FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ČVUT V PRAZE

Zadání bakalářské práce

Název:	Snímání a následná detekce a klasifikace vad čokoládových forem
Student:	David Kramný
Vedoucí:	Ing. Jakub Novák
Studijní program:	Informatika
Obor / specializace:	Znalostní inženýrství
Katedra:	Katedra aplikované matematiky
Platnost zadání:	do konce letního semestru 2022/2023

Pokyny pro vypracování

Cílem práce je detekce a klasifikace povrchových vad plastových forem na čokoládu.

Plastová forma slouží k odlévání čokoládových bonbónů či celých tabulek. Během procesu výroby je velmi namáhána fyzikálně (horko, zima) i mechanicky (vylamování odlitků). To znamená, že se na ní mohou vyskytovat defekty jako např. praskliny a zlomy či jiné deformace. Práce se zaměřuje na metody detekce a klasifikace vad s použitím metod zpracování obrazu. Práce předpokládá využití pokročilých optických prvků a osvětlení (např. řádkové kamery, specifické osvětlení apod.).

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

Elektronicky schválil/a Ing. Karel Klouda, Ph.D. dne 1. února 2022 v Praze.

Bakalářská práce

SNÍMÁNÍ A NÁSLEDNÁ DETEKCE A KLASIFIKACE VAD ČOKOLÁDOVÝCH FOREM

David Kramný

Fakulta informačních technologií
Katedra aplikované matematiky
Vedoucí: Ing. Jakub Novák
12. května 2022

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta informačních technologií
© 2022 David Kramný. Odkaz na tuto práci.
Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí a nad rámec oprávnění uvedených v Prohlášení na předchozí straně, je nezbytný souhlas autora.

Odkaz na tuto práci: Kramný David. *Snímání a následná detekce a klasifikace vad čokoládových forem.* Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, 2022.

Obsah

Poděkování vi

Prohlášení vii

Abstrakt viii

Seznam zkratek ix

Úvod 1

1 Rešerše 3
1.1 Snímací soustava . . . 3
1.1.1 Kamera . . . 3
1.1.2 Objektiv . . . 3
1.1.3 Osvětlení . . . 3
1.2 Zpracování obrazu . . . 4
1.2.1 Detekce . . . 4
1.2.2 Klasifikace . . . 5
1.3 Příklady z praxe . . . 5

2 Analýza 7
2.1 Čokoládové formy . . . 7
2.2 Proces použití čokoládových forem . . . 7
2.2.1 Zahřátí čokoládových forem . . . 8
2.2.2 Depozice čokolády a náplní . . . 8
2.2.3 Chlazení . . . 9
2.2.4 Vyjmutí čokoládových výrobků z formy . . . 9
2.3 Vady čokoládových forem . . . 9
2.3.1 Škrábance . . . 9
2.3.2 Žebrování . . . 10
2.4 Metodika měření . . . 10

3 Snímací soustava 13
3.1 Snímací soustava s maticovou kamerou . . . 13
3.1.1 Přímé osvětlení ve světlém poli . . . 13
3.1.2 Boční osvětlení v temném poli . . . 13
3.2 Konstrukce snímací soustavy s řádkovou kamerou . . . 14
3.2.1 Kamera a objektiv . . . 14
3.2.2 Lineární pohon . . . 15
3.3 Rozšíření s bílým osvětlením v temném poli . . . 16
3.4 Rozšíření s červeným osvětlením v temném poli . . . 17

4 Realizace **21**
4.1 Dataset . . . 21
4.2 Implementace . . . 21
4.2.1 Algoritmus překrytí . . . 22
4.2.2 Zisk kontur dutin ze snímku formy ve světlém poli . . . 23
4.2.3 Zisk kontur dutin ze snímku formy v temném poli . . . 23
4.2.4 Tvorba vzorové masky . . . 24
4.2.5 Algoritmus detekce a klasifikace . . . 25

5 Výsledky **27**

6 Diskuze **29**
6.1 Snímací soustava . . . 29
6.1.1 Maska . . . 29
6.1.2 Osvětlení ve světlém poli . . . 30
6.1.3 Osvětlení v temném poli . . . 30
6.2 Realizace . . . 30

Závěr **31**

Obsah přiloženého média **37**

Seznam obrázků

1.1 Princip nasvícení povrchových vad. 4

2.1 Barevné odchylky a nepravidelnosti ve formách výrobce Hans Brunner. 8
2.2 Škrábance čokoládové formy. 10
2.3 Vychýlené žebrování. 10
2.4 Škrábance forem. 11

3.1 3D model snímací soustavy. 14
3.2 Reálná podoba snímací soustavy. 15
3.3 Držadlo řádkové kamery. 16
3.4 Nastavení čoček osvětlení Effilux Effiline. 18
3.5 Nastavitelnost bočního osvětlení v temném poli. 19
3.6 Zvýraznění okrajů dutin. 19
3.7 Výrazné přesvícení okrajů dutin u forem výrobce Vormenfabriek. 20

4.1 Snímky konkrétní formy. 22
4.2 Proces zisku kontur dutin ze snímků nasvícených osvětlením ve světlém poli. . . 24
4.3 Proces zisku vzorové masky. 25

Seznam tabulek

3.1 Parametry řádkové kamery Basler Racer raL6144-16gm. 15
3.2 Parametry objektivu Schneider-Kreuznach Apo-Componon 4.0/60-0016. 16
3.3 Parametry teleskopického mezi-kroužku Schneider-Kreuznach Unifoc 12. 17
3.4 Parametry lineárního pohonu Orientalmotor EZSM3E045AZAC. 17
3.5 Parametry osvětlení Effilux Effiline PWR-400-000-PP. 18
3.6 Nastavení osvětlení v temném poli pro úhel 3,3°. 19
3.7 Nastavení osvětlení v temném poli pro úhel 15°. 19
3.8 Parametry kopulového osvětlení Chromasens Corona II. 19
3.9 Parametry osvětlení Effilux Effiline PWR-400-625-PP. 20
3.10 Schneider Kreuznach BP 635-50 HT. 20

4.1 Zastoupení forem (ks) v závislosti na výrobci a barvě. 21

5.1 Výsledky detekčního algoritmu vad mimo okraj dutin. 28
5.2 Výsledky detekčního algoritmu vad okrajů dutin. 28
5.3 Výsledky detekčního algoritmu vad okrajů dutin. 28

Děkuji Ing. Jakubu Novákovi za odborné vedení, ochotu a cenné rady, které mi poskytl při zpracování bakalářské práce. Dále mé poděkování patří Bc. Aleksandru Bazkovi za ochotu a pomoc s hardwarovou částí práce. Děkuji také celému ImproLabu, že mi umožnili vyžít dostupné vybavení, bez něhož by nebylo bakalářskou práci možné vytvořit.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů, zejména skutečnost, že České vysoké učení technické v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 citovaného zákona.

V Praze dne 12. května 2022 .....

Abstrakt

Předmětem bakalářské práce je snímání a následná detekce a klasifikace vad čokoládových forem používaných k výrobě čokoládových bonbónů apod. Pro akvizici snímků je navržena snímací soustava využívající řádkovou kameru, osvětlení v temné poli a osvětlení ve světlém poli. Detekční algoritmus je založen na hranové detekci. Vady jsou klasifikovány do dvou skupin, dle testu jímž byly odhaleny. Detekované vady okrajů dutin (první skupina) jsou správně detekovány v 78 % případů. Povrchové vady (druhá skupina) byly správně detekovány v 76 % případů.

Klíčová slova čokoládové polykarbonátové formy, detekce povrchových vad, klasifikace vad, snímací soustava, osvětlení v temném poli, kopulové osvětlení, automatizace kvality kontroly

Abstract

The bachelor thesis aims at the acquisition and subsequent detection and classification of surface defects in chocolate moulds used for the production of chocolate candies, etc. A sensing system using a line camera, dark-field illumination and bright-field illumination is proposed for image acquisition. The detection algorithm is based on edge detection. The defects are classified into two groups according to the test by which they are detected. The detected edge defects (first group) of the cavities are correctly detected in 78 % of cases. Surface defects (second group) were correctly detected in 76 % of cases.

Keywords polycarbonate moulds, chocolate moulds, detection of surface defects, classification of defects, vision system, dark field lighting, dome lighting, automatization of quality control

Seznam zkratek

BPA	Bisfenol A
FFT	Fast Fourier Transform
KNN	K-Nearest Neighbors
SVM	Support Vector Machines
SIFT	Scale-invariant feature transform
CDAE	Collaborative denoising autoencoder
RANSAC	Random sample consensus

Úvod

Kontrola kvality v průmyslovém prostředí je klíčovou součástí výrobního procesu. Doposud je z velké části prováděna člověkem. Její automatizace může výrobu urychlit a zkvalitnit, z čehož mohou firmy benefitovat.

Bakalářská práce se zabývá snímáním a následnou detekcí vad čokoládových forem, jenž se používají při výrobě čokoládových bonbónů, či čokoládových tabulek. Formy je potřeba po jejich použití kontrolovat. Kontrola má za cíl odhalení nevyhovujících forem, které se používáním poničily, či opotřebovaly. Pokud by se takovéto formy znovu použily při procesu výroby, mohly by způsobit prostoje, poškození výrobní linky, či vést k produkci výrobků neodpovídajících standardům.

Kontrola forem je prováděna pracovníky povětšinou za špatných světelných podmínek ve stísněných a hlučných prostorách. Při výkonu kontroly kvality je potřeba pouhým okem zkontrolovat nespočet forem ve velmi rychlém časovém sledu. Dochází k chybám způsobených převážně únavou, nepozorností či subjektivním pohledem jednotlivců. Pro vyloučení chyb lidského faktoru je žádoucí proces kontroly automatizovat a nahradit lidský faktor objektivnějším systémem. Automatizace průmyslové kontroly kvality je velmi kýžená a přímo vede k jejímu zkvalitnění.

Teoretická část práce představuje čokoládové formy a specifikuje vady, které na nich vznikají jejich použitím. Praktická část se zabývá sestavením měřícího systému umožňující snímání čokoládových forem. Následně je implementován algoritmus detekce a klasifikace povrchových vad.

Přínosem práce je zobjektivnění a zefektivnění procesu kontroly vad čokoládových forem, což má za následek optimalizaci průmyslové výroby čokoládových bonbónů a tabulek.

Kapitola 1
Rešerše

Systémy provádějící kontrolu kvality založené na strojovém vidění se vyskytují v mnoha průmyslových odvětvích. Typicky jsou rozděleny na dva podsystémy [1]. První z podsystémů zajišťuje akvizici snímků, úkolem druhého podsystému je zpracování obrazu.

1.1 Snímací soustava

Při návrhu snímací soustavy je důležité vhodně zvolit kombinaci kamery, objektivu a osvětlení s důrazem na opakovatelnost snímaní a dobré zvýraznění vad.

1.1.1 Kamera

V úvahu přicházejí dva typy kamer, jimiž jsou **maticové** a **řádkové** kamery. Důležitá je také volba mezi barevnou a monochromatickou kamerou. Řádkové kamery se často používají při kontrole tkanin [2, 3] či v ocelářském průmyslu [4]. Jak uvádějí v [5] maticové kamery se nemohou vyrovnat řádkovým kamerám při snímaní rychle se pohybujících objektů. Rychlost objektů musí být značně redukována pro snímaní maticovou kamerou k zabránění výrazného rozmazání snímků. Z tohoto důvodu jsou preferovány řádkové kamery, maticové kamery je vhodné použít při snímání stacionárních objektů. U maticových kamer je třeba věnovat zvláštní pozornost zajištění rovnoměrného osvětlení celé snímané plochy v maximální možné míře [1]. Rovnoměrné nasvícení celé plochy objektů o větších rozměrech je problematické. Nevýhodou řádkových kamer, jak je uvedeno v [6], je že nevytvářejí kompletní obraz najednou. Je nutné sestavení snímku z více řádků, k čemuž je potřeba synchronizace rychlosti snímání kamery s transportní rychlostí. Synchronizace je zajištěna externím hardwarem.

1.1.2 Objektiv

Při výběru objektivu pro danou aplikaci hraje roli mnoho faktorů. Některé z nich souvisejí přímo s parametry zvolené kamery. Jedná se například o rozlišení a velikost snímače. Dalšími faktory mohou být omezení z hlediska pracovní vzdálenosti, hloubky ostrosti, zorného pole a fyzických rozměrů objektivu. [7]

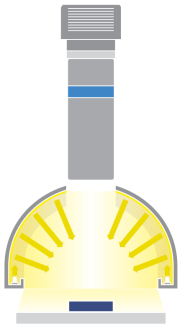
1.1.3 Osvětlení

Jak je uvedeno v [8] cílem osvětlení je zajistit konzistentní světelné prostředí, které je odolné vůči změnám okolního osvětlení. Musí omezovat maximum možných odlesků a především zvyšovat

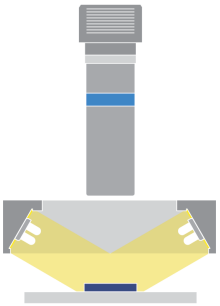
kontrast snímku tak, aby byly zvýrazněny kontrolované obrazové prvky, zatímco ostatní musejí zůstat nezvýrazněny. Pro zvýraznění povrchových vad jsou v [8, 9, 10] uvedeny dva základní principy nasvícení (Obrázek 1.1), jež umožňují jejich zvýraznění:

Přímé osvětlení ve světlém poli: Povrch objektu se při nasvícení jeví, jako světlý. Rušivé struktury jako jsou škrábance, praskliny apod., se jeví tmavé.

Boční osvětlení v temné poli: Při nasvícení bezchybného povrchu objektu bočním osvětlením v temném poli se do kamery přímo neodráží žádné světlo. Vstupuje do ní pouze světlo rozptýlené z povrchu zkoumaného objektu. V důsledku toho se bezchybný povrch jeví tmavě a vady, textury škrábanců, prach apod. světle.



(a) Přímé osvětlení ve světlém poli [11].



(b) Boční osvětlení v temném poli [12].

Obrázek 1.1 Princip nasvícení povrchových vad.

1.2 Zpracování obrazu

Úkolem zpracování obrazu je detekce vad ve snímcích pořízených snímací soustavou. Extrahované vady ze snímků mohou být následně roztříděny (klasifikovány) do tříd dle jejich povahy.

1.2.1 Detekce

Metody detekce povrchových vad lze dle [1, 6, 13] rozdělit do tří prominentních kategorií na:

Metody založené na statistické analýze k detekci povrchových vad často využívají intenzitu pixelů. Statistické metody jsou velmi flexibilní, jelikož o zkoumaných objektech není dopředu nic předpokládáno.

Metody založené na spektrální analýze může nalézt lepší řešení detekcí vad ve frekvenční oblasti. Oproti statistickému přístupu nejsou metody využívající spektrální přístup náchylné na výskyt šumu a změnu intenzity pixelů.

Metody založené na modelech jsou vhodné zejména pro zkoumání vad objektů s povrchovou texturou. Mohou vyřešit nedostatky předchozích metod. Metody založené na statistice jsou přirozeně poměrně citlivé na šum, zatímco metody založené na spektrální analýze postrádají znalost lokální informace.

1.2.2 Klasifikace

Klasifikace povrchových vad je důležitá pro identifikaci příčiny vzniku a její následné odstranění. Konkrétní vady mohou vést k opatřením a změnám na různých místech výrobní linky. Metody klasifikace povrchových vad lze dle [14] rozdělit do dvou kategorií na:

Supervizované učení je proces při kterém je funkce $f : X \rightarrow Y$ (X jsou vstupní hodnoty a Y jsou výstupní hodnoty), aproximována na základě trénovacích dat. Trénovací data jsou anotována spojitou hodnotou při regresi, či diskrétní hodnotou (označením třídy) při klasifikaci a lze je vyjádřit jako množinu n párů: $(X_{trenovaci}, Y_{trenovaci}) = \{(x_1, y_1), \ldots, (x_n, y_n)\}$. Výstupem funkce je spojitá hodnota při regresi, či diskrétní hodnota (označení třídy) při klasifikaci. Aproximace f by měla být schopna ze vstupů predikovat výstupy nejen pro trénovací data, ale také pro jakákoliv jiná data. [15]

Uspokojivých detekčních výsledků metod supervizovaného učení lze dosáhnout pouze za předpokladu existence databáze snímků, na kterých jsou vady anotovány. Shromáždění a označení velkého množství obrazových dat na průmyslové výrobní lince je poměrně pracné a časově náročné, nebo dokonce neproveditelné. Obvyklými metodami supervizovaného učení, jež bývají použity ke klasifikaci povrchových vad, jsou K-Nearest Neighbors (KNN), Support Vector Machines (SVM), rozhodovací stromy a neuronové sítě. [14]

Nesupervizované učení se liší od supervizovaného učení v trénovacích datech. Trénovací data $X_{trenovaci} = \{x_1, \ldots, x_n\}$ nejsou anotována, čímž se komplikuje kvantifikace výsledků. Nejčastější úlohou nesupervizované učení je **shlukování**. [15]

1.3 Příklady z praxe

Výše zmíněné techniky osvětlení a zvýraznění povrchových vad byly použity v [16] k detekci vad vysoce reflexních chromovaných kroužků používaných v textilních strojích. Snímky jsou pořízeny maticovou kamerou. Vzhledem ke komplikovanému tvaru kontrolovaného objektu byly použity čtyři různé pozice, ze kterých byl objekt snímán. Metoda Fast Fourier Transform (FFT) byla použita k detekci vad na snímcích s osvětlením ve světlém poli a bylo dosaženo úspěšnosti 89 %. Při detekci vad na snímcích s osvětlením v temném poli bylo dosaženo úspěšnosti 96 %. Vady zvýrazněné pomocí osvětlení v temném poli byly bez výrazných odlesků s dobrým kontrastem. Díky tomu vyžadovaly méně kroků zpracování obrazu pro segmentaci defektů oproti snímkům pořízených osvětlením ve světlém poli.

DelaCalle et al. v [17] detekují povrchové vady kolejnic. Navržená snímací soustava využívá diferenční snímky povrchů kolejnic získané technikou **Spektrální diferenciace snímků**. Technika používá dva zdroje osvětlení (červené a modré) před a za barevnou řádkovou kamerou. Snímací soustava předpokládá, že oba zdroje světla svítí na povrch kolejnic se stejnou intenzitou a materiál kolejnice má na celém svém povrchu stejné odrazové vlastnosti. Povrch bez vad odráží stejné množství světla z obou zdrojů nezávisle na své textuře. Povrch s vadami odráží různé množství světla z každého zdroje kvůli stínům, které vady vytvářejí. Snímek je následně rozdělen na červený a modrý kanál. Rozdíl mezi červeným a modrým kanálem je u bezchybného povrchu nulový a u povrchu s defekty je nenulový. Vady jsou segmentovány z popředí, které je extrahováno za použití mediánového filtru. Následují morfologické operace společně s filtrací prachu apod. Na kolejnicích se vyskytují rytiny a reliéfní znaky, jež jsou chybně považovány za vady. První z použitých neuronových sítí zajišťuje jejich filtraci. Druhá z neuronových sítí filtruje skutečné vady od ostatních. K natrénování neuronových sítí je u každé potenciální vady získáno 41 příznaků. Mezi ně patří: velikost, střední hodnota, maximální a minimální hodnota, těžiště, homogenita, kontrast, konvexita atd. Nakonec jsou vyfiltrované vady klasifikovány neuronovou sítí se stejnou architekturou, jako mají filtrovací neuronové sítě.

Selvahti et al. v [18] detekují vady v kovech z termografických snímků. Jsou použity dva různé přístupy pro detekci děr a prasklin. První z přístupů na snímky nejprve použije mediánový filtr pro vyhlazení a následně Cannyho hranový detektor pro segmentaci pixelů popředí od pixelů pozadí. Po nalezení hran přítomných ve snímcích jsou extrahovány všechny hrany, které tvoří uzavřenou hranici (kontury). Každá z kontur je aproximována kružnicí, u které je určena její poloha (souřadnice x a y), poloměr, plocha a obvod. Druhý z přístupů detekuje ve snímcích praskliny. Na vyhlazené snímky je použit Laplacián filtr, nímž jsou získány hrany. Pixely hran jsou bílé, zatímco pixely bez hran jsou tmavé. Pro zvýraznění hran jsou odečteny původní snímky. Následně je pomocí ekvalizace histogramu a morfologických operací odstraněna nerovnoměrnost osvětlení a ze snímku jsou získány vady pomocí jednoduchého prahování. Vady jsou klasifikovány do dvou tříd dle testu, který danou vadu odhalil.

V [19] je představen systém detekce a klasifikace vad svarů z rentgenových snímků. Protože rentgenové snímky obsahují šum způsobený několika vlivy, je nejprve provedena redukce šumu pomocí mediánového filtru a následně je zvýšen kontrast high boost filtrem. Cannyho detektor extrahuje ze snímků samotný svár, po němž přichází na řadu Savolovo prahování a top hat filtr. Z výsledného snímku jsou získány kontury, pro které jsou vypočteny tvarové charakteristiky, které jsou využity ke klasifikaci vad pomocí neuronové sítě.

U Cannyho hranového detektoru je nutné nastavení dolního t_d a horního t_h prahu při procesu hystereze. V [20] zkoumají možnosti automatického nastavení těchto prahů pomocí Otsuovy metody. Horní práh je nastaven na hodnotu nalezenou metodou Otsu, dolní práh je nastaven na polovinu vrchního prahu $t_d = \frac{t_h}{2}$.

Automatická metoda výběru prahů Cannyho hranového detektoru je použita v [21] ke kontrole kvality pokladu keramických dlaždic. Kontrolu obkladačovy práce provádí robot. Hranovým detektorem jsou získány hrany dlaždic a pomocí Houghovy transformace jsou aproximovány hranice dlaždic. Následně je kontrolována vzájemná poloha dlaždic.

Stejná metoda výběru prahu pro Cannyho detektor je použita v [22] k detekci prasklin v betonu. Snímací soustava používá k zachycení prasklin maticovou kameru. Jednotlivé snímky jsou pak při některých experimentech spojeny pomocí příznaků z algoritmu **SIFT**.

K detekci vad na sklech mobilního telefonu je v [23] použit template matching. Nejprve byla z několika snímků skel bez vad získána předloha (template) průměrováním. Pro zisk předlohy a následnou detekci vad je pro daný přístup kritickým krokem překryv jednotlivých snímku. Bez dokonalého překryvu metoda nefunguje. Ze snímků jsou získány kontury, které jsou mezi jednotlivými snímky porovnány pomocí Hu momentů. Kontury s mírou podobnosti blížící se nule (kontury, které jsou si nejvíce podobné) jsou na základě svých centroid překryty pomocí geometrické transformace. Následně je možné díky předloze odhalit vady. Template matching byl také použit v [24] k detekci vad na povrchu knoflíků a v [25] je použit k detekci škrábanců na víčcích PET lahví.

Lopez et al. v [26] používá KNN pro hodnocení kvality povrchu plochých předmětů zdobených náhodnými vzory. V tomto případě se jednalo o keramické dlaždice. Chu et al. v [27] používají twin SVM a binárním strom pro více třídní klasifikaci povrchových vad pásové oceli. Sun et al. v [28] klasifikují vady svarů tenkostěnných kovových kanystrů pomocí rozhodovacího stromu. V [29] jsou detekovány vady na polystyrénových talířích. Získaná data byla nejprve ručně anotována a pak s jejich pomocí byla naučena konvoluční neuronová síť Mask R-CNN, sloužící ke klasifikaci vad. Metoda představena v [30] rekonstruuje obrazové oblasti pomocí Collaborative denoising autoencoder (CDAE) modelu na různých úrovních Gaussovy pyramidy a je příkladem nesupervizovaného učení pro klasifikaci vad. K natrénování jsou použity pouze vzorky bez vad. Cílem trénovací fáze je především naučit síť CDAE na každé úrovni pyramidy a vypočítat optimální práh pro segmentaci defektů. Výsledky z různých úrovní Gaussovy pyramidy jsou následně spojeny.

Kapitola 2
Analýza

Čokoládové formy jsou využívány při výrobě čokoládových bonbónu, či celých čokoládových tabulek. Výrobky musejí splňovat stanovené standardy kvality. Formy se používáním opotřebují a dochází ke vzniku vad.

2.1 Čokoládové formy

Zkoumané formy výrobců Hans Brunner GmbH a Vormenfabriek Tilburg jsou rámového typu [31] mající tvar kvádru o rozměrech 425 mm × 275 mm × 24 mm. Formy mají na vrchní straně dutiny, do kterých se umisťuje čokoláda a náplně. Na spodní straně všech forem se nachází žebrování, zvyšující pevnost formy.

Čokoládové formy jsou převážně vyráběny z polykarbonátu a jeho derivátů [31, 32]. V posledních letech jsou formy vyráběny z materiálů bez obsahu BPA[1] jako reakce na sílící debatu o možném vlivu expozice na kojence a děti. Nové materiály nabízejí výhodu, že neobsahují BPA, ale mohou také zhoršit některé klíčové vlastnosti polykarbonátu (široké teplotní použití, houževnatost, tuhost, lesk dodávaný výrobku atd.). [33, str. 380]

Formy bývají transparentní (průsvitné) bez přidaného barviva, transparentní (průsvitné) s přidaným barvivem, či naprosto netransparentní (neprůhledné) s přidaným barvivem. Dle výrobce Hans Brunner jsou standardní polykarbonátové formy transparentní a lze je obarvit speciálními průsvitnými barevnými odstíny [34].

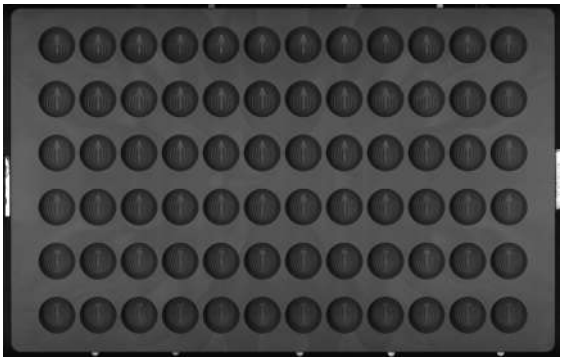
Zkoumané formy jsou netransparentního typu, barva forem výrobce Vormenfabriek je uniformní a barevné odchylky či barevné nepravidelnosti materiál neobsahuje [32]. U forem výrobce Hans Brunner se v materiálu objevují barevné odchylky a barevné nepravidelnosti (Obrázek 2.1), které nelze jednoduše eliminovat, jak výrobce uvádí [34].

2.2 Proces použití čokoládových forem

Při průmyslové výrobě čokoládových bonbónu apod. se hojně využívají formy, díky kterým temperovaná[2] čokoláda dostane svůj finální tvar. Může se jednat o vytvoření čokoládových tabulek (produktů bez náplně), nebo může jít o vytvoření čokoládové skořápky, do které se posléze umisťují různé náplně, aby byl zážitek z konzumace zajímavější. Každá továrna používající podobných forem, má několik nezbytných částí své výrobní linky.

[1] Bisfenol A

[2] Temperování čokolády je proces, při kterém se čokoládová hmota tepelně upravuje [35, str. 314].



Obrázek 2.1 Barevné odchylky a nepravidelnosti ve formách výrobce Hans Brunner.

2.2.1 Zahřátí čokoládových forem

Před použitím je potřeba formy zahřát, aby měly přibližně stejnou teplotu (ideálně ± 1 °C) jako temperovaná čokoláda. Pokud se to nepodaří, mohou při výrobním procesu nastat různé komplikace. Pokud jsou formy příliš teplé, může dojít k odtemperování[3] čokolády, nebo ke zhoršení separace výrobků od formy při jejich vyjímání. V případě, že jsou formy příliš studené, výrobek ztrácí obvyklý lesk, či přilne k formě. Potenciálně může dojít k ovlivnění viskozity čokolády, následkem mohou být nežádoucí artefakty na povrchu finálního výrobku, či zvýšený počet vzduchových bublinek v čokoládě. [33, str. 360-361]

2.2.2 Depozice čokolády a náplní

Úkolem depozitorů je plnění forem čokoládou, či náplněmi. Existuje několik typů depozitorů, těmi nejpoužívanějšími jsou pístové a ozubené depozitory. Formy jsou při plnění obvykle zvednuty blíže k depozitorům. Po zaplnění dutin jsou rapidně spuštěny zpět do normální výšky, zamezí se tak tvorbě chvostů, které by se mohly vytvořit při plnění některými z náplní např. karamelem. Alternativou je zvedání a spouštění depozitního zařízení namísto formy, což má v podstatě stejný účinek. Celé depozitní zařízení se může také pohybovat dopředu a dozadu stejnou rychlostí jako formy. Což napomáhá k přesnějšímu umístění čokolády a náplní do dutin formy. [33, str. 361-362]

Po depozici čokolády je nutné začít s formami co nejdříve vibrovat, aby se z čokolády uvolnily uvězněné vzduchové bublinky. Vzduchové bublinky mohou zkazit vzhled finálního výrobku a v extrémních případech mohou způsobit odchylky v hmotnosti. Jejich výskyt lze minimalizovat volbou správné teploty při zahřívání formy před depozicí. Některé konstrukce forem bublinky zachycují ze své podstaty, což je třeba řešit již při jejich návrhu. [33, str. 364]

Výrobky bez náplně jsou obvykle jednodušší na produkci, jelikož k depozici čokolády dochází pouze jednou. U výrobků s náplní, speciálně u bonbónů, pralinek apod., je proces depozice, vibrování, odstranění přebytečné čokolády několikrát opakován a bývá prokládán ochlazováním. Při tradiční výrobě se nejprve vytvoří čokoládová skořápka. Dutiny formy se zaplní téměř až po okraj čokoládou, s formou se začne vibrovat, aby se dosáhlo odstranění vzduchových bublinek a poté se obrátí. Obrácené formy se opět rozvibrují, aby z nich vytekla veškerá čokoláda, kromě tenké skořápky a z vrchní strany forem je stěrkou či podobným zařízením odstraněna přebytečná čokoláda. Poté se formy obrátí do původní polohy, ochladí se, přidá se náplň (v případě horké náplně bývá forma opět ochlazena) a dutiny jsou uzavřeny vrchní vrstvou čokolády. Někdy je nutné před přidáním vrchní vrstvy čokolády formu zahřát či rozvibrovat, z forem je následně odstraněna přebytečná čokoláda a míří do chladícího zařízení. [33, str. 364-366]

[3] Temperovaná čokoláda je příliš zahřáta či nesprávně ochlazena, není pro spotřebitele atraktivní [36].

2.2.3 Chlazení

Po depozici je formu společně s čokoládou (náplněmi) nutné správným způsobem ochladit. Požadovaným efektem je krystalizace kakaového másla ve formě V, to však omezuje rychlost chlazení, kterou lze použít. V čokoládovém průmyslu a vědecké komunitě je uznávaná krystalická forma V kakaového másla jako nejvhodnější, s ohledem na nejlepší celkový lesk povrchu, barvu, tvrdost/lámavost, vhodný bod tání čokolády a trvanlivost. [35, str. 314-316]

Nízké teploty chlazení nebo krátká doba chlazení vedou k méně stabilním krystalickým strukturám, jako je forma IV, jež nemají požadované vlastnosti. Při depozici horké náplně je někdy nutné intenzivní chlazení např. u karamelu, který je do čokoládové skořápky vkládán při teplotě 55–60 °C. Intenzivní ochlazení zabrání roztavení skořápky, nebo odtemperování čokolády. [33, str. 367-368]

2.2.4 Vyjmutí čokoládových výrobků z formy

K oddělení výrobku od formy je obvykle zapotřebí malé množství síly, která je dodávána kladivem s případnou pomocí mechanismu, jež formy kroutí. Výrobky po jejich vyjmutí povětšinou putují k balícímu zařízení, avšak ne všechny výrobky se z forem uvolní. Některé mohou být drženy na místě elektrostatickým nábojem, což je spíše problém lehkých a malých výrobků. Zařízení pro vybíjení statické elektřiny může pomoci. Pokud se výrobky i přes tuto skutečnost z formy neuvolní jsou na místě detekční systémy, jež problematické formy dokáží odhalit a nedovolí jim pokračovat na začátek výrobní linky. [33, str. 370-371]

2.3 Vady čokoládových forem

Formy se při produkci čokoládových výrobků mohou poškodit. Vady vznikají především v důsledku mechanického namáhání, avšak mohou být způsobeny kombinací vlhkosti, teploty a chemických přípravků. Klíčová je správná péče o formy. Polykarbonát je stabilní vůči působení většiny chemických látek. Nicméně některé chuťové přísady a čistící prostředky mají na materiál nepříznivý vliv. Formy by se neměly dostávat do kontaktu s jinými látkami než s čokoládou. Je nejlepší vyhnout se jakémukoli nežádoucímu kontaktu, případně čas kontaktu minimalizovat a používat výrobcem doporučené čistící prostředky. Nedodržení korektního postupu při mytí forem může vést k tvorbě malých škrábanců a degradaci materiálu. Po umytí by měly být formy co nejdříve usušeny a skladovány v prostorách, kde nebudou vystaveny UV záření a přebytečné vlhkosti. [37] Chemická reakce mezi polykarbonátem a vodou způsobuje snížení molekulové hmotnosti, čímž se výrazně snižují mechanické charakteristiky [33, str. 380]. Formy jsou velmi náchylné na teplotu, neměly by být vystavovaný teplotám větším než 60 °C [33, str. 381]. K přehřátí může dojít při zahřívání formy, před depozicí čokolády, nebo při jejich mytí. Při nevhodné péči o formy může materiál forem postupně degradovat, tyto formy jsou náchylnější k poškození. Hlavní příčinou vzniku vad je nekorektní seřízení výrobní linky a nevhodná manipulace personálu. Vady jsou detailněji popsány v podsekcích 2.3.1, 2.3.2.

Používání poškozených forem je riskantní hned z několika hledisek. Při nejmenším může dojít k poškození výrobní linky, což ve většině případů vede k prostojům. Vadné formy způsobují zaseknutí v místech otáčení/kroucení, protože se zlomí nebo zdeformují. U takových forem je pravděpodobné, že se používáním více poškodí a odlomené části formy se mohou dostat do finálního výrobku, nebo kontaminovat čokoládu používanou k výrobě.

2.3.1 Škrábance

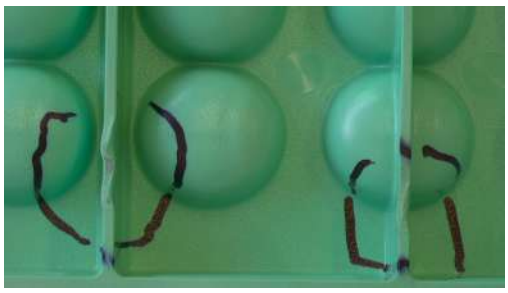
Nejčastěji objevující se vadou jsou škrábance, důlky a malé oděrky viditelné na Obrázku 2.2. Převážná většina vzniká na vrchní straně formy. Některé části výrobní linky se mohou používáním

uvolnit, poškodit apod. Z tohoto důvodu může dojít ke kontaktu mezi formou a kovovou částí výrobní linky, ke kterému by za běžné situace nedošlo. Například může dojít ke kontaktu mezi formou a depozitory, formy mohou být poškozeny zařízeními odstraňující přebytečnou čokoládu (stěrky, olizovací válce) apod.

Obrázek 2.2 Škrábance čokoládové formy.

2.3.2 Žebrování

Žebrování dodává formě potřebnou sílu a pevnost, vady na něm vznikají v důsledku vibrací, kroucení a vyklepávání výrobků. Bývá často vychýleno (Obrázek 2.3), či dokonce odlomeno. Stejně jako škrábance, tak i žebrování bývá nejčastěji poškozeno v důsledku špatného seřízení výrobní linky. Jak uvádí výrobce Hans Brunner v [37], formy by neměly být vystavovány větším vibracím a není vhodné je příliš kroutit. Vyklepávací kladivo by mělo formu zasáhnout rovnoměrně přes žebrování, je vhodnější více zásahů s menší silou, než jeden velký zásah.

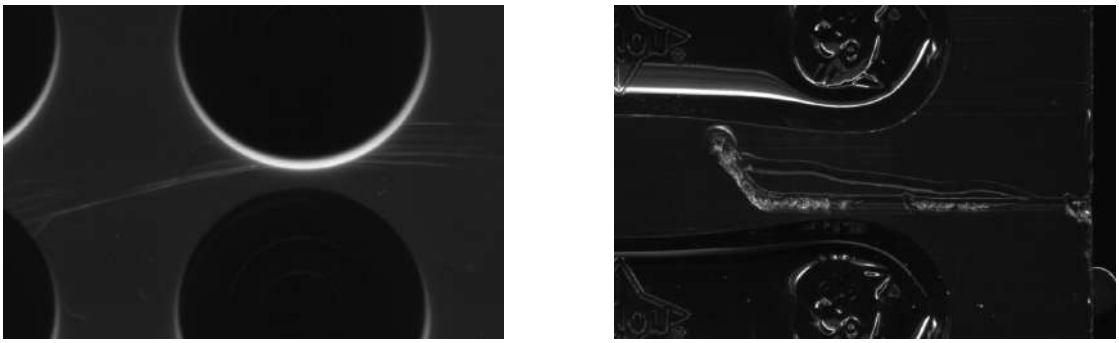


Obrázek 2.3 Vychýlené žebrování.

2.4 Metodika měření

Bakalářská práce se zaměřuje pouze na detekci a klasifikaci vad na vrchní straně forem. Vady nejsou nijak lokalizovány, jejich rozmístění na povrchu formy je náhodné. Z tohoto důvodu je nutné kontrolovat celou plochu vrchní strany formy. Škrábance se liší velikostí, na formách se nacházejí velmi jemné škrábance (Obrázek 2.4a) a také škrábance s šířkou a hloubkou až několik milimetrů (Obrázek 2.4b). Vady se mohou nacházet i uvnitř dutin, avšak jejich detekce je složitá. Řešení využívá faktu, že jsou vady uvnitř dutin ojedinělé. V případech, kdy se vady nacházejí uvnitř dutiny, je pravděpodobná existence vad i mimo ni.

Škrábance jsou převážně kolmé k delší straně formy, méně častými jsou škrábance rovnoběžné s delší stranou. Důvodem je orientace forem na výrobní lince, kde jsou uchyceny na kratších



(a) Jemný škrábanec.

(b) Signifikantní škrábanec.

Obrázek 2.4 Škrábance forem.

stranách. Delší strany formy jsou nasměrovány kolmo k pohybu výrobní linky. Detekce je problematická především u neobvykle tvarovaných vad, které při nevhodném nasvícení nemusejí být dostatečně zvýrazněny. To i přesto, že jsou pouhým okem zřetelně viditelné. Nutností je použití osvětlení, které vady zvýrazní. Vhodné techniky osvětlení byly představeny v sekci 1.1.3.

Barva forem hraje důležitou roli a přímo ovlivňuje expoziční čas kamery, který se liší pro formy s různými barvami. Jak je uvedeno v sekci 2.1, barva materiálu některých forem není homogenní, což může způsobovat chybnou detekci vady. Bílé světlo je kompromisem pro práci s barevnými objekty, které odrážejí pouze rozsah barevného spektra vlastní barvy a pohlcují zbytek. [9, str. 101, 104]. Při volbě stejné barvy osvětlení jakou má forma, se bude na snímcích jevit jako světlá. Například modrá forma odráží pouze modré spektrum a pohlcuje ostatní. Naopak forma osvětlena svou komplementární barvou se bude na snímcích jevit tmavá. Vhodnou volbou barvy osvětlení může dojít k minimalizaci nehomogenity materiálu, avšak nevhodná barva osvětlení může nehomogenitu zvýraznit.

Kapitola 3
Snímací soustava

Navržení vhodné snímací soustavy je zásadní pro zvýraznění vad a jejich následnou detekci implementovaným algoritmem. Byla navržena snímací soustava využívající maticovou kameru a posléze byla navržena snímací soustava s řádkovou kameru.

3.1 Snímací soustava s maticovou kamerou

Pro ověření vhodnosti navržených technik osvětlení představených v rešerši (sekce 1.1.3) byla provedena řada experimentů s monochromatickou maticovou kamerou.

3.1.1 Přímé osvětlení ve světlém poli

Ke zvýraznění vad bylo vyzkoušeno pruhové a kruhové osvětlení. Přestože byla světla osazena difuzorem, na povrchu formy se tvořily viditelné odlesky. Problém s odlesky částečně řeší bílé kopulové světlo. Při jeho použití se na povrchu formy odlesky netvořily a uvnitř dutin byly minimalizovány. Velkou roli hrála vzdálenost mezi formou a světlem. Jejím zvýšením došlo ke zvýraznění vad, jež se jevily tmavší než povrch formy. Největší nevýhodou při tomto způsobu nasvícení je velmi viditelná nehomogenita materiálu popsána v sekci 2.1.

3.1.2 Boční osvětlení v temném poli

Pro nasvícení vad v temném poli bylo použito červené kruhové světlo s pevně nastaveným úhlem svitu. Při nasvícení vad leželo na povrchu formy a zřetelně je zvýraznilo. Větší konfigurovatelnost umožnila konzole, jež dovoluje uchycení dvou až čtyř pruhových světel. Konzole také dovoluje nastavení vzdálenosti mezi formou a světly. U každého ze světel je možné nastavit libovolný úhel svitu. Přestože přesné nastavení úhlu a pracovní vzdálenosti světel bylo pracné, úhel 3,3° při pracovní vzdálenosti 26 mm (vzdálenost od formy k horní hraně světla) se jevil jako optimální.

Z dostupných barevných variant pruhových světel bylo vyzkoušeno bílé a červené. Nasvícení červené formy červeným osvětlení zcela odstranilo nehomogenitu materiálu. U zelených forem se nehomogenita mírně zvýraznila. U modrých forem došlo k výraznému ztmavení formy na snímcích, tento fakt byl kompenzován volbou vyššího expozičního času.

Boční osvětlení v temném poli výrazně minimalizovalo viditelnosti nehomogenity materiálu ve srovnání s přímým osvětlení ve světlém poli. Pro zvýraznění vad se jeví jako vhodnější.

3.2 Konstrukce snímací soustavy s řádkovou kamerou

Při návrhu snímací soustavy byla za vhodnou zvolena řádková kamera v závislosti na prezentovaných výhodách v sekci 1.1. Hlavním faktorem pro výběr řádkové kamery je možnost nasvícení celé formy v temném poli za použití pouze jednoho světla. Na snímcích je celá forma rovnoměrně nasvícena, což by s použitím jednoho světla a maticové kamery nebylo u tak velkého objektu možné. Řádková kamera patří mezi vybavení laboratoře Improlab společně s válcovým dopravníkem. Dopravník má rozměry 115 cm × 220 cm, je určen pro posuv objektů s větší plochou a váhou. Je vhodný například pro snímání skleněných panelů. Pro snímání menších objektů, jako jsou čokoládové formy, není vhodný převážně kvůli své velikosti. Rozestup mezi jednotlivými válci dopravníku je větší než samotná forma.

Kvůli nevhodnosti válcového dopravníku musela být sestavena konstrukce kvádrového tvaru z hliníkových profilů o rozměrech 58 cm × 80 cm × 58 cm. Ke konstrukci je ukotven lineární pohon a řádková kamera s objektivem. Na základě této konstrukce byly sestaveny dvě snímací soustavy, které se liší osvětlením. Na obrázku 3.1 je vyobrazen 3D model snímací soustavy zachycující její hlavní části. Každá z částí je detailněji popsána níže. Reálná podoba soustavy, lišící se od 3D modelu, je na Obrázku 3.2.

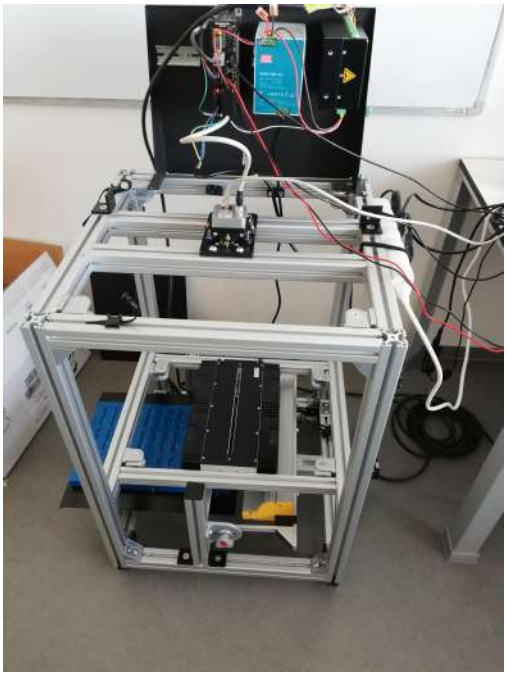
Obrázek 3.1 3D model snímací soustavy.

3.2.1 Kamera a objektiv

Snímání zajišťuje monochromatická řádková kamera Basler Racer raL6144-16gm (parametry viz Tabulka 3.1). Díky absenci Bayerovy masky [38] jsou monochromatické kamery citlivější, než barevné kamery.

Kamera je s konstrukcí spojena držadlem vytisknutým na 3D tiskárně. Držadlo umožňuje jemnou korekci polohy kamery ve všech směrech. Jak je patrné z Obrázku 3.3 držadlo se skládá ze stacionární a pohyblivé části. Stacionární část je uchycena k hliníkové konstrukci a k pohyblivé části je upevněna kamera. Přibližné nastavení pozice kamery je zajištěno pomocí čtyř šroubů, které kotví pohyblivou část držadla ke stacionární části. Rotace pohyblivé části se dá ovlivnit pomocí čtyř stavěcích šroubů nacházejících se naproti sobě. Mezi stavěcími šrouby je šroub s kulatou hlavičkou, na niž stavěcí šrouby tlačí. Pro přesnou korekci náklonu kamery jsou na pohyblivé části umístěny čtyři mikrometrické šrouby, které tlačí na kovové kuličky ve stacionární části.

Vzdálenost mezi snímačem kamery a formou je pevně daná konstrukcí hliníkového rámu. Z toho důvodu je použita stavebnice umožnující sestavení objektivu s vhodnou šířkou zorného



Obrázek 3.2 Reálná podoba snímací soustavy.

pole a potřebnou pracovní vzdálenosti. Jedná se o makro objektiv Schneider-Kreuznach Apo-Componon 4.0/60-0016 (parametry viz Tabulka 3.2), zaostření umožňuje teleskopický mezikroužek (helicoid) Unifoc 12 (parametry viz Tabulka 3.3). Komponenty jsou spojeny 10 mm distančním kroužkem.

Tabulka 3.1 Parametry řádkové kamery Basler Racer raL6144-16gm [39].

Parametr	Hodnota
Typ senzoru	CMOS
Velikost senzoru	43 mm
Rozlišení (výška × šířka)	6144 px × 1 px
Rozlišení	6k
Velikost pixelu	7 µm × 7 µm
Mono/Barevná	monochromatická

3.2.2 Lineární pohon

Pohyb formy obstarává lineární pohon Orientalmotor EZSM3E045AZAC (parametry viz Tabulka 3.4). Rozsah pohonu je 450 mm, což umožňuje nasnímání celé formy jedním souběžným pohybem.

Pohon je vybaven pohyblivou platformou, kterou hýbe krokový motor. Převod rotačního chodu na lineární zprostředkovává kuličková šroubovice. Řízení motoru obstarává samostatný ovladač. Motor je osazen absolutním enkodérem, který při otáčení generuje elektrické pulzy. Pulzy slouží jako vstup kamery, která dále umožňuje jejich modifikaci softwarovým frekvenčním měničem. Manuálním nastavením frekvenčního měniče je dosaženo synchronizace kamery s posuvem, kulaté objekty se na snímcích skutečně jeví jako kulaté apod. Spojení výstupů ovladače se vstupy kamery je zprostředkováno na míru vyrobenou kabeláží.

Obrázek 3.3 Držadlo řádkové kamery.

Tabulka 3.2 Parametry objektivu Schneider-Kreuznach Apo-Componon 4.0/60-0016 [40].

Parametr	Hodnota
Typ	S pevným ohniskem (fixed local)
Ohnisková vzdálenost	59,9 mm
Světelnost	f/4

Oproti 3D modelu na obrázku 3.1 je k platformě lineárního pohonu upevněna laminátová deska, k níž je uchycen plechový plát. Rozměry plátu dovolují rozmístění magnetů okolo formy, které ji vymezují uprostřed a drží ji na místě při posuvu. Pro opakovatelnost snímání jsou magnety k plátu přilepeny.

3.3 Rozšíření s bílým osvětlením v temném poli

U snímací soustavy s maticovou kamerou se pro zvýraznění vad osvědčilo bílé boční osvětlení v temném poli. Taktéž je použito ve snímací soustavě s řádkovou kamerou. Zajišťuje jej světlo Effilux Effiline PWR-400-000-PP (parametry viz Tabulka 3.5). Jeho hlavní výhodou je nastavitelnost čoček ovlivňující pracovní vzdálenost světla a rozptyl jeho paprsku. Na Obrázku 3.4 jsou vyobrazeny možné pozice čoček. Pozice P1 je výchozí polohou čoček. Světlo je k hliníkovému rámu uchyceno způsobem, který umožňuje jednoduchou nastavitelnost úhlu svitu. Jak je z Obrázku 3.5 patrné, horizontální posuv umožňuje umístění středu rotace tak, aby ležel na ose kamery. Vertikálním posuvem světla je možné umístit střed rotace k povrchu formy, což dovoluje změnu úhlu bez změny místa dopadu paprsku světla. V neposlední řadě je možné nastavit vzdálenost mezi formou a světlem.

Pro zjištění konfigurace, jež nejlépe zvýrazní vady, bylo vyzkoušeno nespočet úhlů, z nichž nejzajímavější jsou tyto: 3,3°, 10° a 15°. Zároveň byly vyzkoušeny různé pracovní vzdálenosti, pozice čoček apod. Nejprve byl vyzkoušen úhel 3,3°, který se osvědčil u snímací soustavy s maticovou kamerou. Na výsledných snímcích byly výborně zvýrazněny velmi jemné škrábance. Překvapivě pro tento úhel nebyly dostatečně zvýrazněny větší škrábance. Snímky byly pořízeny s konfigurací světla, která je uvedena v Tabulce 3.6. Z tabulky je patrné, že tato konfigurace světla

Tabulka 3.3 Parametry teleskopického mezi-kroužku Schneider-Kreuznach Unifoc 12 [40].

Parametr	Hodnota
Rozsah	12 mm
Rozměry	17,4–29,4 mm
Bajonet	V38

Tabulka 3.4 Parametry lineárního pohonu Orientalmotor EZSM3E045AZAC [41].

Parametr	Hodnota
Rozměry (výška × šířka)	50 mm × 54 mm
Napětí	AC
Stoupání šroubu	6 mm
Rozsah pohybu	450 mm
Přesnost opakovaného polohování	±0,02 mm

nevyužívá výhod zmíněného uchycení, jelikož je střed rotace světla posunut o 80 mm mimo osu kamery.

Všechny následující měření byly provedeny se středem rotace světla ležícím na ose kamery. Čočky světla byly uvedeny do standardní polohy (P1), čímž byl snížen rozptyl paprsku. Měněnými parametry byly pouze úhel a pracovní vzdálenost. Výrazně lepších výsledků bylo dosaženo pro úhly svitu 10° a 15°. Snímky byly velmi podobné, některé z vad byly lépe zvýrazněny při nasvícení pod úhlem 10°, většina však byla lépe zvýrazněna při nasvícení pod úhlem 15°. Volbou vyšších, či nižších úhlů nebylo dosaženo lepších výsledků, proto byl zvolen úhel 15° jako optimální. Oproti úhlu svitu 3,3° však nejsou na snímcích viditelné jemné škrábance. Parametry použity pro snímání s úhlem svitu 15° jsou uvedeny v tabulce 3.7. U snímací soustavy se projevily dva problémy:

Zvýraznění okrajů dutin (Obrázek 3.6) bylo očekávaným efektem, který se projevil na všech snímcích forem. Řešením je použití masky získané ze snímků forem, které jsou nasvíceny tunelovým světlem Chromasens Corona II (parametry viz Tabulka 3.8). Následně jsou za pomoci masky odstraněny dutiny forem. Detailněji je proces extrakce a aplikace masky popsán v sekci 4.2.4.

Stejně jako u snímků pořízených maticovou kamerou s kopulovým světlem, jsou na snímcích pořízených s řádkovou kamerou a tunelovým osvětlením zvýrazněny vady. V tomto případě však není zvýraznění vad vítáno, intenzita světla byla nastavena na maximum ve snaze vady přesvítit a zvýraznění zmírnit. Světlo bylo umístěno do nejnižší možné pozice ze stejného důvodu.

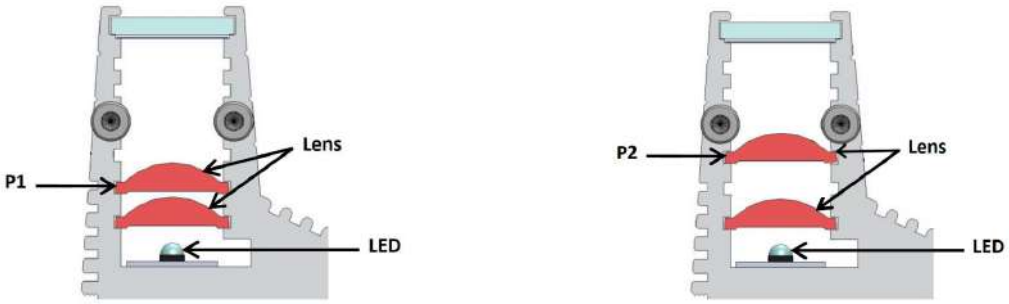
Výrazné přesvícení okrajů dutin forem výrobce Vormenfabriek (Obrázek 3.7) nebylo očekávaným efektem. S největší pravděpodobností je efekt způsoben velkou intenzitou bočního osvětlení a zároveň materiálem daných forem, který je nepatrně průsvitný.

3.4 Rozšíření s červeným osvětlením v temném poli

Snímací soustava nahrazuje bíle světlo v temném poli červeným světlem Effilux Effiline PWR-400-625-PP (parametry viz Tabulka 3.9) a před objektiv kamery je přidán pásmový filtr Schneider Kreuznach BP 635-50 HT (parametry viz Tabulka 3.10). Filtr je klíčovou částí snímací soustavy, jelikož blokuje většinu nechtěného světla a snižuje jeho celkovou intenzitu. Soustava dokázala vyřešit přesvícení okrajů dutin u forem výrobce Vormenfabriek. Stejně jako u soustavy s bílým světlem, bylo nejlepších výsledků dosaženo s úhlem 15°.

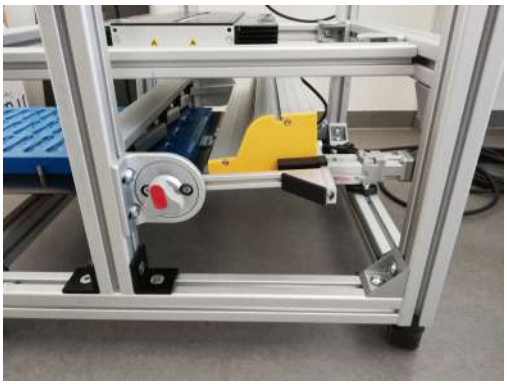
Tabulka 3.5 Parametry osvětlení Effilux Effiline PWR-400-000-PP [42].

Parametr	Hodnota
Světelnost (při pracovní vzdálenosti 100 mm)	až 400 000 lx
Délka světelného článku	400 mm
Barva	Bílá (5000K ± 500K)



Obrázek 3.4 Nastavení čoček osvětlení Effilux Effiline.

Volba barvy bočního osvětlení má své nevýhody, modré formy se na snímcích jeví jako velmi tmavé a naopak červená forma se na snímcích jeví světle a má viditelně horší kontrast. Výrazné změny expozičního času, při snímaní forem s různou barvou, byly nutné pro kompenzaci volby červeného světla. Přes tyto nevýhody se snímací soustava, v porovnání s výše uvedenou snímací soustavou, jeví jako lepší volba. Převážně díky výraznému snížení efektu přesvícení okrajů dutin. Z toho důvodu jsou snímky pořízené touto snímací soustavou použity jako vstupní data pro detekci a klasifikaci. Okraje dutin však stále musejí být odstraněny maskou. Snímky pro masku byly zachyceny při nasvícení forem tunelovým světlem ve stejné konfiguraci jako u snímací soustavy uvedené výše.



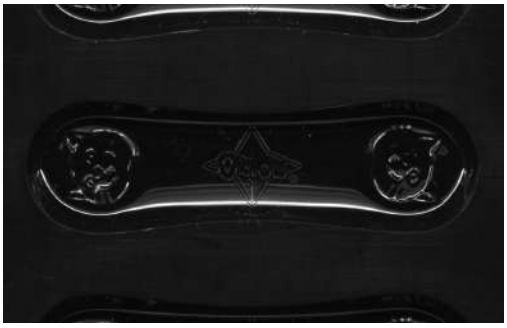
Obrázek 3.5 Nastavitelnost bočního osvětlení v temném poli.

Tabulka 3.6 Nastavení osvětlení v temném poli pro úhel 3,3°.

Parametr	Hodnota
Poloha čoček	P2
Vzdálenost světla od osy kamery	+80 mm
Střed rotace	u povrchu formy
Vzdálenost světla od formy	192 mm

Tabulka 3.7 Nastavení osvětlení v temném poli pro úhel 15°.

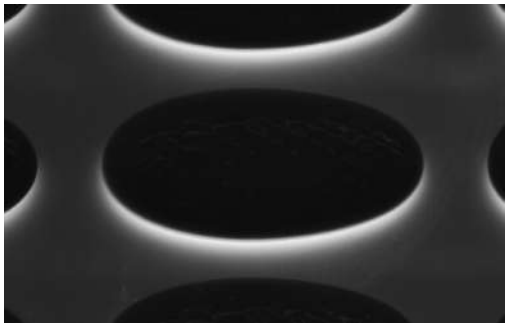
Parametr	Hodnota
Poloha čoček	P1
Vzdálenost světla od osy kamery	0 mm
Střed rotace	u povrchu formy
Vzdálenost světla od formy	142,5 mm



Obrázek 3.6 Zvýraznění okrajů dutin.

Tabulka 3.8 Parametry kopulového osvětlení Chromasens Corona II [43].

Parametr	Hodnota
Světelnost	až 600 000 lx
Délka světelného článku	340 mm
Barva	Bílá (5500 K)



Obrázek 3.7 Výrazné přesvícení okrajů dutin u forem výrobce Vormenfabriek.

Tabulka 3.9 Parametry osvětlení Effilux Effiline PWR-400-625-PP [42].

Parametr	Hodnota
Délka světelného článku	400 mm
Barva	Červená (625 nm ± 10 nm)

Tabulka 3.10 Schneider Kreuznach BP 635-50 HT [44].

Parametr	Hodnota
Rozsah vlnových délek	610–660 nm
Střední vlnová délka	635 nm
Šířka pásma	50 nm

Kapitola 4
Realizace

Algoritmus detekce a klasifikace povrchových vad čokoládových forem je implementován v jazyce Python v prostředí Jupyter notebook. Při implementaci jsou použity knihovny OpenCV, Numpy a Improutils. Všechny snímky jsou získány pomocí snímací soustavy popsané v sekci 3.4.

4.1 Dataset

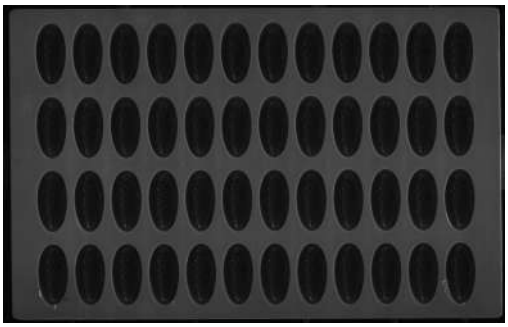
Dataset obsahuje 24 snímků osmi forem, kdy každá z nich byla nasnímána třikrát. Jeden ze snímků formy byl získán při jejím nasvícení ve světlém poli. Zbývající dva byly získány při nasvícení formy bočním světlem v temném poli. Zmíněné dva snímky jsou potřebné k zajištění maximálního možného zvýraznění všech vad, proto byly formy nasnímány v obou směrech (po otočení o 180°). Formy je možné rozdělit do skupin dle výrobce a jejich barvy (viz Tabulka 4.1). Na Obrázku 4.1 jsou ukázány všechny snímky jedné ze zelených forem výrobce VormenFabriek.

Tabulka 4.1 Zastoupení forem (ks) v závislosti na výrobci a barvě.

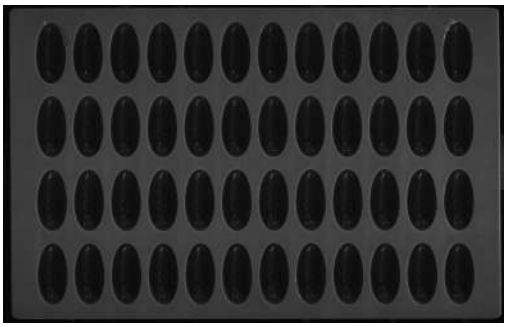
Výrobce/Barva	Červená	Modrá	Zelená
Hans Brunner	1	1	1
VormenFabreik	0	1	3

4.2 Implementace

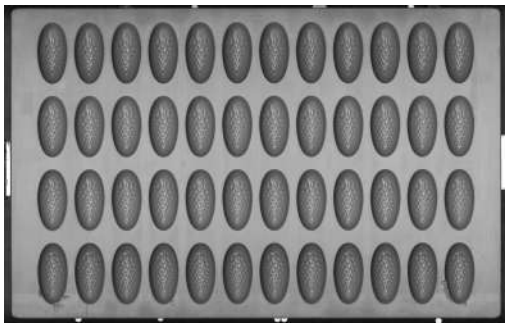
Snímky nasvícené bočním osvětlením v temném poli jsou využity k detekci vad mimo okraj dutiny. Na těchto snímcích jsou zvýrazněny povrchové vady a zároveň jsou na nich zvýrazněny okraje dutiny. Ty nejsou pravými vadami a je potřeba je ze snímků odstranit. Pro jejich odstranění byly nasnímány formy pomocí tunelového osvětlení a z těchto snímků je následně získána maska, která umožní ze snímků bočního osvětlení odstranit celou dutinu, včetně zvýrazněných hran. Vše ostatní, společně s vadami povrchu, zůstane zachováno. Jelikož jsou získány dva snímky s osvětlením v temném poli a jeden snímek s osvětlením ve světlém poli, musejí být mezi sebou snímky překryty, aby bylo možné použití masky.



(a) První snímek formy v temném poli.



(b) Druhý snímek formy v temném poli.



(c) Třetí snímek formy ve světlém poli.

Obrázek 4.1 Snímky konkrétní formy.

4.2.1 Algoritmus překrytí

Vysoká úspěšnost detekce vad je podmíněna dokonalým překryvem snímků každé formy. Bez dokonalého překryvu může dojít k označení okraje dutiny za vadu, jelikož maska okraj neodstraní.

Pro zajištění dokonalého překryvu byly u všech snímků manuálně nalezeny tři rohové body. Následně byly za použití afinní geometrické transformace a těchto bodů snímky transformovány tak, aby si tyto body odpovídaly. Tento přístup se ukázal jako problematický. Soustava byla před snímáním seřízena tak, aby byly formy položené na platformu lineárního pohonu rovnoběžné s horní stranou kamery ,a tím pádem také se snímačem. K tomuto přesnému seřízení bylo použito držadlo kamery zmíněné v sekci 3.2.1 a digitální vodováha. Nejspíše kvůli nepřesnosti laminátové desky došlo k tomu, že se formy na snímcích jevily jako zkosené. Svou roli s největší pravděpodobností také hrála nepřesnost hliníkové konstrukce, způsobena použitým spojovacím materiálem. Afinní transformace nezajistila dostatečnou kvalitu překrytí, naopak byly viditelné signifikantní nepřesnosti překryvu způsobené zmíněným zkosením.

Zlepšení bylo dosaženo vyrovnáním všech snímků forem na obdélník perspektivní geometrickou transformací za použití čtyř rohových bodů forem. Následně byla použita afinní geometrická transformace k překrytí snímků konkrétní formy. Dutiny blízko rohových bodů byly téměř dokonale překryty, avšak překryv dutin uprostřed formy nebyl stále dost dobrý. Čtyři rohové body k zisku dokonalého překryvu nebyly dostatečné. Ze snímků bylo potřeba extrahovat další body, které si navzájem odpovídají, podobně jako v [23].

Vhodnými kandidáty k extrakci a následnému párování (matchingu) jsou geometrické středy (centroidy) dutin. Geometrické středy jsou získány z kontur dutin jednotlivých snímků. Algoritmus zisku kontur dutin ze snímků forem ve světlém poli je popsán v sekci 4.2.2. Algoritmus zisku kontur dutin ze snímků forem v temném poli je popsán v sekci 4.2.3.

Pro nalezení matice homografie mezi geometrickými středy dutin je nutné, aby měly oba

soubory bodů stejnou velikost a byly správně uspořádány. Pro zajištění těchto podmínek jsou nejprve body seřazeny dle jejich souřadnic a následně jsou z obou souborů vybrány body, které si přibližně odpovídají (vzdálenost mezi nimi je menší, než specifikovaný práh). Párování geometrických středů je prováděno mezi snímkem formy v temném poli (zdroj) a snímkem formy ve světlém poli (cíl). Proces je opakován dvakrát pro každý snímek formy v temném poli. K zajištění optimálních výsledků je použit algoritmus **Random sample consensus** (RANSAC), jež umožňuje vyloučení odlehlých bodů (outliers), které díky němu špatně neovlivní matici homografie. Posledním krokem je perspektivní geometrická transformace a oříznutí obrázků.

4.2.2 Zisk kontur dutin ze snímku formy ve světlém poli

Všechny snímky forem ve světlém poli mají nedostatek, na okrajích nejsou rovnoměrně nasvíceny. S rovnoměrností by pomohlo nastavení menší pracovní vzdálenosti mezi formou a světlem. Tomu však brání uchycení bočního osvětlení.

Nerovnoměrnost nasvícení se nenachází pouze na okrajích a výrazně nezasahuje do dutin. Navržený algoritmus eliminuje nerovnoměrnost nasvícení redukcí barev. Redukční algoritmus je založen na vyhledávacích tabulkách (Lookup tables). Experimentálně bylo zjištěno, že 16 barev dokáže oddělit nerovnoměrnost nasvícení a zároveň zachovat hranici mezi povrchem formy a dutinou. Následně je snímek segmentován prahem získaným Otsuovou metodou. Ke snímku je přidán bílý rámeček pixelů a pomocí morfologie s diskem o velikosti 3×3 jsou iterativně uzavřeny malé díry.

Snímek je dále invertován pro zisk vnitřní části dutiny. Následně jsou nalezeny všechny kontury, které jsou vzápětí filtrovány dle jejich plochy. Filtrace má za cíl zachovat pouze kontury, které jsou dutinami a odstranit všechny ostatní. Iterativně je určována průměrná plocha nalezených kontur a kontury s menší než průměrnou plochou jsou odstraněny. Nakonec zůstanou pouze kontury, jejichž obsah je podobný, či vyšší než vypočtený průměr.

Kvůli přítomnosti odlesků uvnitř dutin není segmentace dokonalá, odlesky způsobují, že je část dutiny poblíž okraje považována za povrch formy. Cannyho hranovým detektorem jsou získány hrany kontur dutin z původního obrázku. Spodní a horní práh je nastavena pomocí Otsuovy metody, jak je uvedeno v sekci 1.3. Z těchto hran jsou zachovány pouze ty uvnitř v blízkosti okrajů dutiny. Tento krok je klíčový, jelikož nedovolí aby byly kontury dutin mezi sebou spojeny.

Dalším krokem je opětovná negace snímku segmentovaných dutin, od něhož jsou odečteny nalezené hrany. Malé pozůstatky uvnitř dutin jsou odstraněny morfologickým otevřením s diskem velikosti 3×3 v několika iteracích a následně je ze snímku zachována pouze největší spojená komponenta. Ve snaze o mírné vyhlazení okrajů dutin je použito morfologické otevření a mediánový filtr. Výstupem jsou kontury dutin.

4.2.3 Zisk kontur dutin ze snímku formy v temném poli

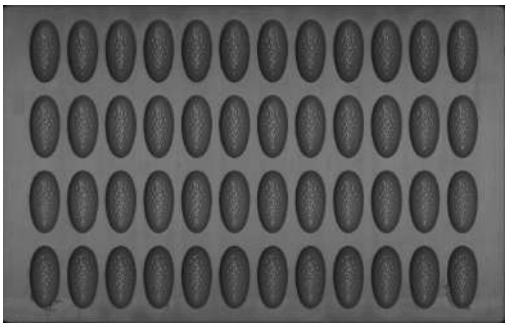
Algoritmus je inspirován algoritmem uvedeným výše, jsou z něj pouze vynechány některé části, v rámci zjednodušení, jelikož je používán pouze pro překryv snímků.

Každý snímek formy v temném poli má zvýrazněnou část jeho dutin (část dutin, na kterou svítí světlo). Zbylá část okraje dutiny zvýrazněna není. Zvýrazněná a nezvýrazněná část dutin je k vidění na Obrázku 4.2a. Na snímku jsou nejprve nalezeny hrany pomocí Cannyho hranového detektoru. Horní práh detektoru hran musí být nastaven takovým způsoben, aby nezvýrazněná část okraje dutiny byla považována za hranu. Avšak to znamená, že přítomný šum u zvýrazněné části okraje dutiny je také považován za hranu.

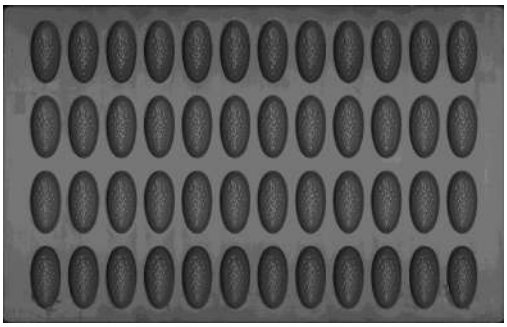
Po filtraci původního snímku, Gaussovým filtrem o velikosti kernelu 5×5 je segmentován povrch formy. U zvýrazněné části okraje dutiny je povrch a dutina segmentována ideálně. U nezvýrazněné části okraje je však kus dutiny považován za povrch formy. Hranice mezi formou a povrchem není určena zcela správně. Z tohoto důvodu jsou od segmentovaného povrchu odečteny

nalezené hrany a je provedeno morfologické otevření diskem o velikosti 3×3. V několika iteracích jsou odstraněny převážně všechny části, jež byly považovány za povrch a zasahovaly dovnitř dutiny.

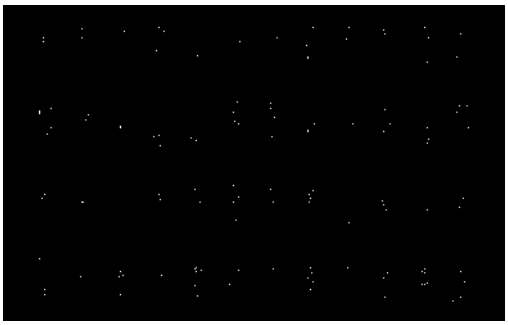
Segmentovanému povrchu je přidán rámeček bílých pixelů a ze snímku je vybrána největší spojená komponenta. To zaručuje odstranění přebytečných části uvnitř dutin, které morfologie neodstranila. Posledním krokem je invertování snímku a nalezení kontur. Snímek v jednotlivých fázích zpracování je ukázán na Obrázku 4.2.



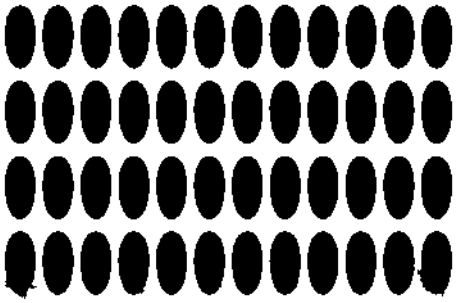
(a) Původní snímek.



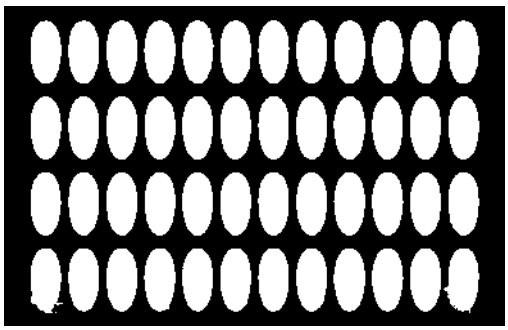
(b) Redukce barev.



(c) Cannyho hranovanový detektor.



(d) Morfologie a přidání rámečku.



(e) Inverze.

Obrázek 4.2 Proces zisku kontur dutin ze snímků nasvícených osvětlením ve světlém poli.

4.2.4 Tvorba vzorové masky

Algoritmus představen v sekci 4.2.2 ze snímku formy ve světlém poli vytvoří masku. Běžně se vady dotýkají okraje dutiny a v takovém případě bude algoritmem vada považována jako součást

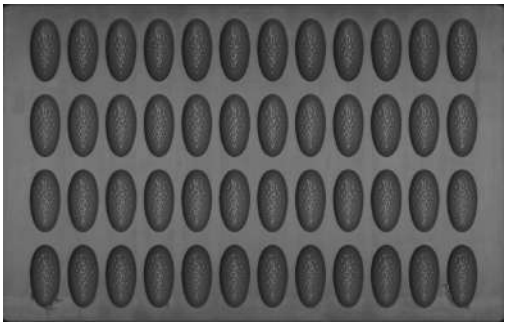
okraje dutiny. Taková maska by při detekci zapříčila odstranění všechny vad, jež se dotýkají nějaké z dutin.

Jsou navrženy dvě metody, které z kontur nalezených algoritmem ze sekce 4.2.2 vyberou jednu referenční konturu. Referenční kontura slouží k vytvoření umělé masky, která tímto nedostatkem netrpí. Algoritmus staví na faktu, že většina dutin formy není poškozena.

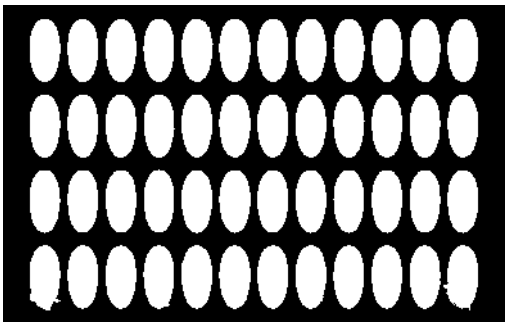
První z metod seřadí kontury dle jejich obsahu a vybere prostřední konturu,

Druhá z metod navzájem porovná všechny kontury na základě Hu momentů. Jako referenční je vybrána kontura, která je nejpodobnější všem ostatním konturám. Výhodou této metody je, že jsou Hu momenty invariantní z hlediska posuvu, měřítka a rotace.

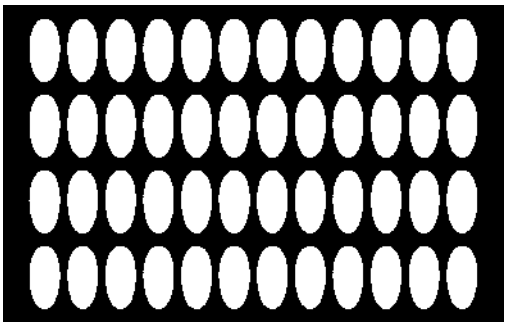
Pro všechny kontury masky jsou vypočítány jejich geometrické středy. Následně je z nich odvozen mediánový posuv na ose x a y pro každý řádek a sloupec dutin. Na základě znalosti pozice geometrického středu referenční kontury a posuvů na ose x a y jsou získány geometrické středy kontur vzorové masky. Při tomto rozmístění je využito faktu, že formy mají 12 řádků dutin a liší se pouze počet jejich sloupců. Posledním krokem je umístění referenční kontury na získané geometrické středy. Na Obrázku 4.3 je možno nahlédnout na výsledky algoritmu tvorby vzorové masky.



(a) Původní snímek.



(b) Maska dutin.



(c) Umělá maska, vytvořena pomocí referenční kontury.

Obrázek 4.3 Proces zisku vzorové masky.

4.2.5 Algoritmus detekce a klasifikace

Detekční algoritmus odhaluje vady dvěma různými testy. První z testů odhaluje povrchové vady forem. Druhý z nich odhaluje vady okraje dutin. Vady povrchu zasahují i do okraje dutiny, a to platí i naopak.

Při detekci povrchových vad jsou snímky formy v temném poli zpracovávány samostatně pro zajištění větší přesnosti. Na snímky je nejprve použit Cannyho hranový detektor jehož horní práh je získán Otsuovou metodou. Spodní práh je nastaven na polovinu horního prahu. Ze snímku jsou pomocí dilatované masky odstraněny hrany dutin. Míra dilatace je parametrem, dovolující nastavení optimální hodnoty. Následně jsou snímky získaných hran sečteny do jednoho snímku a jsou z nich odstraněny okraje formy, které jsou stejně jako okraje dutin zvýrazněny. Ke spojení jednotlivých hran vad je použito morfologické uzavření a ve snaze odstranit prach apod. je použito morfologické otevření. Posledním krokem je nalezení kontur indikujících existenci vad, kolem kterých jsou nakresleny bounding boxy.

K detekci vad okraje dutin je od původní masky odečtena dilatovaná vzorová masky. Míra dilatace je opět parametrem. Na snímek rozdílu těchto masek je použito morfologické otevření. Pozůstalé kontury jsou považovány za vady, kolem kterých je nakreslen bounding box.

Klasifikace vad spočívá v jejich odhalení zmíněnými testy. Vady jsou rozděleny do dvou skupin na vady povrchu a vady okraje dutin. Prioritou výrobce čokoládových produktů je především odhalit vadnou formu a vyřadit ji z výrobního provozu. V některých případech je možné používat formu, která je poškozena pouze na povrchu mimo dutiny. Naopak použití forem, jež mají výrazně poškozen okraj dutin, není pro výrobce vhodné. Výsledné produkty, vyrobeny pomocí takové formy, budou deformovány a nebudou odpovídat nastaveným standardům. S používáním vadných forem ve výrobním procesu jsou spojeny velké nevýhody, jež jsou popsány v sekci 2.3. Na základě těchto důvodů je pro výrobce výhodnější vyřadit z výroby vadné formy úplně.

Kapitola 5
Výsledky

V kapitole jsou zhodnoceny výsledky, kterých bylo dosaženo nazřenými metodami detekce.

Před detekcí vad bylo nutné jednotlivé snímky vzájemně překrýt. Navržená metoda pro překryv snímků dosahovala dobrých výsledků. Pro většinu snímků forem v temném poli bylo možné použít Otsuovu metodu k zisku kontury dutiny. U snímků forem s horším kontrastem musely být nastaveny prahy pro segmentaci a hranovou detekci manuálně.

U snímků forem ve světlém poli je navržený algoritmus zisku kontury dutiny robustní a dokáže se vypořádat s přítomností odlesků poblíž okraje dutiny. K eliminaci nerovnoměrnosti nasvícení okrajů formy se ukázala jako vhodná redukce barev pomocí vyhledávací tabulky (lookup table). Oproti jiným metodám, které byly vyzkoušeny, byla bezprostředně nejrychlejší a uspokojivě oddělila povrch od dutin formy. Zajímavých výsledků bylo dosaženo při redukci barev použitím metody shlukování nejbližších středů (k-means), avšak metoda byla extrémně pomalá, z toho důvodu nebyla použita.

K výběru referenční kontury byla vybrána metoda používající Hu momenty k porovnání kontur mezi sebou. Přestože kontura s mediánovou plochou byla ve většině případů dobrou volbou, metoda používající Hu momenty dokázala vždy vybrat srovnatelně kvalitní konturu, či o něco lepší konturu. Pro umístění referenční kontury na odpovídající místa byly implementovány dvě metody. První z nich spočítala vertikální a horizontální vzdálenosti mezi geometrickými středy dutin. U tohoto řešení však byly viditelné chyby v překryvu. Lepších výsledků bylo dosaženo při použití mediánové vzdálenosti mezi jednotlivými sloupci a jednotlivými řádky. Zároveň se ukázalo, že s tímto překryvem dosáhl detekční algoritmus výrazně lepších výsledků. Jiné metody překryvu, které byly vyzkoušeny, nedokázaly zajistit dostatečně dobrý překryv. To následně vedlo k interpretaci okrajů dutin jako vad.

Výsledky detekčního algoritmu jsou uvedeny v Tabulce 5.1. Nevýhodou metody je, že nedokáže rozlišovat mezi signifikantními vadami a méně signifikantními vadami. Problémové jsou snímky forem v temném poli s malým kontrastem, který je způsoben volbou červeného světla. Jedná se o snímky červené a modré formy výrobce Hans Brunner a o snímek zelené formy výrobce Vormenfabreik, která má dutiny ve tvaru srdce. Metodu je možné odladit pomocí míry dilatace vzorové masky a morfologických operací tak, že jsou pro snímky podobného charakteru získány slibné výsledky. U snímků s dobrým kontrastem je možné nastavit parametry takovým způsobem, aby byly detekovány pouze signifikantní vady. Detekce pouze signifikantních vad je také možná u snímků s horším kontrastem, avšak nebyly nalezeny takové parametry, se kterými by fungovala metoda robustně pro všechny snímky dohromady.

Volba parametrů je tedy kompromisem, který zajišťuje detekci většiny signifikantních vad, avšak mezi nimi se objevují i méně signifikantní vady. Pro zvýšení kontrastu byly vyzkoušeny různé metody, jež by umožnily detekovat i méně výrazné části vad. Většinou to však vede k

Tabulka 5.1 Výsledky detekčního algoritmu vad mimo okraj dutin.

	Procentuální výsledky
Pravá detekce	76 %
Falešná detekce	13 %
Nedetekováno	11%

detekci falešných vad na snímcích s dobrým kontrastem.

Pro detekci vad okrajů dutin byla vyzkoušena malá hodnota dilatace vzorové formy. To umožnilo detekci zdánlivě nepatrných vad. Výsledky této detekce jsou uvedeny v Tabulce 5.2. Pokud jsou brány v potaz pouze signifikantní vady, bylo dosaženo výsledků uvedených v tabulce 5.3. Signifikantní vady už se však ve většině případů shodují s nalezenými vadami pomocí detektoru povrchových vad.

Tabulka 5.2 Výsledky detekčního algoritmu vad okrajů dutin.

	Procentuální výsledky
Pravá detekce	70 %
Falešná detekce	10 %
Nedetekováno	20 %

Tabulka 5.3 Výsledky detekčního algoritmu vad okrajů dutin.

	Procentuální výsledky
Pravá detekce	78 %
Falešná detekce	0 %
Nedetekováno	22 %

Kapitola 6
Diskuze

V kapitole jsou diskutovány možná zlepšení snímací soustavy a detekčního algoritmu, která by mohla vést ke zrychlení a případnému zjednodušení předzpracovaní obrazu.

6.1 Snímací soustava

Při návrhu snímací soustavy došlo k určitým kompromisům, které ve výsledku způsobily například nutnost překryvu snímků, či složitější segmentaci masky dutin způsobenou přítomností odlesků. Snímací soustava spíše sloužila jako důkaz koncepce a základ, na kterém se dá dále stavět. Existuje několik možností, jak snímací soustavu vylepšit a tím výrazně urychlit a zjednodušit proces detekce a klasifikace vad.

Při zpracování obrazu musely být nejprve všechny snímky vyrovnány z důvodu zkosení forem. Hlavním vylepšením snímací soustavy je nahrazení laminátové desky, která nemá potřebnou tuhost, pevnost a přesnost, hliníkovým stolem. Stůl je přítomen na 3D modelu snímací soustavy (Obrázek 3.1). Vylepšení dovolí přesnější seřízení kamery vůči rovné ploše hliníkového stolu a rozšíří možnosti co se týče uchycení formy. K celkové přesnosti soustavy také přispěje nahrazení spojovacích kloubů za pevné úhelníky. Po těchto úpravách by neměla být korekce zkosení potřebná.

6.1.1 Maska

Časově náročným krokem při předzpracovaní obrazových dat je překrytí jednotlivých snímků formy. Daný proces není automatizován a prahy pro segmentaci a hranovou detekci snímků formy v temném poli byly určeny ručně. Překryv forem na snímcích však může být zajištěn již na úrovni snímací soustavy.

Přidání zadního osvětlení, jež by nasvětlovalo přední a boční hranu formy, by umožnilo spolehlivě získat přesnou pozici formy. Zisk dané informace by umožnil zjednodušení překryvu forem na snímcích. S aktuální snímací soustavou nejsou hranice formy dobře odlišitelné, především na snímcích formy v temném poli.

Alternativně může být využito výhod, které přináší řádková kamera a postupně nasnímat každý řádek vícekrát s různými druhy osvětlení. Výsledný snímek může být dekomponován na snímek ve světlém poli a na snímek v tmavém poli. Tato metoda dovolí dokonalý překryv forem. Pro tuto funkcionalitu byl již připraven obvod umožňující přepínání mezi různými světly automaticky pomocí kamery. Nevýhodou tohoto přístupu však může být jeho omezená rychlost.

6.1.2 Osvětlení ve světlém poli

Aktuálně nelze světlo přesunout níže v důsledku jeho uchycení, které si vzájemně překáží s uchycením bočního světla. Řešením by mohlo být použití jiného stylu uchycení. Volba nižší pracovní vzdálenosti by s největší pravděpodobností eliminovala více odlesků a bylo by zajištěno rovnoměrné nasvícení celé formy. Důsledkem by bylo další zjednodušení detekčního algoritmu. Alternativním řešením by mohlo být použití koaxiálního světla.

Na snímcích forem ve světlém poli byly velmi dobře zvýrazněny vady, avšak se na nich nacházelo mnoho rušivých elementů jako nehomogenita materiálu forem, či nerovnoměrnost nasvícení. Avšak v případě použití sofistikovanější algoritmus detekce by z těchto snímků mohly být získaný lepší indikace vad.

6.1.3 Osvětlení v temném poli

Mezi vybavení laboratoře patří jedno bílé a jedno červené světlo Effilux Effiline. Přestože byly tímto typem osvětlení vady dobře zvýrazněny, jistě by bylo vhodné použít světla dvě z každé strany. Eliminovala by se tím nutnost snímaní formy v obou směrech (po otočení o 180°) a následně oba snímky překrývat se snímkem masky. V případě použití dvou světel bočního osvětlení naproti sobě by možná mohla být získána maska pouze z nich. Dále by bylo vhodné vyzkoušet zelenou a modrou barvu osvětlení. Omezený vzorek forem, který byl k dispozici, by nejspíše benefitoval z volby modrého osvětlení místo světla červeného.

Jelikož s použitím barevných světel přicházejí některé nevýhody, mohla by být vyzkoušena bílá varianta osvětlení s polarizačním filtrem na objektivu a polarizační fólii u světla. Čímž by se mohl minimalizovat efekt přesvícení okrajů dutin u forem výrobce Vormenfabreik.

6.2 Realizace

Úpravou snímací soustavy může být dosaženo eliminace mnoha kroků detekčního algoritmu. Jedním z pracných kroků při detekci vad je tvorba vzorové masky. Proces by mohl být urychlen, pokud by se předem vytvořila kolekce vzorových masek pro každý typ formy. Při detekci by maska mohla být rovnou aplikována. Dokonalý překryv masky je možné docílit například použitím zadního osvětlení, jak je popsáno výše.

Výsledky dosažené pomocí detekčních algoritmů potvrdily komplexitu daného problémů. Problematické jsou především snímky s malým kontrastem, na kterých nelze vady spolehlivě detekovat. Zlepšení je nutné provést především na straně snímací soustavy. Avšak lepších výsledků by mohla dosáhnout některá ze sofistikovanějších metod zpracování obrazu.

Závěr

Práce se zaměřovala na snímání, detekci a klasifikaci povrchových vad čokoládových forem. Byly sestaveny tři snímací soustavy, na kterých byly zkoumány možnosti použití pokročilých optických prvků a osvětlení. Byl pořízen dataset o 24 snímcích osmi forem, na kterém byl testován algoritmus navržený na základě provedené literární rešerše.

Klasifikace byla provedena na základě dvou navržených algoritmů, jež extrahují ze snímků povrchové vady a vady okrajů dutin. Algoritmus navržený k detekci povrchových vad správně detekoval 76 % vad a algoritmus navržený k detekci vad okrajů dutin správně detekoval 78 % vad.

Stanovené cíle byly splněny, byly sestaveny tři různé snímací soustavy a byl navržen algoritmus detekce a klasifikace vad. Navržená snímací soustava s řádkovou kamerou má potenciál k dalšímu vývoji a případnému použití ve výuce předmětu BI-SVZ.

Bibliografie

1. NEOGI, Nirbhar; MOHANTA, Dusmanta K.; DUTTA, Pranab K. Review of vision-based steel surface inspection systems. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*. 2014, roč. 2014, č. 1, s. 50. ISSN 1687-5281. Dostupné z DOI: 10.1186/1687-5281-2014-50.
2. NGAN, Henry Y.T.; PANG, Grantham K.H.; YUNG, Nelson H.C. Automated fabric defect detection—A review. *Image and Vision Computing*. 2011, roč. 29, č. 7, s. 442–458. ISSN 0262-8856. Dostupné z DOI: https://doi.org/10.1016/j.imavis.2011.02.002.
3. CHO, Che-Seung; CHUNG, Byeong-Mook; PARK, Moo-Jin. Development of real-time vision-based fabric inspection system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2005, roč. 52, č. 4, s. 1073–1079. Dostupné z DOI: 10.1109/TIE.2005.851648.
4. LUO, Qiwu; HE, Yigang. A Cost-Effective and Automatic Surface Defect Inspection System for Hot-Rolled Flat Steel. *Robot. Comput.-Integr. Manuf.* 2016, roč. 38, č. C, s. 16–30. ISSN 0736-5845. Dostupné z DOI: 10.1016/j.rcim.2015.09.008.
5. HANBAY, Kazım; TALU, Muhammed Fatih; ÖZGÜVEN, Ömer Faruk. Fabric defect detection systems and methods—A systematic literature review. *Optik*. 2016, roč. 127, č. 24, s. 11960–11973.
6. KUMAR, Ajay. Computer-Vision-Based Fabric Defect Detection: A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008, roč. 55, č. 1, s. 348–363. Dostupné z DOI: 10.1109/TIE.1930.896476.
7. TOUT, Karim. *Automatic Vision System for Surface Inspection and Monitoring : Application to Wheel Inspection*. 2018. Dostupné také z: https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02974251. Theses. Université de Technologie de Troyes.
8. BATCHELOR, Bruce G. *Machine vision handbook*. 2nd ed. London: Springer, 2012. ISBN 978-1-84996-168-4.
9. HORNBERG, Alexander. *Handbook of machine and computer vision: the guide for developers and users*. Second, revised and updated edition. Weinheim: Wiley-VCH, 2017. ISBN 9783527413393.
10. ANAND, Sheila; PRIYA, L. *A guide for machine vision in quality control*. 1. vyd. Boca Raton: CRC Press, 2019. ISBN 9781003002826.
11. *Dome lights and tunnel lights* [online]. Mantova: Opto Engineering, 2022 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://www.opto-e.com/basics/dome-lights-and-tunnel-lights.
12. *Low angle ringlight geometry.* [Online]. Mantova: Opto Engineering, 2022 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://www.opto-e.com/basics/dark-field-front-light-illumination.

13. LUO, Qiwu; FANG, Xiaoxin; LIU, Li; YANG, Chunhua; SUN, Yichuang. Automated Visual Defect Detection for Flat Steel Surface: A Survey. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020, roč. 69, č. 3, s. 626–644. Dostupné z DOI: 10.1109/TIM.2019.2963555.

14. CZIMMERMANN, Tamás; CIUTI, Gastone; MILAZZO, Mario; CHIURAZZI, Marcello; ROCCELLA, Stefano; ODDO, Calogero Maria; DARIO, Paolo. Visual-Based Defect Detection and Classification Approaches for Industrial Applications—A SURVEY. *Sensors*. 2020, roč. 20, č. 5. ISSN 1424-8220. Dostupné z DOI: 10.3390/s20051459.

15. NEAPOLITAN, Richard E.; JIANG, Xia. *Artificial Intelligence : With an Introduction to Machine Learning, Second Edition*. Milton, UNITED KINGDOM: CRC Press LLC, 2018. ISBN 9781351384384. Dostupné také z: http://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=5321358.

16. BOBY, Riby A.; RAMAMOORTHY, Balakrishnan; SINGAPERUMAL, M.; SONAKAR, Prashant S. *Identification of defects on highly reflective ring components and analysis using machine vision* [online]. Chennai, 2009 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00170-010-2730-3.pdf. Indian Institute of Technology Madras.

17. DELACALLE, F. J.; GARCIA, Daniel F.; USAMENTIAGA, Rubén. Inspection system for rail surfaces using differential images. In: *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. 2017, s. 1–9. Dostupné z DOI: 10.1109/IAS.2017.8101824.

18. SELVATHI, D.; NITHILLA, I.Hannah; AKSHAYA, N. Image Processing Techniques for Defect Detection in Metals using Thermal Images. In: *2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*. 2019, s. 939–944. Dostupné z DOI: 10.1109/ICOEI.2019.8862616.

19. HASSAN, J.; AWAN, A. Majid; JALIL, A. Welding Defect Detection and Classification Using Geometric Features. In: *2012 10th International Conference on Frontiers of Information Technology*. 2012, s. 139–144. Dostupné z DOI: 10.1109/FIT.2012.33.

20. FANG, Mei; YUE, Guangxue; YU, Qingcang. The study on an application of otsu method in canny operator. In: *Proceedings. The 2009 International Symposium on Information Processing (ISIP 2009)*. 2009, s. 109.

21. WANG, Shun; ZHOU, Huixing; ZHANG, Zhongyue; ZHENG, Xiaoyu; LV, Yannan. Robot Floor-Tiling Control Method Based on Finite-State Machine and Visual Measurement in Limited FOV. *Advances in Civil Engineering*. 2021, roč. 2021, s. 1–16. Dostupné z DOI: 10.1155/2021/8372815.

22. TIAN, Furui; XING, Zhao; CHE, Xiangqian; ZHAO, Yagebai; XIN, Dabo. Concrete Crack Identification and Image Mosaic Based on Image Processing. *Applied Sciences*. 2019, roč. 9, s. 4826. Dostupné z DOI: 10.3390/app9224826.

23. JIAN, Chuanxia; GAO, Jian; AO, Yinhui. Automatic surface defect detection for mobile phone screen glass based on machine vision. *Applied Soft Computing*. 2017, roč. 52, s. 348–358. ISSN 1568-4946. Dostupné z DOI: https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.10.030.

24. HAN, Yu; WU, Yubin; CAO, Danhua; YUN, Peng. Defect detection on button surfaces with the weighted least-squares model. *Frontiers of Optoelectronics*. 2017, roč. 10, č. 2, s. 151–159. ISSN 2095-2767. Dostupné z DOI: 10.1007/s12200-017-0687-7.

25. SHEN, Yehu; MO, Rui; WEI, Lei; ZHU, Yi; PENG, Zhenyun; ZHANG, Yaohui. Bottle cap scratches detection with computer vision techniques. In: *2013 Ninth International Conference on Natural Computation (ICNC)*. 2013, s. 1314–1318. Dostupné z DOI: 10.1109/ICNC.2013.6818182.

26. LÓPEZ, Fernando; VALIENTE, José Miguel; BALDRICH, Ramón; VANRELL, María. Fast surface grading using color statistics in the CIE Lab space. In: *Iberian conference on pattern recognition and image analysis*. 2005, s. 666–673.
27. CHU, Maoxiang; GONG, Rongfen; WANG, Anna. Strip steel surface defect classification method based on enhanced twin support vector machine. *ISIJ International*. 2014, roč. 54, č. 1, s. 119–124. Dostupné z DOI: 10.2355/isijinternational.54.119.
28. SUN, Jun; LI, Chao; WU, Xiao-Jun; PALADE, Vasile; FANG, Wei. An Effective Method of Weld Defect Detection and Classification Based on Machine Vision. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019, roč. 15, č. 12, s. 6322–6333. Dostupné z DOI: 10.1109/TII.2019.2896357.
29. WANG, Xuelong; II, Ying Gao; DONG, Junyu; QIN, Xukun; QI, Lin; MA, Hui; LIU, Jun. Surface defects detection of paper dish based on Mask R-CNN. In: JIANG, Xudong; CHEN, Zhenxiang; CHEN, Guojian (ed.). *Third International Workshop on Pattern Recognition*. SPIE, 2018, sv. 10828, s. 197–202. Dostupné z DOI: 10.1117/12.2502097.
30. MEI, Shuang; YANG, Hua; YIN, Zhouping. An Unsupervised-Learning-Based Approach for Automated Defect Inspection on Textured Surfaces. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2018, roč. 67, č. 6, s. 1266–1277. Dostupné z DOI: 10.1109/TIM.2018.2795178.
31. *Mould types* [online]. Glonn: Hans Brunner, 2022 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: https://www.hansbrunner.de/industrial-moulds.
32. *Materials* [online]. Tilburg: VormenFabriek, 2021 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: https://vormenfabriek.com/materiaal/?lang=en.
33. GRAY, Michael P. Moulding, enrobing and cooling chocolate products. In: BECKETT, Stephen T.; FOWLER, Mark S.; ZIEGLER, Gregory R. (ed.). *Beckett's Industrial Chocolate Manufacture and Use*. 5th edition. Wiley, 2017, kap. 14, s. 356–399. ISBN 9781118923597. Dostupné z DOI: https://doi.org/10.1002/9781118923597.ch14.
34. *Mould colour sample book* [online]. Glonn: Hans Brunner, 2022 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: https://www.hansbrunner.de/downloads-en?file=files/brunner/Flyer/Flyer%5C%20Deutsch/Farbfaecher.pdf.
35. WINDHAB, Erich J. Tempering. In: BECKETT, Stephen T.; FOWLER, Mark S.; ZIEGLER, Gregory R. (ed.). *Beckett's Industrial Chocolate Manufacture and Use*. 5th edition. Wiley, 2017, kap. 13, s. 314–355. ISBN 9781118923597. Dostupné z DOI: https://doi.org/10.1002/9781118923597.ch13.
36. FRYER, Peter; PINSCHOWER, Kerstin. The Materials Science of Chocolate. *MRS Bulletin*. 2000, roč. 25, č. 12, s. 25–29. ISSN 1938-1425. Dostupné z DOI: 10.1557/mrs2000.250.
37. *Tips for handling and caring of chocolate moulds* [online]. Glonn: Hans Brunner, 2019 [cit. 2022-03-17]. Dostupné z: https://www.hansbrunner.de/downloads-en?file=files/brunner/Flyer/Flyer%5C%20Englisch/Tips%5C%20for%5C%20handling%5C%20and%5C%20caring%5C%20of%5C%20chocolate%5C%20moulds_01.2019_EN.pdf.
38. BAYER, Bryce E. *Color imaging array* [online]. 1975-03-05 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://patents.google.com/patent/US3971065A/en.
39. *Basler Racer raL6144-16gm - Line Scan Camera* [online]. Ahrensburg: Basler AG, 2022 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/line-scan-cameras/racer/ral6144-16gm/.
40. *Schneider Kreuznach* [online]. Bad Kreuznach: Jos. Schneider Optische Werke, 2021 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://schneiderkreuznach.com.

41. *EZSM3E045AZAC, Electric Linear Slide with AZ Series Absolute Encoder Motor* [online]. Torrance: Oriental Motor U.S.A., 2020 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://catalog.orientalmotor.com/item/all-categories-components/ezsm-az-linear-slides/ezsm3e045azac.

42. *Datasheet EFFI-LINE-V2* [online]. Les Ulis: Effilux, 2021 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://www.effilux.com/documentation/doc-technique/DATASHEET-EFFI-LINE.pdf.

43. *Corona II LED Line Lighting System: Tube light illumination* [online]. Konstanz: Chromasens [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://chromasens.de/sites/default/files/download-media/Corona-II-tube-light-datasheet.pdf.

44. *Bandpass Filters* [online]. Bad Kreuznach: Jos. Schneider Optische Werke, 2022 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://schneiderkreuznach.com/application/files/9016/5053/5994/Datasheet_Bandpass.pdf.

Obsah přiloženého média

- `src`
  - `impl` ..... zdrojové kódy implementace
  - `thesis` ..... zdrojová forma práce ve formátu LaTeX
- `text` ..... text práce
  - `thesis.pdf` ..... text práce ve formátu PDF