální tok kapaliny. To ovšem má za následek větší množství vyrazených objektů a je třeba zvážit, jestli je kontinuálnost toku natolik důležitý parametr.

Také je zde problém navádění koncový efektoru robotu pomocí kamery. Toto řešení je značně komplikovanější ve srovnání s řešením za použití výhradně kamerových systémů, a proto se tato kapitola dále zabývá pouze řešením s využitím kamerových systému za účelem vytvoření jednoduššího a úspornějšího řešení.

4.1.2 Strojové vidění – konfigurace zadní osvětlení

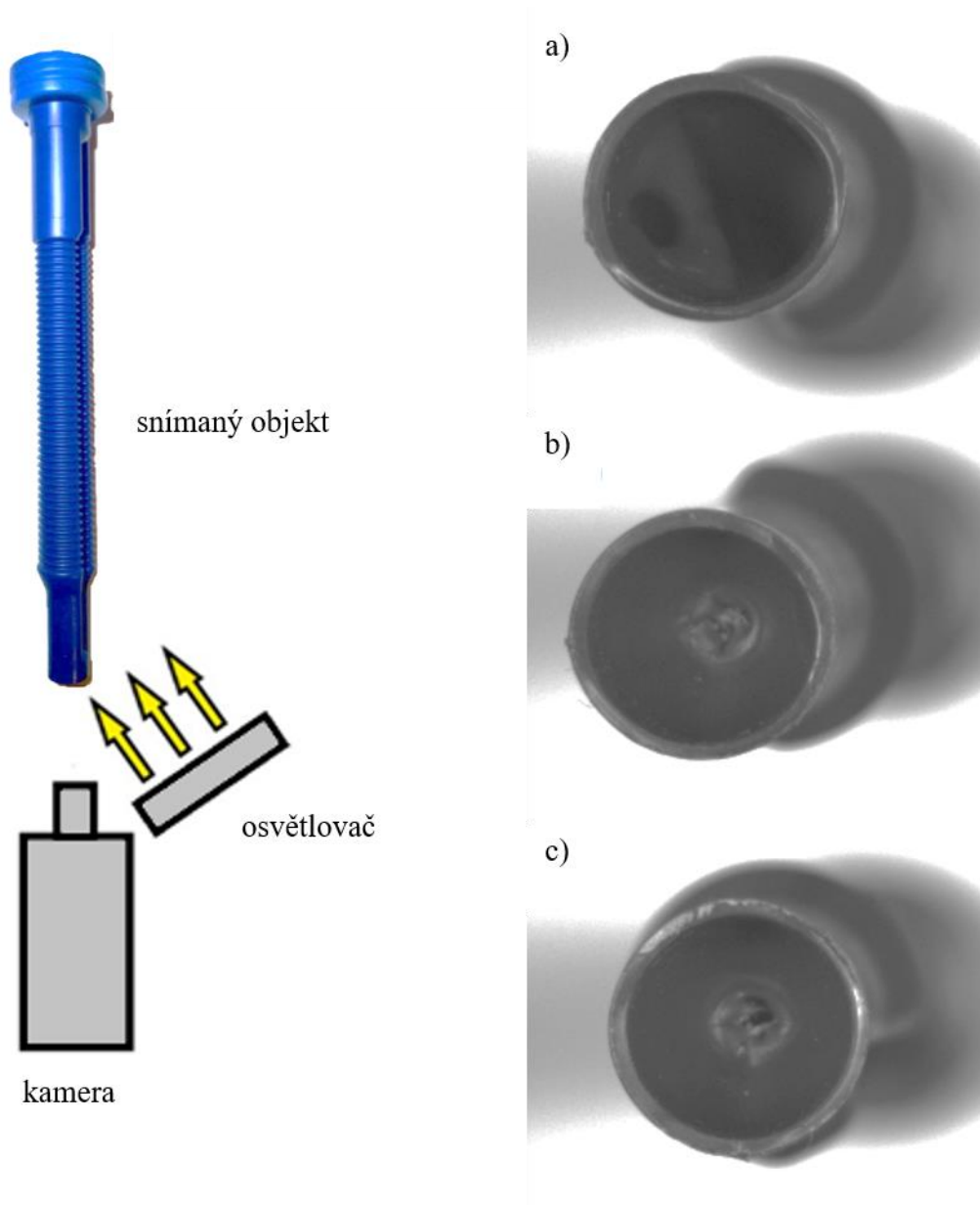
Další možná konfigurace je umístění kamery pod objekt a osvětlení nad objekt, viz obr. 10. Světelné paprsky emitované osvětlovačem procházejí skrze vnitřní otvory objektu do kamery. Části objektu se na obraze jeví jako tmavé plochy a průchozí otvor jako světlá plocha.



Obr. 10 vlevo – schéma zadního osvětlení, vpravo – získané snímky při použití tohoto uspořádání a) zcela průchozí otvor, b) neprůchozí otvor, c) částečně průchozí otvor

4.1.3 Strojové vidění – konfigurace přední osvětlení s jasným zorným polem

Poslední navrženou konfigurací je umístění kamery i osvětlení vedle sebe, viz obr. 11. Části objektu se na obraze jeví jako světlé plochy a průchozí otvor jako tmavá plocha.



Obr. 11 vlevo – schéma předního osvětlení, vpravo – získané snímky při použití tohoto uspořádání, a) zcela průchozí otvor, b) neprůchozí otvor, c) částečně průchozí otvor

Z pořízených snímků je patrné, že vhodnější variantou pro kontrolu průtoku bylo použití zadního osvětlení, díky mnohem většímu kontrastu v zaznamenaných snímcích.

4.2 Kontrola přítomnosti přetoku

Jako přetok je označen nadbytečný materiál, který se může nacházet po celé délce drážkované části objektu. Ke vzniku této vady dochází při nedokonalém uzavření vyfukovací formy. Ačkoli se nejedná o defekt, který ohrožuje funkčnost objektu, je dle požadavků odběratele třeba objekty s přetokem označit jako zmetky, jelikož narušují jeho design a při manipulaci s objektem může dojít k pořezání uživatele, protože přetoková oblast je poměrně ostrá.

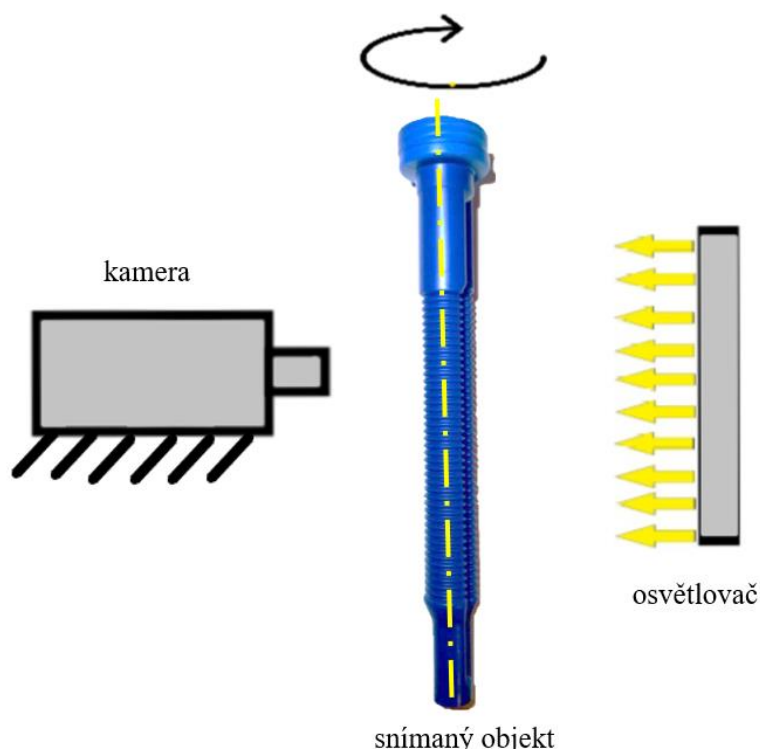
Pro kontrolu přítomnosti přetoku se nabízelo několik variant, které jsou v dalších bodech popsány.

4.2.1 Statický kamerový systém a dopravník s rotační hlavou

V první variantě je kamera¹ staticky umístěna naproti výrobku tak, aby střed objektivu byl ve stejné výšce, jako střed vroubkované části objektu. Osvětlovač je umístěn na opačné straně objektu, tudíž je použito zadní osvětlení, viz obr. 12.

Po dopravení objektu ke snímacímu zařízení dopravníkem, je vyslán signál pro zahájení snímání a dopravník vybaven rotační hlavou otočí objektem o 180°. Kamera nasnímá objekt během otáčení, poté dojde k vyhodnocení.

Výhodou této varianty je použití menšího množství kamer a osvětlení. Nevýhodou je nutnost použití rotační hlavy dopravníku, což vede ke zvýšení nákladů na automatizaci kontrolního procesu a také navýšení času potřebného pro kontrolu. Čas potřebný pro kontrolu lze ovšem snížit, použije-li se kamera s vyšší snímkovací frekvencí a rotace snímaného objektu se urychlí.



Obr. 12 Statický kamerový systém a rotující objekt

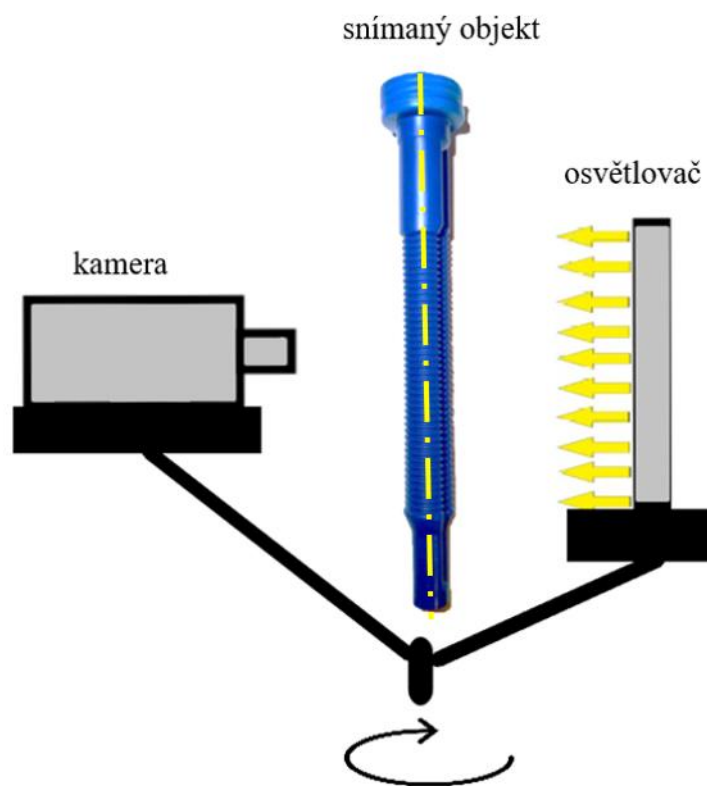
¹ Případně dvě, či více kamer nad sebou. Problém velikosti zorného pole je řešen v kapitole 6.

4.2.2 Pohyblivá kamera i osvětlení, dopravník bez rotační hlavy

Tato varianta je velice podobná předchozí variantě. S rozdílem, že v tomto případě je kamera společně s osvětlením umístěna na pohyblivém ramenu, které se otáčí kolem nehybného snímaného objektu, viz obr. 13.

Kamerový systém může mít jednu konkrétní výchozí polohu, a tedy se při snímání otočí o úhel 360° , aby se dostala zpět do výchozí polohy, nebo může mít proměnlivou výchozí polohu, kdy při snímání jednoho objektu se otočí pouze o 180° , což vede k rychlejšímu vyhodnocení.

Výhodou této varianty je použití menšího množství kamer a osvětlení. Také není třeba rotační hlavy dopravníku, která by měla využití jen pro tuto operaci, tudíž možné snížení nákladů potřebných pro tuto kontrolu. Nevýhodou je stejně jako v předchozím případě vyšší čas potřebný pro nasnímaní objektu, což lze ovšem řešit stejným způsobem, a to použitím kamery s vyšší snímkovací frekvencí a zrychlení rotace kamerového systému.



Obr. 13 Pohyblivá kamera i osvětlení, statický snímaný objekt

4.2.3 Statický kamerový systém i snímaný objekt

Další variantou je umístění několika nepohyblivých kamer po pomyslné kružnici kolem snímaného objektu ve stejné výšce, jako v předchozí variantě. Ke každé kamere je přiděleno korespondující osvětlení, které je umístěno naproti kamery za objektem, opět tedy zadní osvětlení.

Po dopravení objektu ke snímacímu zařízení dopravníkem (tentokrát bez rotační hlavy), je vyslán signál pro zahájení snímání. Postupně dochází ke snímání vždy jen jednou kamerou v jeden časový okamžik za přítomnosti osvětlení z korespondujícího osvětlovače.

Výhodou této varianty je nejmenší množství pohyblivých částí, ovšem za cenu daleko většího množství použitých kamer a osvětlovačů.

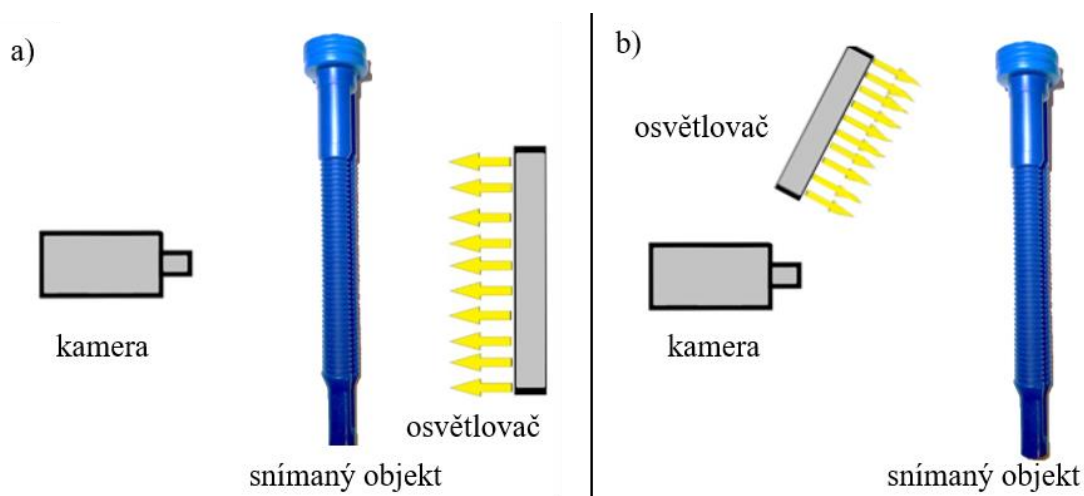
4.2.4 Fixovaná výchozí poloha snímaného objektu

Jedná se o nepohyblivé umístění kamery, osvětlovače i snímaného objektu při pozorování, takzvané statické snímání. V tomto případě je kamerový systém uspořádán dle obrázku obr. 14 a snímaný objekt je před samotným snímáním umístěn vždy do stejné polohy. Tato varianta bývá v oblasti strojového vidění preferovaná.

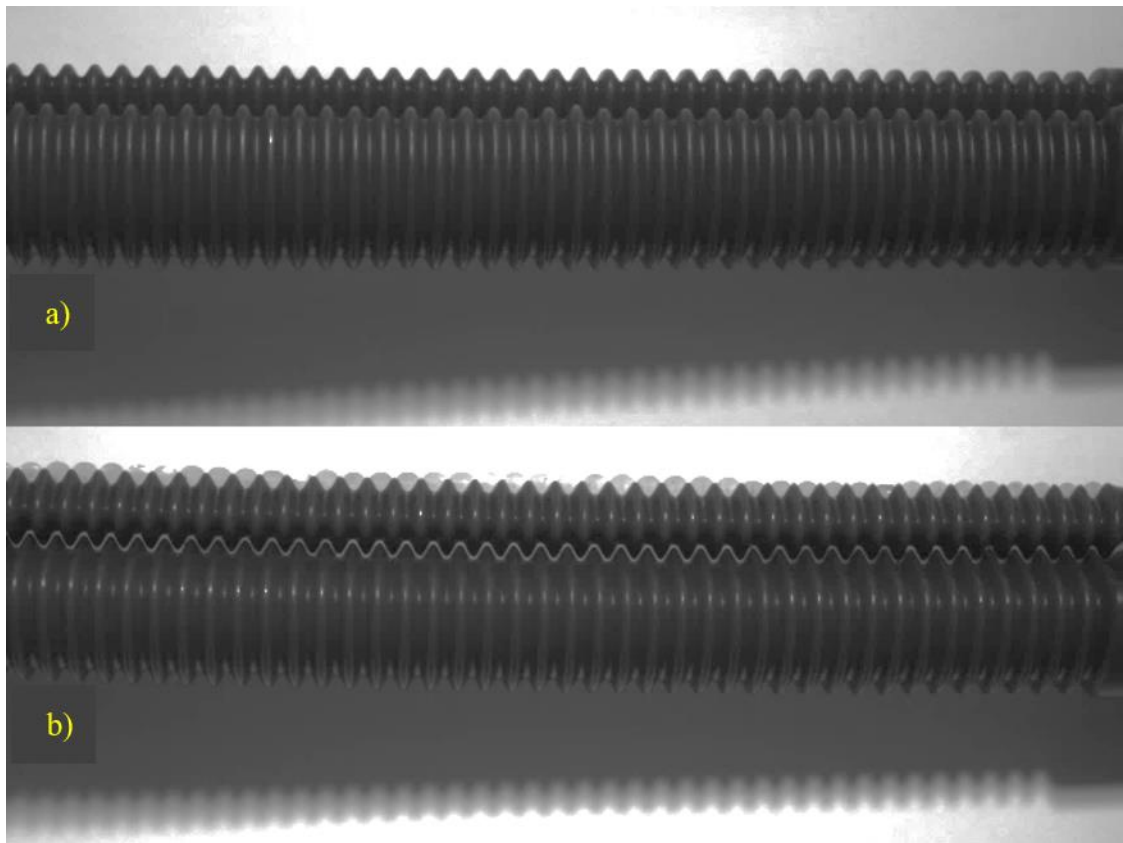
Výhodami jsou minimální změny scény, což usnadňuje integraci a snižuje množství chybových vyhodnocení, a rychlost samotného vyhodnocení, jelikož se nečeká na dokončení rotací částí.

Nevýhodou je ovšem nutnost fixování výchozí polohy objektu, což v některých případech není jednoduše řešitelný problém.

Bohužel při použití zadního osvětlení s dostupnými osvětlovači byli snímky natolik přesvětlené, že na nich nebylo možné lokalizovat oblast přetoku. Proto jsou zde vloženy pouze snímky vytvořené za použití konfigurace předního osvětlení, viz obr. 15.



Obr. 14 fixovaná výchozí poloha snímaného objekt, vlevo – zadní osvětlení, vpravo – přední osvětlení



Obr. 15 Snímky pořízené při použití předního osvětlení, a) bez přetoku, b) s přetokem

5 ŘEŠENÍ ZVOLENÉHO USPOŘÁDÁNÍ

5.1 Výběr vhodné kamery

Kamera, která byla k dispozici na ústavu pro snímání obrazu, je značky Allied Vision, typ Manta G033B, viz obr. 16. Jedná se o monochromatický model, používající rozhraní GigE, přenos informací mezi kamerou a počítačem zajišťuje ethernet.

Parametry a specifikace

Rozlišení	(656 (H) × 492 (V)) px
Poměr stran	4:3
Senzor	Sony ICX414
Typ senzoru	CDD s progresivním skenováním
Velikost senzoru	1/2"
Celkové rozměry senzoru	(7,48 × 6,15) mm
Velikost pixelu	9.9 μm × 9.9 μm
Použitý objektiv	Pentax C1614-M
Uchycené objektivu	C Mount
Ohnisková vzdálenost objektivu	16 mm
Clonové číslo	1,4 ÷ 16
Minimální vzdálenost zaostření	250 mm

Nyní ověříme, zdali je tato kamera pro naše potřeby dostatečná, případně, jestli je potřeba měnit přesnost, nebo dokonce pořídit jiný model.



Obr. 16 Kamera Manta G033B s objektivem Pentax C1614-M [16]

5.1.1 Výpočet minimálního rozlišení kamery

Výpočet vychází z velikosti zorného pole, velikosti nejmenšího prvku, který je třeba detekovat a počtu pixelů, potřebných pro jeho zobrazení. Pro kontrolu geometrické podobnosti je tato hodnota rovna 1 px, pro hledání hran 1/3 px [1].

$$\text{FOV} = \text{maximální rozměr objektu} + \text{maximální variabilita polohy} + \text{okraj} + \text{zohlednění poměru stran senzoru} \quad (5.1)$$

$$Rc = \frac{FOV}{Rs} [px] \quad (5.2)$$

$$Rc = FOV \cdot \frac{Nf}{Sf} [px] \quad (5.3)$$

$$Rs = \frac{FOV}{Rc} \left[\frac{mm}{px} \right] \quad (5.4)$$

$$Rs = \frac{Sf}{Nf} \left[\frac{mm}{px} \right] \quad (5.5)$$

Veličina	Symbol	rozměr
Velikost zorného pole	FOV	[mm]
Rozlišení kamery	Rc	[px]
Prostorové rozlišení	Rs	[mm/px]
Velikost nejmenšího prvku	Sf	[mm]
Počet pixelů pro zobrazení nejmenšího hledaného prvku	Nf	[px]

Jelikož je velikost zorného pole pro kontrolu přítomnosti přetoku mnohem větší než velikost zorného pole pro kontrolu průchodnosti, začneme nejprve s přetokem a pomocí vztahu (5.1) vypočteme velikost zorného pole v horizontálním směru. Maximální velikost zájmové oblasti² objektu v horizontálním směru je 155 mm. Maximální variabilita polohy v horizontálním směru je definována přesností dopravníku, který objekt přemísťuje, tato hodnota se pohybuje v rozmezí do 1 mm, přičteme tedy 1 mm pro každou stranu. Poté se ještě zhodnotí tzv. okraj³, který byl stanoven jako 10 mm.

$$FOV_{Horiz.} = 155 \text{ mm} + 2 \text{ mm} + 10 \text{ mm} = 167 \text{ mm} \quad (5.6)$$

Velikost zorného pole ve vertikálním směru byla vypočtena pomocí předchozího výsledku a poměru stran senzoru.

$$FOV_{Vert.} = 167 \text{ mm} \cdot \frac{3}{4} = 125,25 \text{ mm} \quad (5.7)$$

Následoval výpočet minimálního rozlišení kamery Rc s využitím vztahu (5.3). Jelikož byla přesnost stavěna jako 0,2 mm, tak tuto hodnotu použijeme jako velikost nejmenšího prvku Sf. Počet pixelů pro zobrazení nejmenšího hledaného prvku Nf je roven 1 px.

$$R_{C_{Horiz. \min}} = FOV_{Horiz.} \cdot \frac{Nf}{Sf} = 167 \text{ mm} \cdot \frac{1 \text{ px}}{0,2 \text{ mm}} = 835 \text{ px} \quad (5.8)$$

² Zájmovou oblastí je označena v tomto případě oblast, po jejíž délce se může vyskytovat přetok.

³ Okrajem se nazývá oblast, která je zaznamenaná na vytvořeném obraze, ale již nejedná se o daný objekt. Jednoduše řečeno se jedná o pozadí. Pozadí je mnohdy velmi důležité, protože některé algoritmy (např. měření maximálního rozměru) využívají kontrastu mezi pozadím a objektem.

$$RC_{Vert. \min} = FOV_{Vert.} \cdot \frac{Nf}{Sf} = 125,25 \text{ mm} \cdot \frac{1 \text{ px}}{0,2 \text{ mm}} = 626,25 \text{ px} \quad (5.9)$$

Vypočtené hodnoty pro minimální potřebné rozlišení za dané přesnosti udávají rozlišení (835×627) px což kamera, která byla k dispozici, nespĺňuje. Další postup může být tedy jeden z následujících bodů:

- Zachování požadované přesnosti 0,2 mm a snížení velikosti zorného pole
- Zachování velikosti zorného pole a snížení požadované přesnosti
- Pořízení kamery s minimálním rozlišením (835×627) px.

Bylo rozhodnuto pro druhou možnost, tedy snížení požadované přesnosti a zachování velikosti zorného pole. Pomocí vztahu (5.3) byla velikost nejmenšího detekovatelného prvku stanovena následovně:

$$Sf_{\min} = FOV \cdot \frac{Nf}{RC_{Horiz.}} = 167 \text{ mm} \cdot \frac{1 \text{ px}}{640 \text{ px}} = 0,261 \text{ mm} \quad (5.10)$$

Závěr tedy je, že s kamerou Manta G033B jsme schopni detekovat prvky o nejmenší velikosti 0,261 mm po celé délce zájmové oblasti. Pro výpočet prostorového rozlišení byl použit vztah (5.4).

$$Rs = \frac{FOV_{Horiz.}}{RC_{Horiz.}} = \frac{167 \text{ mm}}{656 \text{ px}} = 0,255 \frac{\text{mm}}{\text{px}} \quad (5.11)$$

Z vypočtené hodnoty je zřejmé, že pro zaznamenání prvku o velikosti 1 mm je k dispozici 3,93 px, což znamená, že podmínka zaznamenání 1 mm obrazu alespoň 1 pixelem je splněna.

Pro výpočet potřebného rozlišení pro kontrolu průchodnosti byli použité stejné vztahy jako pro kontrolu přetoku.

Maximální velikost zájmové oblasti je 21 mm a variabilita polohy je stejná jako v kontrole přetoku, protože je v obou případech použit stejný dopravník. V tomto případě byla velikosti okraje použita pro výpočet $FOV_{Horiz.}$ 20 mm z důvodu zachování dostatečného okraje i ve vertikálním směru po zohlednění poměru stran senzoru.

$$FOV_{Horiz.} = 21 \text{ mm} + 2 \text{ mm} + 20 \text{ mm} = 43 \text{ mm} \quad (5.13)$$

$$FOV_{Vert.} = 43 \text{ mm} \cdot \frac{3}{4} = 32,25 \text{ mm} \quad (5.12)$$

$$RC_{Horiz. \min} = FOV_{Horiz.} \cdot \frac{Nf}{Sf} = 43 \text{ mm} \cdot \frac{1 \text{ px}}{0,2 \text{ mm}} = 215 \text{ px} \quad (5.14)$$

$$RC_{Vert. \min} = FOV_{Vert.} \cdot \frac{Nf}{Sf} = 32,25 \text{ mm} \cdot \frac{1 \text{ px}}{0,2 \text{ mm}} = 161,25 \text{ px} \quad (5.15)$$

Vypočtené hodnoty pro minimální potřebné rozlišení za dané přesnosti udávají rozlišení (215×161,25) px, což kamera Manta G033B splňuje, tudíž není třeba jakýchkoliv úprav.

$$R_s = \frac{FOV_{Horiz.}}{R_{CHoriz.}} = \frac{43 \text{ mm}}{215 \text{ px}} = 0,2 \frac{\text{mm}}{\text{px}} \quad (5.16)$$

Z vypočtené hodnoty je zřejmé, že pro zaznamenání prvku o velikosti 1 mm je k dispozici 5 px, což znamená, že podmínka zaznamenání 1 mm obrazu alespoň 1 pixelem je splněna.

V této kapitole bylo tedy zjištěno, že po menším snížení přesnosti rozlišení u kontroly přetoku kamera Manta G033B požadavkům vyhovuje a pro kontrolu průchodnosti tyto požadavky několikanásobně převyšuje.

5.1.2 Výběr objektivu

Kapitola je zaměřena na ověření vhodnosti objektivu, který tato kamera obsahuje. Nejprve byly definovány potřebné vztahy [1]:

$$\beta = -\frac{\text{velikost snímače}}{FOV} [-] \quad (5.17)$$

$$f' = a \cdot \frac{\beta}{1 - \beta} [\text{mm}] \quad (5.18)$$

$$a = f' \cdot \frac{1 - \beta}{\beta} [\text{mm}] \quad (5.19)$$

$$z' = -f' \cdot \beta [\text{mm}] \quad (5.20)$$

Název	Značka	Jednotka
Zvětšení	β	[-]
Velikost zorného pole	FOV	[mm]
Obrazová ohnisková vzdálenost	f'	[mm]
Předmětová vzdálenost (také pracovní vzdálenost)	a	[mm]
Vzdálenost mezi obrazovým ohniskem objektivu a plochou snímače	z'	[mm]

Je třeba mít na paměti, že výše uvedené vztahy vedou pouze na bližší aproximaci počítaných parametrů, jelikož se jedná o tlusté čočky. Vztahy totiž byly odvozeny pro čočky tenké [1].

Nejprve byly výpočty provedeny opět pro kontrolu přetoku. Nejdříve byl proveden výpočet zvětšení pomocí vztahu (5.17). Velikost snímače je součin velikosti pixelu a počtu pixelů v příslušném směru.

$$\beta = -\frac{\text{velikost snímače v horiz. směru}}{FOV_{Horiz.}} = -\frac{9,9 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \cdot 656}{167 \text{ mm}} = -0,039 \quad (5.21)$$

Výsledná hodnota zvětšení je záporná díky znaménkové konvekci, kde platí, že hodnoty parametrů v obrazové části jsou kladné a v předmětové části záporné.

Dále bylo třeba zjistit hodnotu obrazové ohniskové vzdálenosti pomocí vztahu (5.18). Hodnota pracovní vzdálenosti je často omezena velikostí pracovního prostoru, do kterého kamerový systém integrujeme. V našem případě ovšem nejsou žádná taková omezení. Počáteční aproximace pracovní vzdálenosti byla tedy zvolena jako $a = 350 \text{ mm}$. Pomocí této počáteční hodnoty byla vypočtena přesná hodnota předmětové vzdálenosti.

$$f' = a \cdot \frac{\beta}{1 - \beta} = 350 \text{ mm} \cdot \frac{-0,039}{1 - (-0,039)} = -13,14 \text{ mm} \quad (5.22)$$

Standardně mají objektivy ohniskové vzdálenosti 8, 16, 25, 35, 50 mm a větší [1]. Tudíž byl objektiv uchycený na kameře, tj. Pentax C1614-M, jehož ohnisková vzdálenost je 16 mm nejbližší možnou volbou.

Poté byla vypočtena skutečná pracovní vzdálenost, dle vztahu (5.19).

$$a = f' \cdot \frac{1 - \beta}{\beta} = 16 \text{ mm} \cdot \left| \frac{1 - (-0,039)}{-0,039} \right| = 426 \text{ mm} \quad (5.23)$$

Na závěr byla pomocí vztahu (5.20) ověřena vzdálenost mezi plochou snímače a obrazovým ohniskem objektivu. Tuto vzdálenost lze případně doostřit na místě.

$$z' = -f' \cdot \beta = -16 \text{ mm} \cdot (-0,039) = 0,624 \text{ mm} \quad (5.24)$$

Dále byl celý postup zopakován pro kontrolu průchodnosti.

$$\beta = -\frac{\text{velikost snímače v horiz. směru}}{FOV_{\text{Horiz.}}} = -\frac{9,9 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \cdot 656}{43 \text{ mm}} = -0,151 \quad (5.25)$$

Počáteční aproximace pracovní vzdálenosti byla zvolena jako 250 mm, tedy $a = 250 \text{ mm}$.

$$f' = a \cdot \frac{\beta}{1 - \beta} = 250 \text{ mm} \cdot \frac{-0,151}{1 - (-0,151)} = -32,8 \text{ mm} \quad (5.26)$$

Nejbližší standartní ohnisková vzdálenost objektivu byla tedy 35 mm, ovšem v případě této úlohy byl k dispozici pouze objektiv Pentax C1614-M, tudíž je ohnisková vzdálenost, stejně jako v kontrole přetoku, rovna 16 mm. Níže je ovšem uveden také výpočet pro ideální objektiv, který by byl pro tuto úlohu vhodnější.

$$a_{\text{použité}} = f' \cdot \frac{1 - \beta}{\beta} = 16 \text{ mm} \cdot \left| \frac{1 - (-0,151)}{-0,151} \right| = 122 \text{ mm} \quad (5.27)$$

V tomto případě je hodnota vypočtené pracovní vzdálenosti rovna 122 mm, což je ovšem daleko menší než minimální pracovní vzdálenost udávaná výrobcem, proto byla kamera umístěna do výrobcem doporučené vzdálenosti a to 250 mm.

Na závěr byla opět ověřena vzdálenost mezi plochou snímače a obrazovým ohniskem objektivu. Tuto vzdálenost lze případně doostřit na místě.

$$z'_{\text{použité}} = -f' \cdot \beta = -16 \text{ mm} \cdot (-0,151) = 2,42 \text{ mm} \quad (5.28)$$

V případě možnosti volby by byl pro kontrolu průtoku použit telecentrický objektiv s ohniskovou vzdáleností 35 mm. Níže jsou uvedeny hodnoty, které by odpovídali takového objektivu.

$$a_{\text{ideální}} = f' \cdot \frac{1-\beta}{\beta} = 35 \text{ mm} \cdot \left| \frac{1-(-0,151)}{-0,151} \right| = 267 \text{ mm} \quad (5.29)$$

$$z'_{\text{ideální}} = -f' \cdot \beta = -32 \text{ mm} \cdot (-0,151) = 4,83 \text{ mm} \quad (5.30)$$

5.2 Konfigurace uspořádání

Tato kapitola se zabývá zvoleným uspořádáním kamerového systému a řešením vzniklých problémů. Pro zajištění stále stejné polohy snímaného objektu byl sestaven stojan z hliníku a dřeva, do kterého je objekt vkládán shora viz obr. 17.

5.2.1 Kontrola průchodnosti

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1, pro kontrolu průchodnosti se ukázala jako nejvhodnější varianta uspořádání použití zadního osvětlení. Konfigurace uspořádání je zobrazena na obr. 17.

Jelikož osvětlovač LED, který byl k dispozici, měl příliš vysokou svítivost, bylo pro vytvoření správně osvětleného snímku třeba snížit množství světla dopadajícího na snímač kamery. K tomuto účelu bylo použito šest vrstev klasického kancelářského papíru naskládaných na sebe a umístěných na vstupní otvor objektu. V praxi ovšem doporučuji použít osvětlovač s regulovatelnou intenzitou osvětlení.

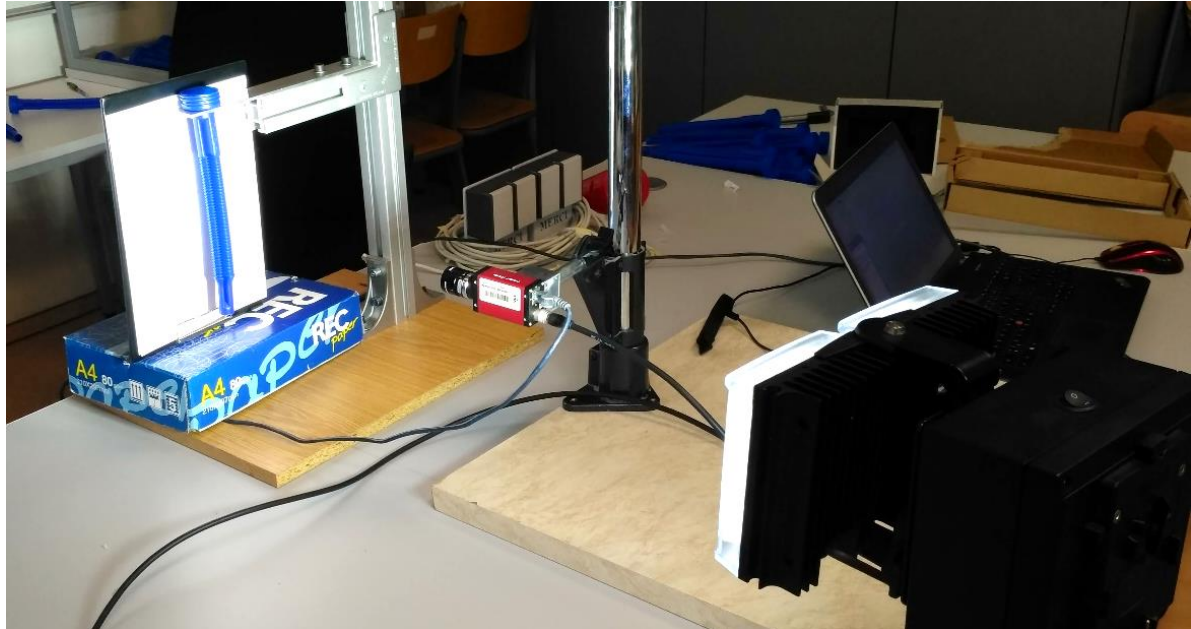


Obr. 17 Konfigurace uspořádání pro kontrolu průtoku

5.2.2 Kontrola přetoku

Jak již bylo nastíněno v kapitole 4.2, pro kontrolu přetoku se ukázala jako nejvhodnější volba uspořádání za použití fixované výchozí polohy snímaného objektu a předního osvětlení.

Jelikož většina algoritmů pracuje převážně s kontrastem v obraze, tak byla za objekt umístěna deska s bílým papírem za účelem získání maximálního kontrastu mezi pozadím a sledovaným přetokem. Konfigurace uspořádání je zobrazena na obr. 18.



Obr. 18 Konfigurace uspořádání pro kontrolu přetoku

5.3 Vytvoření snímků

Poté, co byla připravena konfigurace uspořádání, se přešlo k vytváření jednotlivých snímků. Pro interakci použitého notebooku s kamerou byl použit software Vision Assistant od společnosti National Instruments.

Tento software nabízí několik způsobů pro vytvoření snímků. Pro naše účely byla zvolena možnost získání snímků pomocí GigE sběrnice, pomocí které byla kamera připojená k programu. Poté byla z rolovacího menu vybrána připojená kamera a dle potřeby byly upraveny parametry jako expoziční čas a zesílení signálu. Následně byla kamera nastavena do požadované pracovní vzdálenosti a obraz manuálně doostřen.

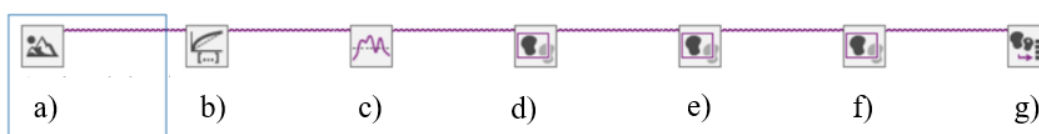
Poté bylo vytvořeno dostatečné množství snímků z každé varianty možných uspořádání, zvolena nejvhodnější varianta a následně vytvořeno 30 snímků oblasti pro kontrolu přetoku a 13 snímků oblasti kontroly průtoku, což bylo postačující pro následné programování i testování.

5.4 Programování algoritmu kontroly průtoku

Po vytvoření dostatečného množství snímků bylo třeba tyto snímky předpřipravit pro následnou analýzu, která rozhodne o kvalitě daného objektu. Postupně je stručně okomentován celý algoritmus, na jehož začátku je vždy původní snímek (angl. original image).

Před samotným začátkem programování bylo třeba se na chvíli zastavit a předem promyslet postup. V tomto případě bylo předmětem kontroly zjistit, jestli je vnitřní otvor objektu průchozí, a snímky byly pořízeny tak, že nejsvětlejší oblast celé fotografie se nachází právě v oblasti otvoru a v jeho blízkosti. Cílem bylo tedy naprogramovat takový algoritmus, viz obr. 19, který změří obsah plochy světlé oblasti, která je uvnitř objektu.

Jednotlivé funkce jsou postupně popsány a vizualizace algoritmu na zvoleném objektu je na obr. 21.



Obr. 19 Algoritmus kontroly průtoku, a) původní snímek, b) vyhledávací tabulka, c) segmentace prahováním, d) pokročilá morfologie 1, e) pokročilá morfologie 2, f) pokročilá morfologie 3, g) analýza částic

5.4.1 Vyhledávací tabulka (angl. lookup table)

První použitou funkcí byla tzv. vyhledávací tabulka, která mění kontrast a jas snímku. Po zvolení této tabulky je k výběru několik metod, které lze na daný snímek aplikovat. V závislosti na tom, které části snímku je třeba zvýraznit případně potlačit, se poté volí vhodná metoda. V tomto případě byla zvolena metoda druhé odmocniny (angl. square root) pro současné zvýraznění světlých částí a potlačení tmavých.

5.4.2 Segmentace prahováním (angl. threshold)

Druhou použitou funkcí byla segmentace prahováním, pomocí které se snímek převádí do binárních hodnot. Původní monochromatický snímek obsahuje pixely, kterým je přidělena hodnota 0 až 256 podle jejich jasnosti. Pomocí vhodného nastavení této funkce jsme schopni dále odfiltrovat zájmové části snímku od rušivých.

Při aplikování této funkce se v našem případě konfigurovaly 3 parametry. Prvním bylo, jaké pixely hledáme. Možnosti byly tmavé, světlé a šedé. Jak již bylo zmíněno výše, v tomto případě jsou pro algoritmus podstatné světlé pixely, a proto byla tedy zvolena tato možnost.

V dalším kroku se volila metoda filtrace, na výběr je manuální nastavení a několik automatických metod. Ukázalo se, že zvolením manuální filtrace a ručním nastavením hodnoty pixelů, které chceme ponechat, je nejvhodnější řešení.

Poslední parametr, který se nastavoval, byl interval hodnoty pixelů, které chceme ve snímku ponechat pro další zpracování, tento interval byl po několika iteracích zvolen jako 104 až 256.

5.4.3 Pokročilá morfologie (angl. advanced morphology)

Po převodu snímku do binárních hodnot se odemkne balíček procesních funkcí, které slouží k pokročilejšímu zpracování obrazu. Procesní funkce, která byla postupně třikrát využita, se nazývá pokročilá morfologie. Tato funkce umožňuje uživateli měnit binární obraz tak, aby dále

odfiltroval rušivé oblasti, či dokonce přiřadil pixely tam, kde došlo k nežádoucímu odstranění vlivem použití předešlé funkce segmentace prahováním.

Po zvolení této funkce je na výběr z několika přednastavených metod, které je možno použít, mezi které patří například: odstranění malých, či velkých a také překrývajících se objektů, vyplnění děr a jiné.

Metoda, která se skrývá za „pokročilá morfologie 1“, je odstranění hraničních objektů. Tato metoda byla použita pro další odstranění rušivých oblastí.

Metoda, která byla použita následně, se nazývá konvexní obal (angl. convex hull). Tato metoda byla zvolena, protože u průchozích prvků docházelo při použití osvětlení ke vzniku oblasti stínu podél vnitřního otvoru, který byl funkcí segmentace prahováním vyhodnocován jako plný materiál. Pomocí funkce konvexní obal je tento stín opět označen jako světlá oblast.

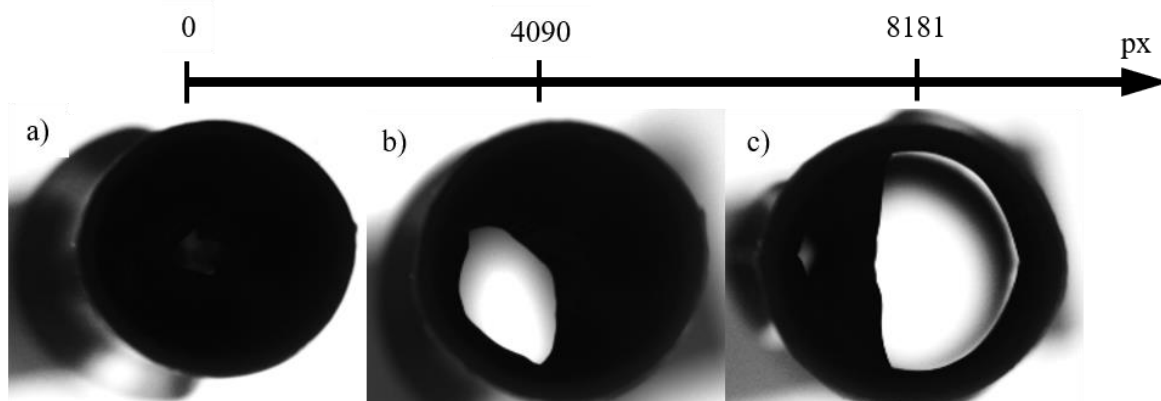
Poslední metodou, která byla použita před samotnou analýzou snímku bylo odstranění malých, nežádoucích prvků ze snímku. Tato možnost nabízí zvolení počtu iterací, během kterých jsou malé objekty odstraňovány. Během testování bylo zjištěno, že dostatečný počet iterací je 2.

5.4.4 Analýza částic (angl. particle analysis)

Poté, co je již snímek zpracován všemi předchozími funkcemi jej můžeme analyzovat. Plocha, která na snímku zbyla, reprezentuje poté pouze světlo procházející skrze objekt. Nezbývá tedy nic jiného než pouze spočítat počet pixelů v této oblasti, porovnat ji s předem stanovou hodnotou a může dojít k vyhodnocení kvality.

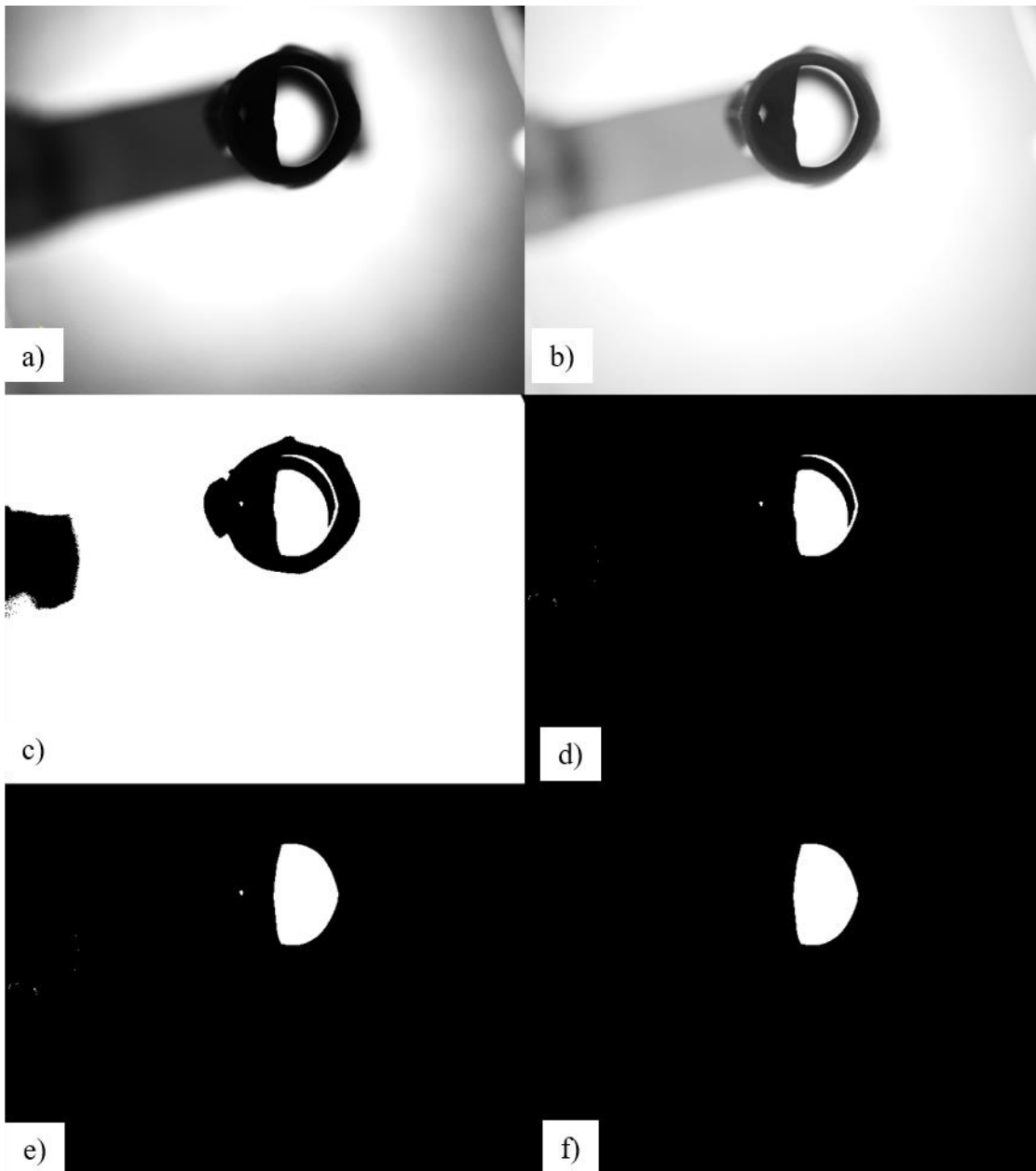
Po analýze zvolených objektů bylo zjištěno, že světlá plocha, reprezentující průchozí oblast je u vzorového, naprosto průchozího objektu reprezentována 8181 px. Pomocí této hodnoty lze stanovit podmínka: pokud není počet pixelů větší než 50 % vzorové hodnoty, tedy 4090 px⁴, objekt je vyhodnocen jako neprůchozí. Obr. 20 zobrazuje vzorky reprezentující jednotlivé stavy.

Čas potřebný pro celý algoritmus kontroly přetoku je nejvýše 0,56 ms, což splňuje podmínku maximálně 2,9 sekund na jeden objekt.



Obr. 20 Zobrazení vzorků, reprezentujících jednotlivé stavy. a) neprůchozí objekt – 0 px, b) hraniční objekt – 4090 px, c) vzorový objekt – 8181 px.

⁴ Jelikož bylo kritérium kvality stanovené jako procentuální hodnota z naprosto průchozího objektu, není třeba kalibrovat snímky a převádět hodnoty pixelů do skutečných rozměrů.



Obr. 21 Algoritmus kontroly průtoku, a) Původní snímek, b) Vyhledávací tabulka, c) segmentace prahováním, d,e,f) Pokročilá morfologie

5.5 Programování algoritmu kontroly přetoku

Stejně jako v předchozí kapitole bylo na začátku třeba pořídit dostatečné množství snímků, které se poté předpřipraví pro následnou analýzu. Opět je stručně okomentován celý algoritmus, viz obr. 22, na jehož začátku je vždy původní snímek (angl. original Image).

Před samotným začátkem programování bylo opět třeba se na chvíli pozastavit a předem promyslet postup. V případě kontroly přetoku je cílem vyšetřit přítomnost přetokové části a pokud je tato část přítomna, zjistit, zda je natolik rozměrná, že hrozí pořezání uživatele, či obsluhy ostrými okraji při manipulaci s objektem. Snímky byly vytvořeny tak, že je přetoková část nejsvětlejší oblastí snímku. Chceme tedy zjistit, o kolik pixelů přesahuje případná světlá část přetoku, nad tmavou částí drážkování objektu. Obr. 24 zobrazuje, jak jednotlivé funkce zpracovávají obraz vybraného objektu.



Obr. 22 Algoritmus kontroly přetoku, a) původní snímek, b) filtr, c) monochromatická morfologie, d) analýza obrazu

5.5.1 Filtr

První použitou funkcí byl filtr ze záložky černobílé funkce. Pomocí vhodného nastavení této funkce lze zvýraznit zájmové části pro usnadnění dalších operací.

Při aplikaci se nastavuje nejprve druh požadovaného filtru. Na výběr je několik vyhlazovacích filtrů, zvýraznění hran a nakonec konvoluce – zvýraznění detailů, která byla použita, jelikož měla největší vliv na zvýšení kontrastu přetokové oblasti nejen vůči světlému pozadí, ale i ostatním částem objektu.

5.5.2 Monochromatická morfologie

Druhá a zároveň poslední použitá funkce pro předpřipravení obrazu pro následnou analýzu byla monochromatická morfologie, která se opět nacházela v záložce černobílé funkce.

Tato funkce je velmi podobná funkci „pokročilá morfologie“, která byla použita pro předpřipravení snímku pro kontrolu průtoku. Ovšem pro použití této funkce není třeba nejprve převádět snímek do binárních hodnot. Při aplikaci funkce je na výběr několik přednastavených metod morfologie, které jsou totožné s metodami pokročilé morfologie. Byla zvolena metoda „otevřít“ (angl. open), která ze snímku odstranila hrany, které byly pro následnou analýzu nepotřebné a při jejich přítomnosti docházelo k chybnému vyhodnocení.

5.5.3 Analýza obrazu

Poté, co je snímek zpracován předchozími funkcemi, jej lze analyzovat. Pro analýzu byla zvolena funkce „maximální svorka“ (angl. max clamp), která se nacházela v záložce strojové vidění. Při použití funkce dojde ke změření maximální vzdálenosti mezi dvěma prvky dle nastavených parametrů.

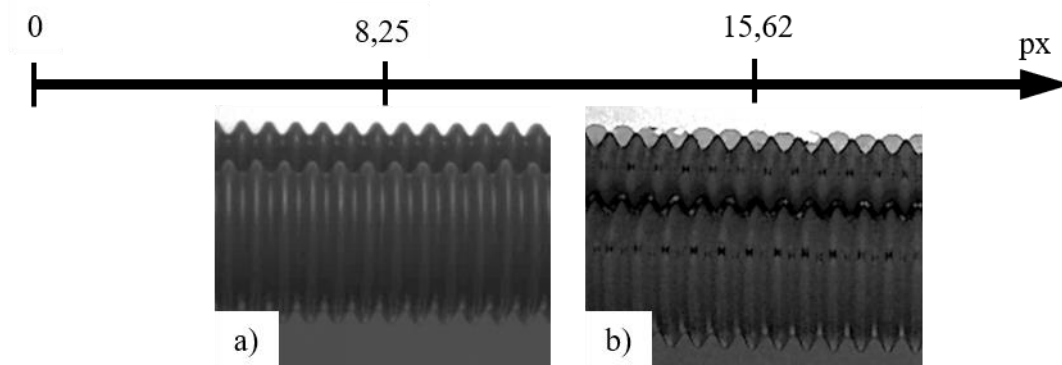
Při aplikaci funkce maximální svorka se nastavuje daleko více parametrů než u předchozích funkcí. Nejprve se nastaví poloha a velikost oblasti, ve které se měření koná, ta byla nastavena tak, aby byla vždy změřena maximální vzdálenost mezi patou a hlavou výstupků v případě kvalitního objektu a maximální vzdálenost mezi patou výstupku a nejbližším bodem přetokové oblasti v případě nekvalitního objektu.

Dále se jedná o parametry ovlivňující hledání hran jako citlivost při hledání hran (50 px) a jejich minimální délka (25 px), velikost hledacího kroku (1) a filtr, použitý pro hledání hran (normální). Také byla využita možnost zvolit zvýšení přesnosti na pod-pixelovou hodnotu.

Poté se nastavují parametry související s umístěním virtuálního svorky: orientace (vertikální), povolená tolerance natočení ($\pm 10^\circ$), počáteční místo svorky (místo přechodu světlé oblasti do tmavší) a koncové místo svorky (opět místo přechodu světlé oblasti do tmavší).

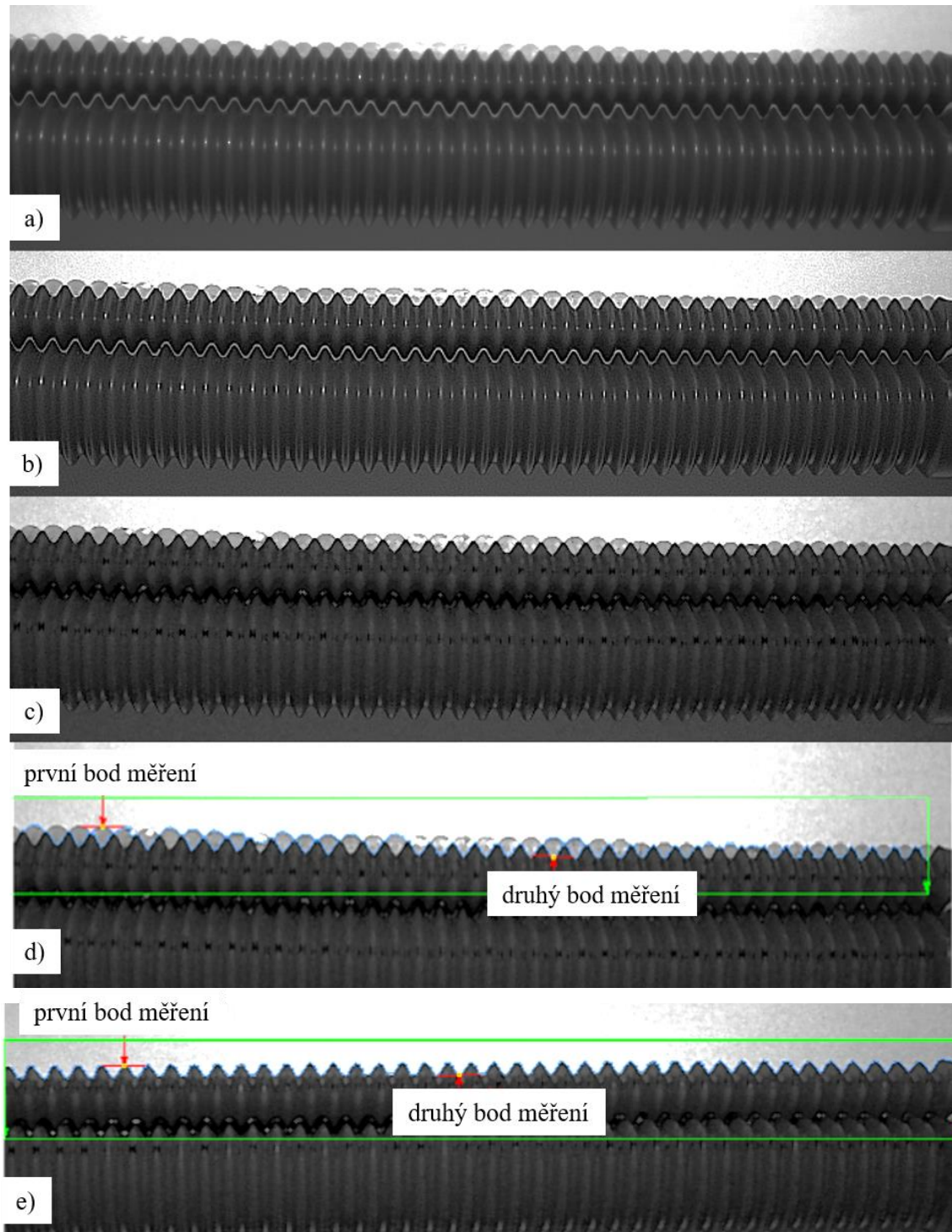
Výstupem této funkce je tabulka hodnot udávající polohu a natočení svorky, ovšem pro tuto úlohu je nejdůležitější informace naměřená vzdálenost. Jako hraniční hodnota, pro vyhodnocení přítomnosti přetokové oblasti byla zvolena vzdálenost 8,25 px⁵, jelikož tento rozměr odpovídá maximální výšce drážkování a pokud je hodnota vyšší, již se na objektu nachází přetoková oblast takových rozměrů, že může dojít k pořezání ostrými okraji při manipulaci s objektem. Obr. 23 zobrazuje vzorky, reprezentující jednotlivé stavy.

Čas potřebný pro celý algoritmus kontroly přetoku je nejvýše 0,34 ms, což splňuje podmínku maximálně 2,9 sekund na jeden objekt.



Obr. 23 Zobrazení vzorků, reprezentujících jednotlivé stavy.
a) objekt bez přetoku – maximální výška drážkování 8,25 px,
b) objekt s přetokem – naměřený rozměr 15,62 px.

⁵ Jelikož bylo vyhodnocovací kritérium opět stanoveno vůči rozměrům kvalitního výrobku a zároveň jsou rozdíly mezi kvalitním a nekvalitním výrobkem značné, nebylo opět třeba se zabývat kalibrací obrazu.



Obr. 24 Algoritmus kontroly přetoku a) původní snímek, b) filtr, c) monochromatická morfologie, d) analýza obrazu objektu s přetokem, e) analýza obrazu objektu bez přetoku

6 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Aktuálně je kontrola kvality v podniku prováděna manuálně, a to náhodným výběrem několika kusů a jejich optickou kontrolou obsluhou. Tento způsob kontroly není dle dnešních standardů příliš vyhovující, protože tímto způsobem kontroly kvality nelze zaručit například: exportování skutečně kvalitních výrobků, stále stejná vyhodnocovací kritéria ani skutečnost, že při únavě obsluhy může dojít k vyhodnocení kvalitních výrobků jako nekvalitních a naopak.

Vzhledem k tomu, že cílem firmy je navýšit kapacitu výroby ze zhruba 20 000 kusů na teoretických 25 000 ks na den, naskytla se tu možnost instalace optické kontroly kvality, která zvýší efektivitu kontroly, zkontroluje každý jednotlivý objekt a odstraní možnost nesprávného vyhodnocení z důvodu únavy, či nepozornosti. Další výhodou systému je možnost na základě neustále sbíraných dat provádět změny ve výrobě s cílem snížení zmetkovitosti.

Pro rok 2019 je minimální mzda 13 350 korun měsíčně z čehož plynou měsíční náklady pro zaměstnavatele zhruba 18 000 korun měsíčně na osobu. V našem případě 3 zaměstnanců se jedná o výdaje 54 000 korun měsíčně [17].

Ceny samotných kamer se pohybují v řádech desetitisíců, konkrétně cena kamery použité v této práci (Manta G033B) je zhruba 20 000 korun. Cena LED osvětlení se pohybuje v řádech tisíců korun. Poté je třeba zohlednit cenu konstrukce kontrolní buňky atd. Nejnákladnější na celé aplikaci je ovšem samotný software. V této práci byl použit software od firmy National Instruments – Vision assistant, jehož pořizovací cena je 115 000 korun. Je potom tedy ke zvážení, zda je výhodnější kontrolu kvality pomocí strojového vidění integrovat pomocí vlastních sil, nebo zadat poptávku firmám, které se této problematice věnují.

Při srovnání náročnosti aplikace s jinými byly maximální náklady odhadnuty na 150 až 250 tisíc korun v závislosti na tom, zda je kamerový systém dodán firmou, tedy není nutný nákup programovacího software, nebo integrován vlastními silami. Návratnost investice je tedy 3 až 5 měsíců. Již samotná návratnost svědčí o vhodnosti integrace kontroly kvality pomocí strojového vidění do výroby. Ovšem nespornou výhodou kontroly kvality pomocí strojového vidění je její škálovatelnost. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách samotná kontrola a vyhodnocení jednoho kusu trvá nejvýše 0,56 ms. Z čehož plyne, schopnost teoreticky zkontrolovat až 154 milionů kusů za 24 hodin. Je zřejmé, že takto vysoké produkce nelze dosáhnout, protože samotná kontrola objektů netvoří nejpomalejší část výroby. Hodnota pouze kvantifikuje škálovatelnost aplikace.

7 ZÁVĚR

Úvodní část teoretické části bakalářské práce se věnuje specifikacím kontrolního systému. Tato kapitola popisuje znaky kvality kontrolovaného objektu, požadavky na přesnost, rychlost a způsob snímání. V poslední řadě jsou zde zohledněny možné rušivé vlivy okolí a jejich potlačení.

Dále jsou popsány komponenty kontrolního systému. Kapitola poskytuje čtenáři stručný návod pro výběr vhodných komponentů při implementaci strojového vidění v optické kontrole kvality výrobků. Podrobně je popsáno osvětlení, kamery a objektivy, ovšem nejvíce pozornosti je věnováno právě osvětlení, které je v oblasti strojového vidění obvykle nejdůležitějším prvkem, jehož nevhodná volba může dokonce znemožnit správné provedení kontroly pomocí kamer.

V praktické části bakalářské práce jsou nejprve popsány různé návrhy řešení kontroly kvality daného objektu včetně jejich individuálních předností a omezení. Poté byl v obou případech zvolen nejspolehlivější návrh – statická kontrola. V případě kontroly průchodnosti bylo vhodnější použití zadního osvětlení a v případě kontroly přetoku byla za daných podmínek vhodnější varianta použití předního osvětlení.

Při řešení zvolených variant byl proveden výpočet vhodnosti kamery, která byla při vypracování k dispozici. V případě kontroly průtoku byla tato kamera více než dostačující, ovšem v případě kontroly přetoku nikoliv. Následně bylo tedy navrženo několik možných řešení nedostačujícího rozlišení kamery a následně zvolena možnost mírného snížení přesnosti, a to z 0,2 mm na 0,261 mm. Snížení přesnosti lze ovšem částečně softwarově kompenzovat, a to pomocí povolení sub-pixelové přesnosti.

Následovalo sestavení a uspořádání kamerového systému a pořízení dostatečného množství snímků. Poté byla algoritmus kontroly naprogramován za použití software od firmy National Instruments – Vision Assistant. Samotné zpracování a vyhodnocení snímků trvá nejvýše 0,56 ms, což více než dostatečně splňuje podmínku zkontrolovat jeden výrobek za nejvýše 2,9 sekund.

V poslední řadě bylo provedeno ekonomické zhodnocení investice automatizace kontroly kvality pomocí strojového vidění. Náklady na zavedení kontroly kvality pomocí strojového vidění se pohybují v tomto konkrétním případě v rozmezí 150 až 250 tisíc korun s návratností 3 až 5 měsíců.

Strojové vidění je poměrně mladá oblast průmyslu, která díky pokroku v oblastech optiky, osvětlení a automatizačních prvků není příliš nákladná, má spoustu možných uplatnění a vysoký potenciál do budoucna. Ať už se jedná o kontrolu kvality, uchopování neorientovaných výrobků roboty, či autonomní vozidla.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HORNBERG, Alexander. Handbook of machine vision. Second, Revised and Updated Edition. [Chichester: John Wiley, distributor], c2006. ISBN 9783527405848.
- [2] The Imaging & Vision Handbook. [online]. Puchheim: Stemmer imaging, 2016: In Stemmer imaging GmbH, 2016 [cit. 2018-09-15]. ISBN 987-3-00-051330-5. Dostupné z: <http://en.stemmer-imaging.com/imaging-vision-handbook-2016-2017/54916361>
- [3] BATCHELOR, Bruce. Machine vision handbook: with 1295 figures and 117 tables [online]. London: Springer, 2012 [cit. 2019-05-10]. e-ISBN 978-1-84996-169-1.
- [4] HAVLE, Otto. Strojové vidění I: Principy a charakteristiky. Automa [online]. b.r., 2008(1) [cit. 2018-12-24].
- [5] Eola [online]. b.r. [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <http://eola.cz/produkty-sluzby/strojove-videni/cognex-systemy-strojoveho-videni#in-sight>
- [6] FELL, Julia. How to Choose a Machine Vision Camera. Qualitymag [online]. 2017 [cit. 2018-12-23]. Dostupné z: <https://www.qualitymag.com/articles/93861-how-to-choose-a-machine-vision-camera>
- [7] GŘEŠ, Tomáš. DÍL 5: APLIKACE PRO ŘÁDKOVÉ KAMERY. Kamery.atesystem [online]. b.r. [cit. 2018-12-23]. Dostupné z: <http://kamery.atesystem.cz/know-how/line-scan-velky-pruvodce-radkovymi-kamerami/dil-7-aplikace-pro-radkove-kamery/>
- [8] Bayerova maska [online]. b.r. [cit. 2018-12-23]. Dostupné z: <http://kamery.atesystem.cz/know-how/slovník-pojmu-ve-strojovem-videni/bayerova-mask/>
- [9] Encyklopedie fyziky. Fyzika.jreichl [online]. b.r. [cit. 2018-12-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/748-ccd-zakladni-princip>
- [10] HAVLE, Otto. Strojové vidění III: Kamery a jejich části. Automa [online]. 2008, (3) [cit. 2018-12-24]. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/36925.pdf
- [11] Choosing a lens for machine vision. STEMMER IMAGING [online]. b.r. [cit. 2018-12-24]. Dostupné z: <https://www.stemmer-imaging.com/en/technical-tips/choosing-a-lens-for-machine-vision/>
- [12] Modulační přenosová funkce. Sukupova [online]. 2015 [cit. 2018-12-24]. Dostupné z: <http://www.sukupova.cz/modulacni-prenosova-funkce/>
- [13] Stemmer Imaging [online]. [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <https://www.stemmer-imaging.com/en-fi/products/>

- [14] HAVLE, Otto. Strojové vidění IV: Osvětlovače. Automa [online]. b.r., (4) [cit. 2019-01-24]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/strojove-videni-iv-osvetlovace-2008_04_36988_5853/
- [15] DVOŘÁČEK, Vladimír. Světlo [online]. b.r. [cit. 2019-01-24]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/svetelne-zdroje-svetelne-diody--15723>
- [16] Allied Vision [online]. b.r. [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <https://www.alliedvision.com/en/products/cameras/detail/Manta/G-033.html>
- [17] Informace o minimální mzdě od 1. ledna 2019 [online]. b.r. [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: https://www.mpsv.cz/files/clanky/34725/Informace_o_MMe_od_1_ledna_2019_na_web_MPSV.pdf

9 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

9.1 Seznam zkratk a použitých symbolů

Zkratka	Význam
CCD	charge-coupled device
CMOS	complementary metal oxide semiconductor
FPS	frames per second
GigE	interface standard for industrial cameras
GUI	graphical user interface
LCD	liquid crystal display
LED	light-emitting diode
MTF	modulation transfer function

Symbol	Rozměr	Veličina
a	[mm]	Předmětová vzdálenost (také pracovní vzdálenost)
β	[-]	Zvětšení
f'	[mm]	Obrazová ohnisková vzdálenost
FOV	[mm]	Velikost zorného pole
FOV	[mm]	Velikost zorného pole
Nf	[px]	Počet pixelů pro zobrazení nejmenšího hledaného prvku
Rc	[px]	Rozlišení kamery
Rs	[mm/pixel]	Prostorové rozlišení
Sf	[mm]	Velikost nejmenšího prvku
z'	[mm]	Vzdálenost mezi obrazovým ohniskem objektivu a plochou snímáče

9.2 Seznam obrázků

Obr. 1) Kontrolovaný objekt	17
Obr. 2 Inteligentní kamery firmy Cognex [5]	19
Obr. 3 CCD snímáč s Bayerovou maskou [7]	20
Obr. 4 a) objektiv s pevným ohniskem, b) makro objektiv, c) telecentrický objektiv [13]	22
Obr. 5 a) Působení světla na objekt v úlohách strojového vidění [12]	24
Obr. 6 Vlevo – plošné osvětlovací pole, vpravo – kruhový osvětlovač – a) osvětlovač, b) schéma osvětlovače [14]	25
Obr. 7 Osvětlovač Backlight – a) osvětlovač, b) schéma osvětlovače, c) porovnání osvětlovačů [14]	25
Obr. 8 Kruhový osvětlovač, a) osvětlovač, b) schéma osvětlovače, c) porovnání osvětlovačů [14]	26
Obr. 9 Osvětlovač dark-field a) osvětlovač, b) schéma osvětlovače, c) porovnání osvětlovačů [14]	26
Obr. 10 vlevo – schéma zadního osvětlení, vpravo – získané snímky při použití tohoto uspořádání a) zcela průchozí otvor, b) neprůchozí otvor, c) částečně průchozí otvor	30

Obr. 11 vlevo – schéma předního osvětlení, vpravo – získané snímky při použití tohoto uspořádání, a) zcela průchozí otvor, b) neprůchozí otvor, c) částečně průchozí otvor.....	31
Obr. 12 Statický kamerový systém a rotující objekt	32
Obr. 13 Pohyblivá kamera i osvětlení, statický snímaný objekt	33
Obr. 14 fixovaná výchozí poloha snímaného objekt, vlevo – zadní osvětlení,	34
Obr. 15 Snímky pořízené při použití předního osvětlení, a) bez přetoku, b) s přetokem	35
Obr. 16 Kamera Manta G033B s objektivem Pentax C1614-M [16]	37
Obr. 17 Konfigurace uspořádání pro kontrolu průtoku.....	42
Obr. 18 Konfigurace uspořádání pro kontrolu přetoku	43
Obr. 19 Algoritmus kontroly průtoku, a) původní snímek, b) vyhledávací tabulka, c) segmentace prahováním, d) pokročilá morfologie 1, e) pokročilá morfologie 2, f) pokročilá morfologie 3, g) analýza částic	44
Obr. 20 Zobrazení vzorků, reprezentujících jednotlivé stavy. a) neprůchozí objekt – 0 px, b) hraniční objekt – 4090 px, c) vzorový objekt – 8181 px.....	45
Obr. 21 Algoritmus kontroly průtoku, a) Původní snímek, b) Vyhledávací tabulka, c) segmentace prahováním, d,e,f) Pokročilá morfologie	46
Obr. 22 Algoritmus kontroly přetoku, a) původní snímek, b) filtr, c) monochromatická morfologie, d) analýza obrazu	47
Obr. 23 Zobrazení vzorků, reprezentujících jednotlivé stavy. a) objekt bez přetoku – maximální výška drážkování 8,25 px, b) objekt s přetokem – naměřený rozměr 15,62 px.	48
Obr. 24 Algoritmus kontroly přetoku a) Původní snímek, b) Filtr, c) Monochromatická morfologie, d) Analýza obrazu objektu s přetokem, e) Analýza obrazu objektu bez přetoku .	49