

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 467*

*ISSN 1213-4198*

*thesis*  
**?**  
**IS**

*Ing. Karel Horák*

**Aplikace metod rozpoznání obrazu  
v defektoskopii**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav automatizace a měřicí techniky

Ing. Karel Horák

**APLIKACE METOD ROZPOZNÁVÁNÍ OBRAZU  
V DEFEKTOSKOPII**

APPLIED METHODS FOR TRANSPARENT MATERIALS  
INSPECTION

ZKRÁCENÁ VERZE Ph.D. THESIS

Obor: Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika

Školitel: Doc. Ing. Jozef Honec, CSc., FEKT VUT Brno

Oponenti: Doc. RNDr. Jana Šarmanová, CSc., FEI VŠB TU Ostrava  
Doc. Dr. Ing. Pavel Zemčík, FEI VUT Brno

Datum obhajoby: 13. 2. 2008

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Vizuální inspekční systémy, defektoskopie, transparentní materiály, rozpoznávání vzorů, funkce geometrických a komplexních invariantů, klasifikace reprezentantem třídy.

## **KEYWORDS**

Visual inspecting systems, defectoscopy, transparent materials, pattern recognition, geometric and complex invariants functions, class representative classification.

## **MÍSTO ULOŽENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE**

Vědecké oddělení FEKT, VUT v Brně.

## OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....	6
3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....	7
4 INSPEKČNÍ SYSTÉM BTCAM612 .....	8
4.1 Popis inspekčního systému .....	9
4.2 Požadavky na inspekční systém.....	10
5 LOKALIZACE OBLASTÍ KONTROLY .....	13
5.1 Lokalizace oblasti kontroly hrdla.....	13
5.2 Lokalizace oblasti kontroly dna .....	14
5.3 Lokalizace oblasti kontroly stěny .....	15
6 FILTRACE ZNÁMÝCH VZORŮ .....	16
6.1 Komplexní momentové invarianty.....	17
6.2 Funkce komplexních invariantů.....	17
6.3 Experimentální ověření .....	19
7 EXTRAKCE A KLASIFIKACE PŘÍZNAKŮ .....	22
7.1 Extrakce a klasifikace příznaků ze snímku hrdla.....	22
7.2 Extrakce a klasifikace příznaků ze snímku dna .....	24
7.3 Extrakce a klasifikace příznaků ze snímku stěny.....	26
8 ZÁVĚR.....	28
9 LITERATURA .....	29
10 PUBLIKACE.....	29
11 CURRICULUM VITAE .....	30
12 ABSTRACT .....	31



# 1 ÚVOD

Z hlediska automatizační techniky aplikované v průmyslových provozech je zcela zbytečné obhajovat nutnost stálého výzkumu a technického rozvoje v této oblasti. Automatické kontrolní systémy využívající kamerových zařízení lze nalézt téměř na každém kroku a to nejen v průmyslových provozech. Nedílnou součástí inspekčních systémů je na jedné straně hardware poskytující platformu pro samotnou činnost stroje a na straně druhé software, který celou tuto činnost řídí. Vizuální systémy obsahují zpravidla sofistikované algoritmy zpracování obrazu simulující rozhodovací činnost člověka (v některých ohledech dodnes nezastupitelnou).

V oblasti počítačového vidění a zpracování obrazu se během jeho vývoje vytvořila řada kategorií zabývajících se konkrétní problematikou, oblastí jako např. rekonstrukce scény, detekce události, sledování trajektorie, rozpoznávání fyzických objektů nebo dokonce lidské tváře, učení, optická navigace, rekonstrukce obrazu a mnohé další. Mimo jiné i z uvedeného výčtu již částečně vyplývá, že v oblasti počítačového vidění není dodnes stanoven formalismus pro řešení obecné úlohy a velmi těžko odhadovat, bude-li kdy vůbec nalezen.

Místo tohoto obecného formalismu byla postupem času vytvořena nepřeborná škála metod řešících různé a často velmi specifické úlohy. Mezi ty obecnější a v praxi alespoň částečně aplikované metody patří systémy pro rozpoznávání identity člověka ze snímku obličeje nebo sekvence pohybu celého těla. Rovněž v průmyslu nebo robotické navigaci dnes již existují relativně generické systémy zpracování a vyhodnocení obrazu stejně jako OCR systémy pro rozpoznávání písma.

Pravděpodobně nejrozšířenější třídou aplikací tvoří kamerové systémy inspekce kvality výroby. Cílová skupina průmyslových zařízení je velmi široká a lze říci, že téměř neomezená. Průmyslové inspekční systémy zpravidla nahrazují dřívější kontrolní činnost člověka a poskytují především spolehlivost, přesnost, rychlost a neúnavnost. Mezi takové systémy patří např. i celá řada kamerových kontrol společnosti CAMEA spol. s r.o., s jejíž spoluprací je řešena i tato disertační práce.

Značná část průmyslových vizuálních systémů pak spadá do oblasti defektoskopie, čili detekce vad nebo jiných poruch na zkoumaném výrobku. Systémy pracují obvykle s velmi vysokou rychlostí zpracování obrazu a proto je jejich nedílnou součástí také výkonný a často cíleně navržený hardware. Stejně tak tomu je i u inspekčního systému řešeného v této práci.

Žádanou komoditou jsou inspekční systémy výrobků, které nějakým způsobem přicházejí do přímého styku s člověkem. Konkrétním případem, kterým se zabývá tato práce, je inspekční systém pro kontrolu kvality potravinářských lahví vizuální cestou.

Hlavním cílem je provést detekci vad na láhvi ať už jde o špínu, mechanické poškození vlastní láhve nebo např. cizích předmětů v láhvi. Rychlost zpracování obrazu se u tohoto systému pohybuje v řádu několika málo desítek milisekund pro jednu kontrolovanou láhev.

## 2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Obecným cílem této disertační práce je nalezení hardwarových a softwarových řešení pro sestavení vizuálního inspekčního systému kontroly skleněných lahví. Velká pozornost je zaměřena na nestandardní provozy východních zemí. Tyto provozy jsou charakteristické vysokým počtem nekvalitních lahví a obecně výskytem lahví s různými značkami, znaky a logy zejména na dně láhve, které je třeba filtrovat od skutečných vad.

Provozy s obdobně nekvalitními láhvemi se před časem vyskytovaly také v ČR a jiných zemích střední Evropy, ale postupem času byly vytlačeny modernějšími a kvalitnějšími systémy. Tím došlo k exportu velkého množství lahví na východní trhy, zejména pak do Ruska. Současně se zde ale rozvinula i potřeba kvalitních kamerových inspekčních systémů pro zvýšení jakosti výroby.

Kontrola láhve se v potravinářském oboru dělí na tři hlavní oblasti. Na kontrolu dna, hrdla a stěny láhve. Někteří výrobci poskytují také jiné kontroly jako např. kontrolu vnitřní stěny, kontrolu závitu, kontrolu vnitřního hrdla apod. Zpravidla se jedná o modifikaci některé z uvedených hlavních kontrol. Tato práce se zabývá uvedenými třemi standardními kontrolami a to v nestandardních provozech.

Konkrétním cílem práce je filtrace syntetických vzorů z oblasti dna, jejíž absence ve vizuálním systému znemožňuje expanzi na uvedené rozvíjející se východní trhy. Pro každý provoz je stanovena uzavřená skupina značek, symbolů a jiných umělých vzorů, které je třeba z obrazu filtrovat dříve, než je příslušný obraz postoupen detekci vad. Z hlediska zpracování obrazu mají tyto vzory charakter nehomogenit obdobně jako skutečné vady a nejsou dosavadními systémy rozlišitelné. Přestože konkurence na trhu vizuálních inspekčních systémů je velká, není zřejmá snaha zejména větších výrobců tyto specifické problémy řešit. Z tohoto faktu nepřímo vyplývá, že zmíněné řešení inspekce potravinářských lahví nebylo pro tyto specifické provozy dosud řešeno. Návrh metod pro rozpoznávání vzorů je uveden v kapitole 6.

Kromě uvedené filtrace vzorů si práce klade několik dalších neméně významných cílů. Jednak jde o kompaktní řešení hardwarové části vizuálního systému včetně popisů principů zařízení snímků, jednak o algoritmické řešení detekce oblastí kontroly, extrakce příznaků a následné klasifikace pro rozpoznání vad.

Přesné stanovení cílů práce umožňují konkrétní požadavky průmyslových subjektů. Jde zejména o stanovené velikosti detekovatelných vad, procentuální úspěšnost inspekce, výčet typových nehomogenit na skleněném materiálu považovaných za vady a také výčet specifických vlastností lahví příslušného provozu. Velká část práce je proto zaměřena na řešení problematiky inspekce v ruském Kirově, který je typickým příkladem méně vyspělého provozu z hlediska kvality lahví. Zde je v současné době instalován standardní vizuální systém BTCAM612 provádějící kontrolu hrdla a dna láhve bez detekce syntetických vzorů. Kontrola stěny nebyla zadavatelem požadována. Obdobná situace je také v polské Jurajské s tím rozdílem, že zde je instalován kompletní systém včetně kontroly stěny láhve.

Praktickým požadavkem z hlediska realizovatelnosti celého inspekčního systému na průmyslové lince je maximální doba zpracování jedné láhve. Tato doba je závislá na rychlosti konkrétní linky a pohybuje se zpravidla v rozmezí 8 tisíc zpracovaných lahví za hodinu v menších provozech (např. pivovar Hlinsko ČR) až po více než 30 tisíc lahví za hodinu v provozech velkých výrobců jako např. Jurajska (Polsko) nebo Liepāja (Lotyšsko). Z hlediska algoritmů vyhodnocení vad na hrdle, dně a stěně láhve je splnění časových poměrů zpracování obrazu chápáno jako jeden z cílů práce. Ze známých rychlostí průmyslových linek pak vyplývá, že pro nejméně příznivý případ (nejrychlejší linku) musí být všechny algoritmy dokončeny v čase kratším, než 100 ms. Tato doba odpovídá rychlosti linky kolem 40 tisíc lahví za hodinu.

Z hlediska časových poměrů algoritmů pro rozpoznávání vzorů na dně láhve je situace o něco složitější. Jelikož se ve své podstatě jedná o pilotní projekt, nejsou zatím známa přesná specifika detekce vzorů a tak je cílem práce sestavit obecný přístup pro jejich rozpoznávání. Časová optimalizace a platformová implementace je pak závislá na konkrétní implementaci a požadavcích zadavatele.

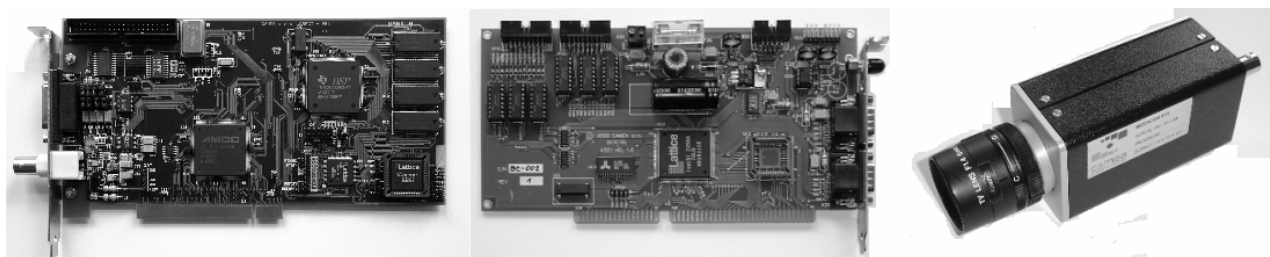
### **3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY**

Přestože se předložená práce zabývá komplexním návrhem inspekčního vizuálního systému, je značná část pozornosti věnována algoritmické části. Důvody jsou hned dva. Prvním z nich je relativně vysoká úroveň vyspělosti hardwarových prvků a obecně kamerových systémů určených do průmyslu, které svou výpočetní kapacitou a rychlostí plně dostačují většině požadavků. Druhý důvod je komplementární a to ten, že právě softwarovému vybavení inspekčních systémů v potravinářství není věnována dostatečná pozornost. O tom svědčí např. nedostatek kontrolních systémů pro specifické provozy ve východní Evropě.

Na trhu inspekčních systémů v potravinářském průmyslu dominují po hardwarové stránce zejména větší vývojové firmy z Německa jako např. Kronos se systémy Linatronic, Rotocheck a Smartronic. Druhým velkým dodavatelem inspekčních kamerových systémů je rovněž německý výrobce Heuft se systémem InLine využívající technologii Reflexx RTG. V České republice se těmto systémům věnuje pouze firma CAMEA spol. s r.o., která ve spolupráci se společností NATE Chotěboř a.s. dodávající mechanickou a řídicí část zařízení vyvíjí a produkuje kontrolní kamerové zařízení BTCAM612. V těsné spolupráci s těmito dvěma komerčními subjekty a potažmo i průmyslovými zadavateli byla zpracována i tato práce.

Z hlediska hardwaru obsahuje inspekční systém BTCAM612 řadu prvků určených speciálně pro účely inspekce lahví. Na elektronické bázi se jedná o digitalizační karty GX6, řídicí kartu BOTCTRL1.1 a průmyslové programovatelné kamery Modicam612. Všechny tři uvedené prvky jsou znázorněny na ilustrativním obrázku 3.1.





**Obr. 3.1.:** Digitalizační karta GX6, řídicí karta BOTCTRL a kamera Modicam612

Z hlediska mechanických prvků je systém vybaven zejména kompletním řešením zdrojů světla pro vhodné nasvícení snímaných lahví, optického kabelu pro řízení expoziční doby snímku dna a stěny, optických expozimetrů, kabeláže datové a řídicí komunikace a řady dalších potřebných prvků. Z hlediska výzkumu a vývoje byly hardwarové možnosti pro daný účel zcela dostačující s výjimkou kontroly stěn, která byla v rámci této práce a realizace inspekčních systémů vyvinuta pro provoz Samson v Českých Budějovicích, Jurajskou v Polsku a Liepāja v Lotyšsku. V současné době dochází k realizaci dalších systémů zejména na území ČR. Blíže jsou hardwarové prvky a vlastnosti systému BTCAM612 popsány v následující kapitole.

Softwarové vybavení inspekčního systému BTCAM612 lze z hlediska implementace rozdělit na dvě části. První je samotný řídicí systém obsahující uživatelské rozhraní, metody archivace dat, úroveň přístupů obsluhy, řízení zpracování obrazu, zobrazení galerie snímků a jiné moduly. Tato část je specifická pro konkrétní stroj podle požadavků zadavatele a je řešena v rámci technického rozvoje systému. Druhou část tvoří metody a algoritmy zpracování obrazu, které patří a díky zvyšujícím se nárokům na přesnost a rychlost inspekce budou i nadále patřit do oblasti výzkumu a vývoje. Obě tyto části byly v rámci práce vyvíjeny a implementovány na stroje Samson (České Budějovice), Hlinsko (ČR), Jurajská (Polsko), Liepāja (Lotyšsko) a Kirov (Rusko).

Z obecného pohledu není řada metod zpracování obrazu a rozpoznávání objektů ničím novým, avšak vyzkoušené postupy pro reálné aplikace nejsou téměř vůbec k dispozici. Lze tedy využít společný teoretický základ zpracování obrazu pro návrh konkrétních metod splňujících žádanou funkci. Tento fakt se týká všech částí vyhodnocení obrazu, tedy od předzpracování, přes segmentaci, extrakci příznaků, redukci příznakového prostoru až po finální klasifikaci.

## 4 INSPEKČNÍ SYSTÉM BTCAM612

Jak bylo zmíněno v úvodní kapitole, předložená práce pojednávající o defektoskopii transparentních materiálů se bezprostředně týká vizuálního systému pro kontrolu kvality a čistoty lahví BTCAM612. Tento systém je vyvíjen ve spolupráci se společností CAMEA spol. s r.o., která se již řadu let zabývá podobnými systémy automatického zpracování obrazu.

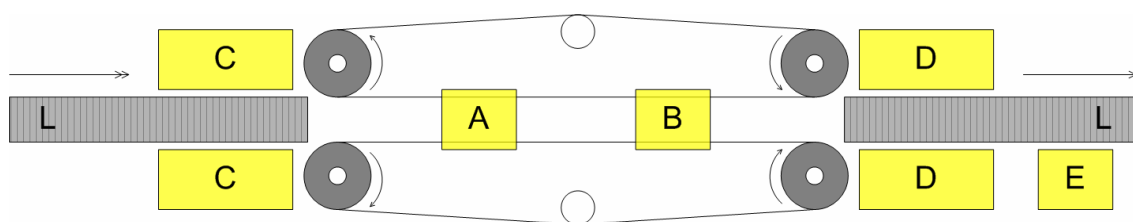
Ve spolupráci s dalšími výrobními subjekty mechanického, optického a elektrotechnického zaměření byla od roku 1996 sestavena řada strojů BTCAM612 pro inspekci různých typů lahví jak ukazuje obrázek 4.1. První dva pilotní stroje byly instalovány v severokazašském městě Semey (známějším pod ruským jménem Semipalatinsk), následovaly stroje pro Vyškov, Zábřeh, Budějovice, Hlinsko (vše ČR), Jurajska Miszków (Polsko), Kirov (Rusko) a Liepāja (Lotyšsko).



**Obr. 4.1.:** Variace některých typů lahví kontrovaných systémem BTCAM612

#### 4.1 POPIS INSPEKČNÍHO SYSTÉMU

Inspekční defektoskopický systém je fyzický stroj, který zařazen do stávající plnicí linky detekuje vady na lahvích podle uživatelem nastavených parametrů. V současnosti jsou k dispozici tři typy kontrol – kontrola hrdla, dna a stěny láhve. Kontrola hrdla je stejně jako kontrola dna zajištěna jednou kamerou, kontrola stěny láhve po celém jejím obvodu je zajištěna čtveřicí kamer. Schématické znázornění stroje na plnicí lince s vyznačením umístění jednotlivých kontrol je uvedeno na obrázku 4.2.

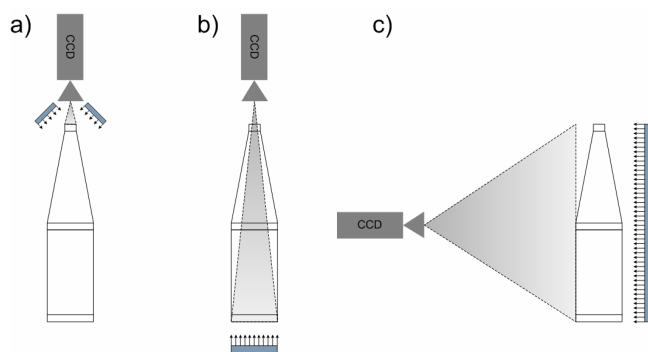


**Obr. 4.2.:** Prostorové uspořádání inspekčního systému

Láhve se na plnicí lince L pohybují ve vertikální (stojící) poloze po dopravníkových pásích ve směru šipek vyznačených na obrázku. Kontrola hrdla reprezentována blokem A a kontrola dna blokem B probíhají v okamžiku, kdy láhev nestojí na ocelovém pásu, ale je vedena za stěny v pěnových pásích a je možné ji vertikálně prosvítit, což je principiálně nutné hlavně u kontroly dna. Kamerová místa kontroly stěn skládající se vždy ze zdroje transmisního světla a dvou kamer jsou umístěna na vstupu (blok C) a výstupu (blok D) stroje. Rozdílnou rychlostí pohybu obou pásů uvnitř stroje je zajištěno otočení láhve o 90° podle její axiální osy a tím zajištěno, že druhé měřicí místo stěny (blok D) provádí inspekci zbylé části

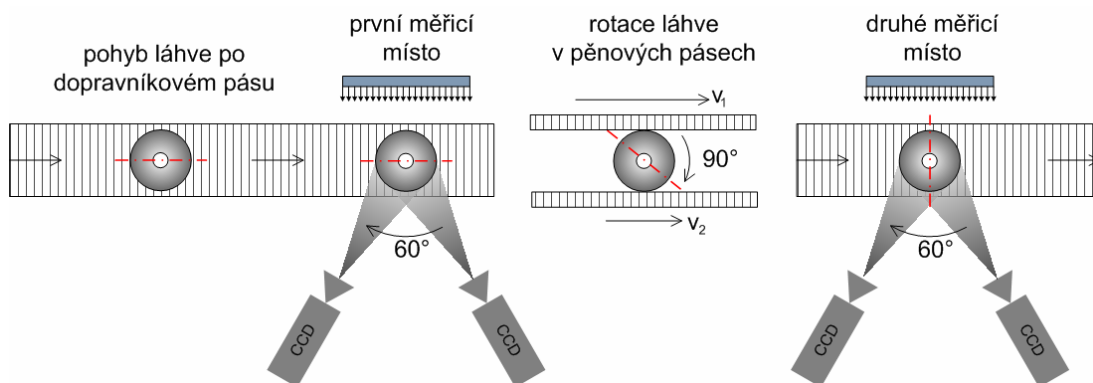
láhve, která nemohla být na prvním měřicím místě (blok C) kontrolována. Pokud je láhev na kterékoliv dílčí kontrole vyhodnocena jako závadná, je v místě bloku E vyřazena z plnicí linky na vedlejší odpadový stůl.

Kontrola dna a stěny láhve využívá transmisního principu snímání, kdy je láhev prosvětlena skrz směrem ke kameře. Kontrola hrdla pak využívá reflexního principu, kdy kamera i zdroj zábleskového světla jsou umístěny stejně nad hrdlem láhve. Geometrické uspořádání snímací aparatury hrdla láhve je ukázáno na obrázku 4.3. vlevo, dna uprostřed a stěny vpravo.



**Obr. 4.3.:** Techniky pořízení snímků a) hrdla, b) dna, c) stěny

Jak již bylo zmíněno, je kontrola hrdla láhve zajištěna jednou kamerou, dna také jednou kamerou a kontrola stěny po celém obvodu láhve čtyřmi kamerami, jejichž zorné úhly se symetricky kryjí a pokrývají tak celou stěnu láhve. Kamery jsou umístěny po dvojicích na dvou měřicích místech, na vstupu a výstupu stroje, v němž je láhev otočena. Každá dvojice kamer sdílí stejný začátek a trvání expoziční doby. Schéma pořízení všech čtyř snímků stěny láhve ilustruje obrázek 4.4.



**Obr. 4.4.:** Technika pořízení sady snímků stěny láhve

## 4.2 POŽADAVKY NA INSPEKČNÍ SYSTÉM

Většina průmyslových linek pracuje s průměrnou rychlostí kolem 12 až 15 tisíc lahví za hodinu. Důležitější pro návrh celého systému a hlavně algoritmů je ale extrémní okamžitá rychlost, která zpravidla nepřekročí hodnotu 36 tisíc lahví za hodinu, z čehož vyplývá maximální možný čas zpracování jedné láhve 100 ms.

Pro každou láhev je třeba algoritmicky vyhodnotit jeden pohled hrdla, jeden dna a čtyři pohledy stěn a zpracovat režijní rutiny vizuálního systému jako např. ukládání vybraných snímků na disk, vykreslování vadných lahví na obrazovku, řízení hardwaru apod.

Na algoritmické vyhodnocení jednoho snímku pak vychází průměrná doba přibližně 15 ms, ačkoliv důležitější hledisko je trvání všech algoritmů dohromady, které nesmí překročit uvedených 100 ms. Této skutečnosti je v systému využito, protože např. algoritmy nad snímkem hrdla a dna mají delší dobu trvání kvůli operacím v polárních souřadnicích (přesněji viz tabulka 4.1 pod odstavcem). Algoritmy dna jsou navíc zatíženy filtracemi vzorů a vroubků, takže využívají procesorový čas na úkor jednodušších algoritmů stěn, jejichž váha je navíc oproti hrdlu nebo dnu čtyřnásobná vlivem počtu snímků stěn.

**Tabulka 4.1.:** Průměrné procesorové časy algoritmů

Algoritmus	Hrdlo	Dno	Stěna	Celkem
Průměrný čas algoritmu [ms]	18 ms	23 ms	8 ms	$18+23+4*8= 73$ ms

Zatímco rychlost zpracování je binární parametr systému typu vyhověl/nevyhověl rychlosti dané linky, má hodnota citlivosti detekčních algoritmů obdobně jako spolehlivost systému (procentuální úspěšnost správné klasifikace láhve) charakter spíše konkurenční výhody. Přesto existují obecně platné minimální hodnoty, které musí každý inspekční systém tohoto typu splňovat. Obvykle se uvádí generická chybovost systému nepřesahující zpravidla 0.5 % a hodnoty citlivosti a spolehlivosti konkrétních vybraných částí láhve jsou upraveny tabulkou. Hodnoty platné pro standardní inspekční systémy jsou uvedeny v následující tabulce 4.2.

**Tabulka 4.2.:** Přehled standardních parametrů inspekčních systémů

Typ inspekce	Povaha vady	Garantovaná velikost vady	Spolehlivost
			[ % ]
Hrdlo	nespojitosť po obvodu	3 mm	99.9
Dno	tmavé fleky	2 x 2 mm ve středu	99.9
		3 x 3 mm ve vroubcích	99.9
	polarizovatelná fólie	3 x 3 mm ve středu	99.9
		4 x 4 mm ve vroubcích	99.9
Stěna (dvě měřicí místa)	tmavé fleky	6 x 6 mm	99.9
	polarizovatelná fólie	10 x 10 mm	99.9
Stěna (čtyři měřicí místa)	tmavé fleky	4 x 4 mm	99.9
	polarizovatelná fólie	6 x 6 mm	99.9

Kromě uvedených parametrů bývá často specifikován výčet typových objektů, které se mohou na láhvi vyskytnout a jsou považovány za vadu. Tento výčet bývá zpravidla pevný, ovšem v méně kvalitních provozech (např. uvedené Polsko, Rusko, Lotyšsko) se občas liší podle lokálních podmínek. Nejčastěji jsou pro detekci specifikovány vady, které jsou uvedeny v následující tabulce 4.3.

**Tabulka 4.3.:** Seznam typických vad v různých částech láhve

Typ inspekce	Charakteristika vady
Hrdlo	obecná nehomogenita v radiálním i tangenciálním směru
	výštipky
	úlomky
	přítomnost zátky
	přítomnost cizího předmětu na těle hrdla
Dno	cizí předmět v oblasti vnitřního dna
	cizí předmět v oblasti vnějšího dna (vroubků)
	vyštipnuté nebo jinak poničené dno
	špína nebo plíseň
	fólie
Stěny	zbytky etiket
	špína nebo plíseň
	praskliny nebo jinak porušené sklo
	špatný profil daného typu láhve

## 5 LOKALIZACE OBLASTÍ KONTROLY

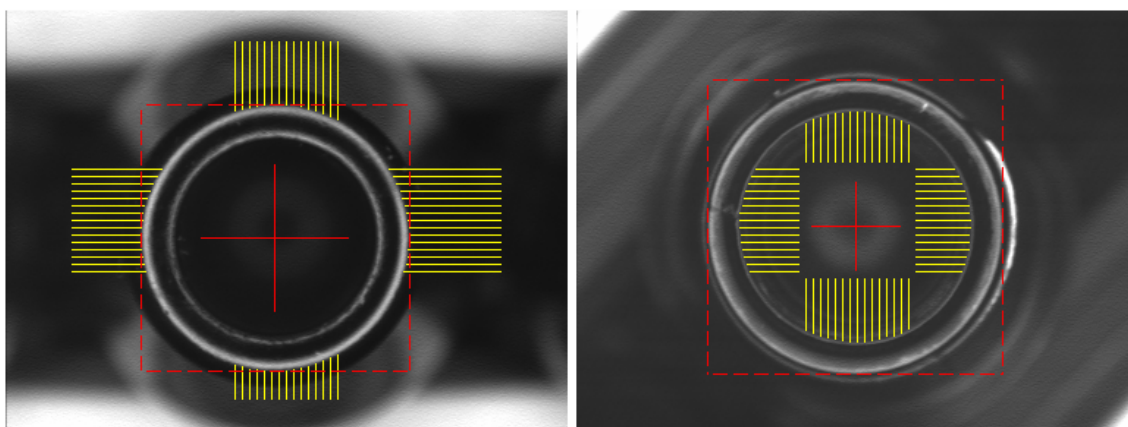
Spouštění kamer a tedy pořizování snímků se provádí na základě optických čidel, konkrétně laserových optických závor. Vzhledem ke konečné přesnosti celé soustavy a lahvím pohybujícím se po dopravníkovém pásu rychlostí až 1 m/s, jsou předem nastavené oblasti kontroly na snímcích jednotlivých částí láhve sice ve vymezené, nicméně ne v zcela přesné poloze a liší se snímek od snímku.

Každá láhev bez ohledu na typ kontroly může být navíc na pásu vlivem jeho pohybu rozkymácena. Algoritmická část systému pracuje s přesností na hranici srovnatelné s velikostí rozmazání objektu vlivem samotného pohybu na pásu, takže i z tohoto důvodu je ze zkušenosti nevyhnutelně nutné lokalizovat přesně oblasti kontroly.

### 5.1 LOKALIZACE OBLASTI KONTROLY HRDLA

U snímku hrdla, kdy je láhev vedena pásy za její spodní okraj, se projevuje častý náklon láhve v pásech a tím větší skutečný posun oblasti hrdla v rámci snímku oproti přednastavené smyčce.

Přesné určení polohy oblasti hrdla na snímku je provedeno na základě detekce světlého reflexního proužku, který se vyskytuje u všech snímků hrdla symetricky kolem jeho středu. Obrázek 5.1 přehledně ukazuje pracovní pásma lokalizace a nalezenou přesnou polohu hrdla.

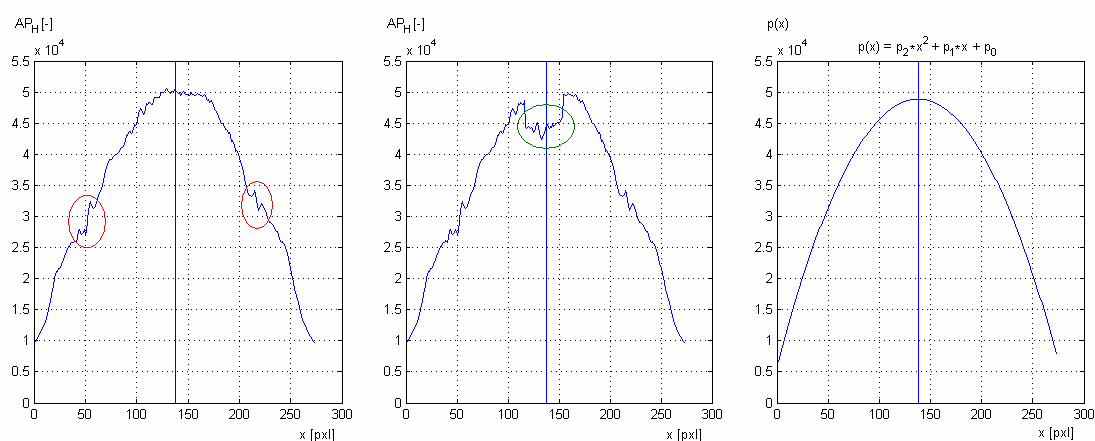


**Obr. 5.1.:** Detekce polohy hrdla bez závitu (vlevo) a se závitem (vpravo)

Z nalezených okrajových hodnot světlého pruhu je vypočítán geometrický střed hrdla. Hodnoty konců trasovacích čar, které se výrazným způsobem liší od mediánu souboru, jsou při výpočtu středu hrdla ignorovány. Podmínkou pro správnou lokalizaci hrdla výše uvedeným postupem je dostatečně silné zábleskové světlo a správně nastavené zesílení a offset kamery, aby byl světlý pruh hrdla dostatečně kontrastní.

## 5.2 LOKALIZACE OBLASTI KONTROLY DNA

Nalezení polohy dna na snímku je možné realizovat mimo jiné i pomocí tzv. amplitudové projekce v horizontálním resp. vertikálním směru. Jedná se o prostý součet jasů pixelů po sloupcích resp. řádcích obrazu. Vzhledem k výskytu vad na dně, zejména velmi tmavých, jsou hodnoty vektorů amplitudové projekce těmito vadami zkresleny a způsobují lokální minima v jejím průběhu a to samozřejmě i v okolí globálního maxima (viz obrázek 5.2 uprostřed, vliv vady je vyznačen zelenou elipsou). Průběh projekce ale není zcela hladký ani v případě dna bez vady (šum, drobné nepravidelnosti skla, nápisy apod.) jak je ukázáno na obrázku 5.2 vlevo. Navíc oblast bezprostředně kolem maxima je zpravidla plochá, čili přímá detekce indexu maxima by byla zatížena velkou systematickou chybou. Přesná lokalizace polohy dna na základě detekce jeho okrajů přímo z hodnot amplitudové projekce také není možná, protože okraje dna způsobují v jejím průběhu jen velmi slabé zázneje (viz obrázek 5.2 vlevo, vyznačeno červenou barvou), které mohou být



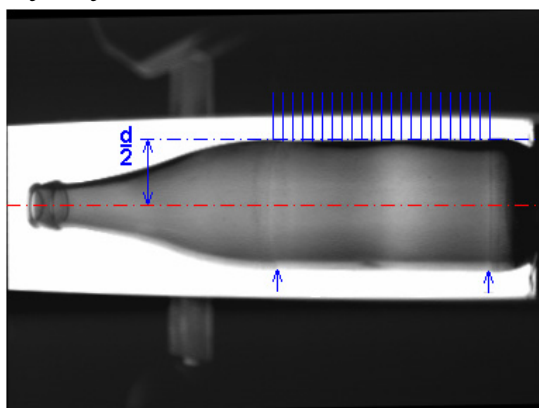
navíc zcela potlačeny nebo naopak zcela nahrazeny potenciální vadou v jiném místě.

**Obr. 5.2.:** Průběh amplitudové projekce snímku dna bez vady, s vadou a aproximace

Řešením přesné lokalizace oblasti dna je polynomiální aproximace průběhů horizontální a vertikální projekce, protože polohu středu dna lze pak hledat jako globální maximum získané aproximační funkce, která je hladká, spojitá a hlavně je znám její analytický předpis. Na obrázku 5.2 vpravo je průběh takové aproximační funkce druhého řádu s vyznačeným maximem pro horizontální amplitudovou projekci (sčítání v řádcích). Vyznačené maximum odpovídá vertikální poloze středu hledané kružnice. Stejným způsobem je nalezena druhá, čili horizontální souřadnice středu dna.

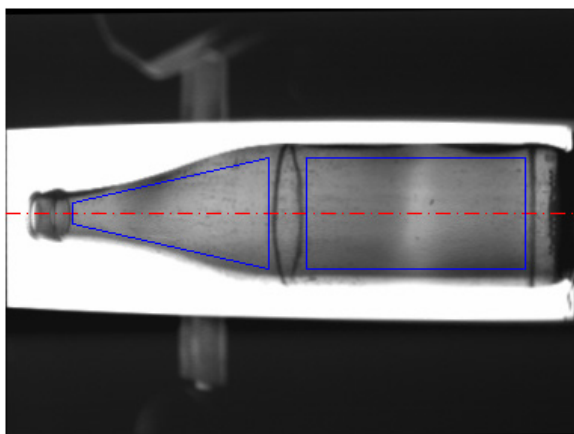
### 5.3 LOKALIZACE OBLASTI KONTROLY STĚNY

Obdobně jako u lokalizace polohy středu hrdla, je i při lokalizaci polohy stěny láhve na snímku využita detekce gradientů a to na rozhraní matnice tvořící optické pozadí snímané scény a konkrétní láhve. Vzhledem k tomu, že osa kamery a normála matnice zdroje světla spolu svírají úhel  $30^\circ$  (viz obrázek 4.4), je na snímcích vždy jedna hrana láhve vlivem odrazu světla kontrastnější, než hrana na straně opačné. Z tohoto důvodu je detekována vždy jen kontrastnější hrana a poloha osy láhve je dopočítána ze známé šířky láhve v milimetrech pro daný typ a z kalibrační konstanty pxl/mm. Na následujícím obrázku 5.3 je ukázána detekce okraje a stanovení polohy osy láhve.



Obr. 5.3.: Lokalizace polohy stěny láhve na snímku

Ve spodní polovině láhve s rovným profilem (jehož se využívá při lokalizaci polohy láhve na snímku) je drobné profilové zúžení o velikosti několika málo desetin milimetru. Na obrázku 5.3 je oblast zúžení mezi modrými šipkami. Za těmito okraji pak vlivem dotyku lahví vznikají odřené oblasti, ve kterých inspekce čistoty neprobíhá, a proto algoritmy stěn pracují ve dvou oddělených smyčkách ve spodní a horní části láhve jak ukazuje obrázek 5.4.



Obr. 5.4.: Oblasti kontroly na stěně láhve

Lokalizace osy láhve na základě nalezení kontrastního přechodu hrany stěny a matnice je ztížena přítomností okolních lahví. V některých případech dochází až



k částečnému zákrytu lahví, kdy nelze přesnou polohu láhve výše uvedeným postupem stanovit. V takových případech se přesná poloha láhve stanoví na základě detekce hrany láhve v její horní polovině.

## 6 FILTRACE ZNÁMÝCH VZORŮ

Na snímcích dna lahví se v některých případech uvnitř smyček podléhajících kontrole objevují vzory, které nejsou specifikovány jako vada, ale mají z hlediska zpracování obrazu obdobné nebo dokonce stejné charakteristiky. Příkladem mohou být různé profilové změny skla, hrany materiálu apod., ale hlavně nápisy a různá loga výrobce, které na obraze vytvářejí nehomogenity stejně jako skutečné vady. Tyto vzory je nutné na základě vhodných charakteristik ze snímku filtrovat dříve, než je tento postoupen dál k extrakci příznaků vad, na jejichž základě je láhev hodnocena.

Pro sestavení mechanismu k vyřazení vzorů z oblasti dna je třeba pro každou instanci vizuálního systému (jeden fyzický stroj) sestavit seznam těchto vzorů ve smyslu abecedy. Takový výčet vzorů např. provozu v Ruském Kirově je uveden na obrázku 6.1.



Obr. 6.1.: Abeceda obrazových vzorů v provozu Kirov

Vzhledem k tomu, že na snímku není předem známa poloha, orientace, velikost ani přibližné jasové rozložení úrovní hledaných vzorů, je nutné pro jejich detekci použít generickou metodu hledání vzoru v obraze. K tomuto účelu je většinou určena metoda srovnávání se vzorem pomocí korelace, která je ale, jakožto triviální řešení, velmi výpočetně náročná. Pro danou aplikaci je tato vzhledem k velikosti snímku a požadované přesnosti nepoužitelná byť jen pro jeden jediný hledaný vzor.

Vady se mohou z hlediska geometrických a fotometrických (radiometrických) vlastností vyskytnout na snímku v mnoha nepředpokladatelných variacích. Pro popis segmentovaných vzorů pak nelze použít klasické charakteristiky popisu jako velikost, Euler-Poincarého charakteristika, projekce, délka hranice, výstřednost, podlouhlost, pravoúhlost či nekompaktnost. Pokud nelze uvažovat ani tyto charakteristiky ani zmíněný časově velmi náročný výpočet korelací všech možných velikostí a natočení korelační předlohy, stává se nastíněná filtrace vzorů velmi komplikovanou obecně nevyřešenou úlohou. Jednou ale nikoliv jedinou možností se jako popisných charakteristik vzorů ukazuje použití momentových invariantů.

Momentové invarianty vycházejí z algebraických momentů a popisují základní geometrické charakteristiky obrazového segmentu jako statistické veličiny. S výhodou lze využít jejich rotační nezávislosti, na druhou stranu však neobsahují informace o prostorovém rozložení pixelů. Momentové invarianty mohou být

geometrické resp. komplexní podle toho, zda se odvozují od geometrických resp. komplexních momentů

## 6.1 KOMPLEXNÍ MOMENTOVÉ INVARIANTY

Komplexní momentové invarianty jsou diskriminačními popisnými charakteristikami vzorů stejně jako invarianty geometrické. Obě uvedené třídy momentových invariantů jsou v literatuře uváděny společně, protože sdílí matematický formalismus a formálně se shodují, přestože samy o sobě představují zcela odlišné charakteristiky popisovaného objektu. Bez ohledu na tento fakt jsou komplexní momentové invarianty vhodné jako reprezentativní charakteristiky pro rozpoznávání vzoru.

Komplexní momentové invarianty řeší nezávislost i kompletnost báze invariantů a vztah pro výpočet komplexního momentu  $c_{pq}$  řádu  $p+q$  má následující tvar.

$$c_{pq} = \sum_Y \sum_X (x + iy)^p \cdot (x - iy)^q \cdot s(x, y).$$

Absolutní hodnoty komplexních momentů jsou na rotaci obrazového segmentu nezávislé pro libovolné hodnoty  $p$  a  $q$  a na rotaci obrazu je závislá pouze jejich fáze. Na druhou stranu je nutné podotknout, že pomocí pouze těchto absolutních hodnot nelze vytvořit sadu komplexních momentových invariantů z hlediska kompletnosti, přestože jsou v mnohé literatuře jako invarianty použity právě samotné absolutní hodnoty komplexních momentů a fáze jsou vynechány.

Využitím invariantů druhého, třetího a čtvrtého řádů je pro úlohu rozpoznávání k dispozici celkem 11 invariantů tvořících bázi. V aplikaci rozpoznávání syntetických vzorů na dně láhve se využívají první dva, jejichž tvary uvádí následující vzorce.

$$\begin{aligned} \psi_1 &= c_{11} \cdot \\ \psi_2 &= \text{Re}\{c_{20} \cdot c_{12}^2\} \end{aligned}$$

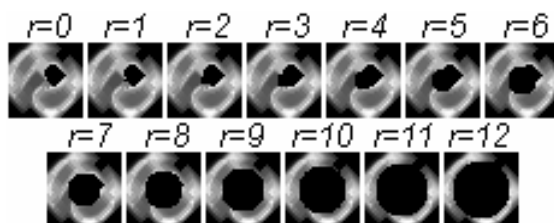
## 6.2 FUNKCE KOMPLEXNÍCH INVARIANTŮ

Bez ohledu na to, zda se jedná o geometrické nebo komplexní momentové invarianty, je každý vzor popsán několika málo číselnými charakteristikami. V případě použití pouze dvou prvních geometrických invariantů  $\phi_1$  a  $\phi_2$  resp. komplexních  $\psi_1$  a  $\psi_2$  z důvodu nižší citlivosti jejich hodnot na šum (nižší energetický vliv vzdálených pixelů), je každý vzor popsán pouze dvěma čísly a tedy jedním bodem ve dvourozměrném příznakovém prostoru.

Na základě konkrétních hodnot invariantů je snadné odhadnout, že takový systém uzavřený do numericky omezeného dvourozměrného prostoru nemůže mít vysokou diskriminační schopnost pro vyšší množství vzorů v abecedě a pro širokou třídu rozměrových a jasových variací. Tato třída je v případě uvedené úlohy rozpoznávání vzorů na skleněném materiálu téměř neomezená.

Alespoň částečnou informaci o tvaru objektu a prostorovém rozložení jeho pixelů lze získat zavedením tzv. funkcí momentových invariantů  $f_{\phi_i}$ . Jedná se o úmyslnou, předem přesně stanovenou degradaci vzoru, která způsobuje závislost hodnoty invariantu právě na stupni degradace. Nulová degradace pak odpovídá původní hodnotě invariantu. Je zřejmé, že chování těchto funkcí, čili jejich průběh se bude lišit i pro vzory, pro něž jsou hodnoty invariantů při nulové degradaci podobné a těžko rozlišitelné.

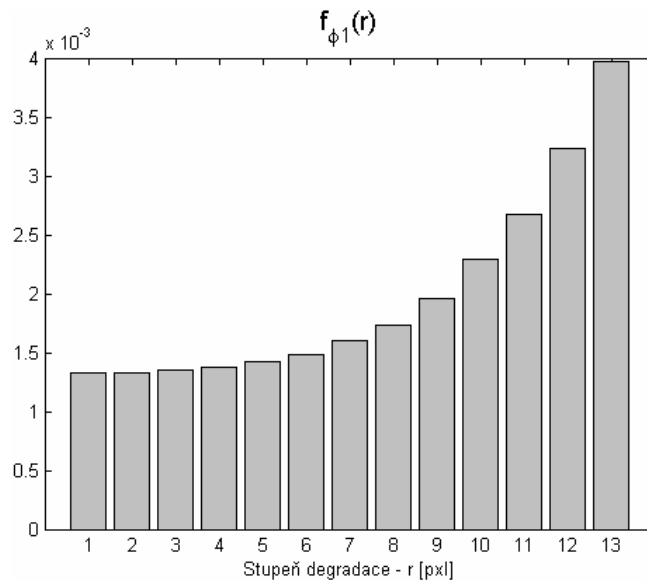
Pokud je uvažována degradace každého vzoru taková, která nuluje všechny jeho pixely uvnitř kružnice o poloměru  $r$  a se středem shodným s geometrickým středem vzoru, jsou obrazové segmenty pro výpočet funkcí invariantů takové, jak ukazuje obrázek 6.2.



**Obr. 6.2.:** Vstupní vzory výpočtu hodnot invariantů získané kruhovou degradací

Hodnota poloměru  $r$  udává míru degradace vzoru, přičemž na prvním místě je uveden vzor bez degradace, tedy pro nulové  $r$ . Pro zvolenou kruhovou degradaci má smysl zvyšovat parametr  $r$  pouze do určité mezní hodnoty, která je dána poloměrem kružnice opsané ke konkrétnímu vzoru. Dalším zvyšováním hodnoty parametru  $r$  zůstává funkční hodnota invariantu konstantní, a tedy nepřispívá ke zvýšení diskriminační schopnosti u daného vzoru. Může ale zvýšit diskriminační schopnost celého modelu a to pro podobné vzory lišící se právě až v hodnotách vzdálenějších pixelů.

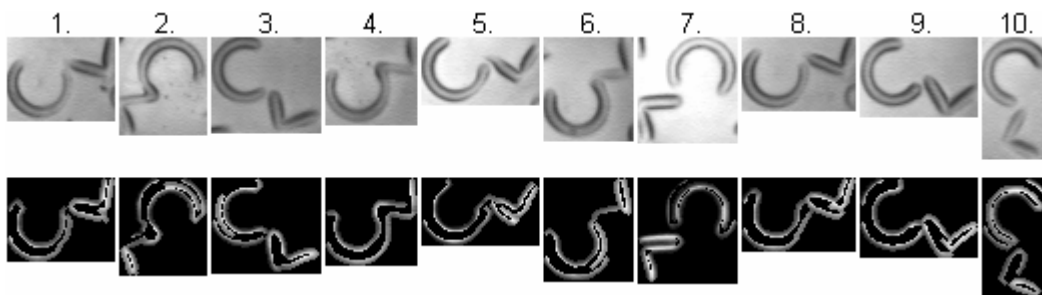
Následným výpočtem hodnoty příslušného momentového invariantu  $\psi_i$  pro každou realizaci degradovaného vzoru je získána funkce  $f_{\psi_i}(r)$ . Funkce  $f_{\psi_i}(r)$  je pro sadu realizací z předešlého obrázku uvedena na obrázku 6.3.



Obr. 6.3.: Průběh funkce invariantu pro segmenty na předchozím obrázku

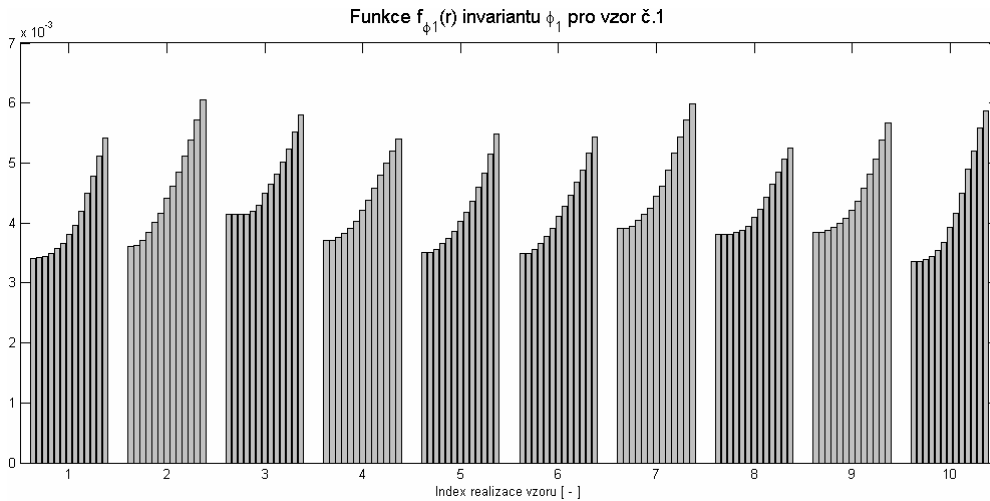
### 6.3 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ

Pro experimentální ověření kvality příznaků vytěžených z obrazových vzorů na dně láhve a reprezentovaných pomocí funkcí momentových invariantů byly vybrány dva nejčastěji se vyskytující vzory v provozu v ruském Kirově a to vzory č.1 a č.4 z obrázku 6.1. Deset náhodně vybraných realizací prvního z nich je uvedeno na obrázku 6.4.



Obr. 6.4.: Sada realizací vzoru č.4

V horním řádku jsou vždy originální obrazové segmenty, ve spodním pak segmenty vstupující do modulu výpočtu invariantů. Každému segmentu z obrázku přísluší jedna funkce invariantu  $\psi_1$  a jedna funkce invariantu  $\psi_2$ . Průběhy funkcí invariantu  $\psi_1$  pro všechny realizace vzoru z obrázku 6.4 jsou vyneseny v grafu na obrázku 6.5.

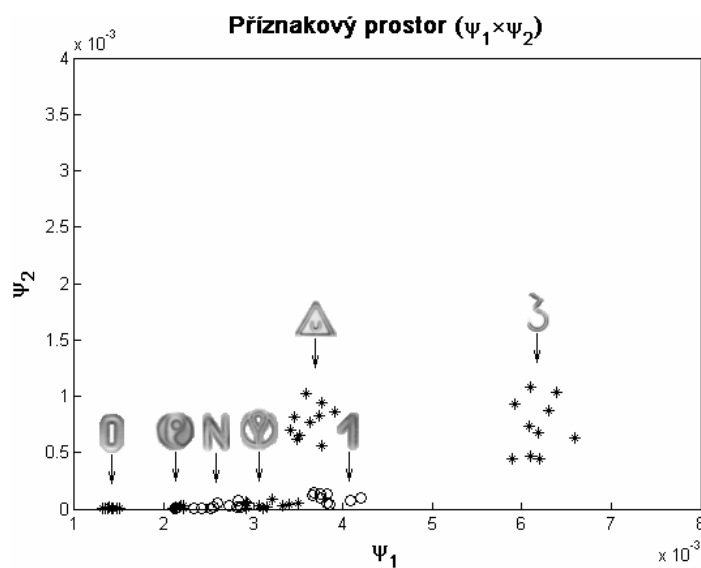


**Obr. 6.5.:** Průběhy funkcí invariantu v závislosti na hodnotě degradace

Příznakový vektor je pak sestaven z hodnot funkcí invariantů  $\psi_1$  a  $\psi_2$  a jejich 13 stupňů degradací včetně nedegradovaného originálního segmentu. Prvních 13 členů příznakového prostoru odpovídá hodnotám invariantu  $\psi_1$  a příslušným degradacím a druhých 13 členů pak invariantu  $\psi_2$  a jeho příslušným degradacím. Formálně je vektor příznaků  $X^k$  ( $k$ -té třídy) určen následujícím vztahem.

$$X^k = [\{\psi_1^{13}\}, \{\psi_2^{13}\}] = [\psi_1^0; \psi_1^1; \dots; \psi_1^{12}; \psi_2^0; \psi_2^1; \dots; \psi_2^{12}]$$

Vzhledem k tomu, že třetí a vyšší dimenze příznakového prostoru  $S_{26} \in \mathcal{R}^{26}$  jsou funkčním rozvojem prvních dvou dimenzí  $\psi_1$  a  $\psi_2$ , lze alespoň přibližné rozložení tříd vzoru z obrázku 6.1 interpretovat na základě příznakového prostoru  $S_2 \in \mathcal{R}^2$ . Jeho grafické vyjádření s uvedenými třídami všech vzorů z obrázku 6.2 je uvedeno na obrázku 6.6.



**Obr. 6.6.:** Klasifikační třídy známých vzorů v prostoru  $S_2$

Pro stanovení příslušnosti neznámého segmentu k některé z uvedených tříd vzorů lze u shlukového rozložení hodnot v příznakovém prostoru podle obrázku 6.5 (ve 26 rozměrném prostoru je situace obdobná, i když konvenčními metodami nezobrazitelná) využít klasifikátoru založeném na vyhodnocení absolutní vzdálenosti příznakového vektoru neznámého segmentu od příznakových vektorů reprezentantů všech sedmi tříd.

Postup verifikace navrženého modelu rozpoznávání vzorů byl v principu jednoduchý, avšak vzhledem k počtu použitých snímků časově náročný a pracný. Ověřovací procedura byla rozdělena na několik částí kontrolujících úspěšnost jednotlivých etap celého řetězce zpracování obrazu dna. První část je zaměřena na samotné nalezení oblasti dna, druhá na správnost segmentace nehomogenit, třetí na klasifikaci vad a konečně čtvrtá na klasifikaci vzorů. V následující tabulce 6.1 jsou uvedeny výsledky testů na snímcích vad.

**Tabulka 6.1.:** Úspěšnost algoritmů zpracování segmentů vad

<b>vady</b>	<b>nalezené oblasti dna</b>	<b>segmentování oblastí nehomogenit</b>	<b>klasifikováno správně (ze 140)</b>	<b>klasifikováno špatně (ze 140)</b>
N [-]	1262	992	132	8
p [%]	100.0 %	100.0 %	94,3%	5.7 %

Obdobným způsobem jako pro snímky s vadami byly testovány i snímky se vzory a výsledky jsou uvedeny v tabulce 6.2.

**Tabulka 6.2.:** Úspěšnost algoritmů zpracování segmentů vzorů

<b>vzory</b>	<b>počet vzorů na snímcích</b>	<b>počet segmentovaných vzorů</b>	<b>klasifikováno správně</b>	<b>klasifikováno špatně</b>
N [-]	313	313	287	35
p [%]	100.0 %	100.0 %	88.8 %	11.2 %

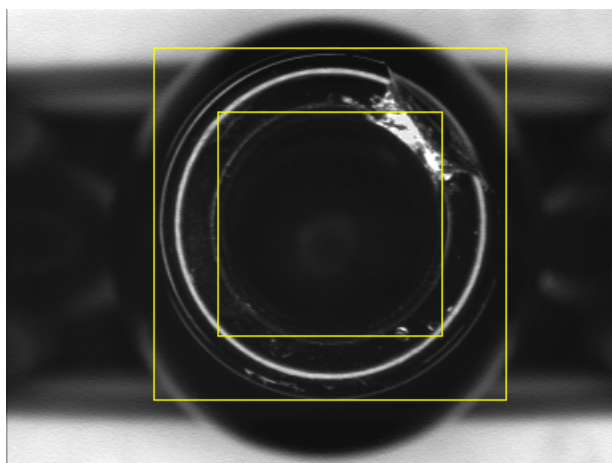
Zde bylo úspěšně klasifikováno 88,8 % segmentů vzorů. Tato nižší úspěšnost klasifikace je přitom pro reálný provoz daleko méně palčivá, než předchozí byť vyšší úspěšnost klasifikace vad 94,3 %. Jedná se o fakt, že na vyřazovací stůl vadných lahví je kromě skutečných vad zařazeno i několik lahví se vzory, které ale může obsluha vrátit zpět do produkce. Jinými slovy strategie kontroly v potravinářském průmyslu ctí zásadu lépe vyřadit podezření na vadu, než skutečnou vadu nerozpoznat.

## 7 EXTRAKCE A KLASIFIKACE PŘÍZNAKŮ

Pro všechny tři hlavní kontroly, tedy pro kontrolu hrdla, dna a stěny láhve platí, že příznaky vad jsou získávány na základě detekce nehomogenních oblastí. Je tedy využito gradientních operátorů aplikovaných na oblasti kontroly. Metody extrakce příznaků se pro dílčí kontroly liší, a proto jsou odděleně popsány ve třech následujících kapitolách.

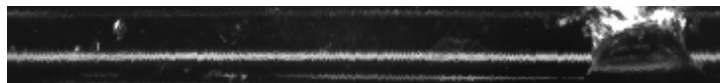
### 7.1 EXTRAKCE A KLASIFIKACE PŘÍZNAKŮ ZE SNÍMKU HRDLA

Na snímku hrdla se vlivem reflexního zábleskového osvětlení vyskytují světlé pruhy v tangenciálním směru. Jejich jasové úrovně nejsou bohužel jednotné ani v rámci jednoho provozu, čili detekce nehomogenit je prováděna pouze v tangenciálním směru a to v mezikruží určující oblast inspekce. Snímek hrdla s vadou a značenými smyčkami je uveden na obrázku 7.1.



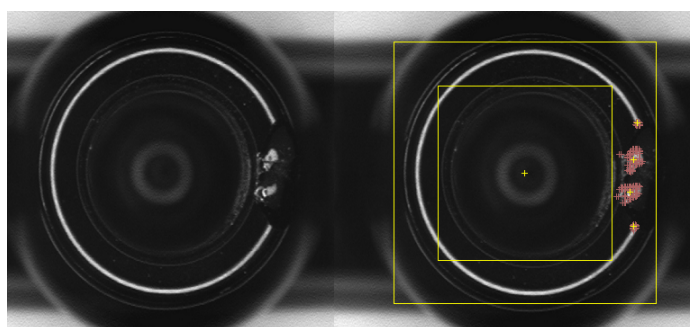
Obr. 7.1.: Smyčky určující oblast kontroly na snímku hrdla

Práce algoritmů v polárních souřadnicích je z výpočetního hlediska velmi časově náročná, proto je mezikruží hrdla odpovídající kontrolované oblasti transformováno na lineární obraz tak, jak ukazuje následující obrázek 7.2.



Obr. 7.2.: Lineární zpracování oblasti hrdla

Rozvinutý obraz (proužek) hrdla láhve je pak v horizontálním směru procházen gradientním operátorem a do bitové mapy o velikosti odpovídající rozměrům proužku jsou uložena místa výrazných jasových změn. Těch se v okolí potenciálně přítomné vady vyskytuje vyšší počet a na následujícím obrázku 7.3 vpravo jsou tato místa vyznačena světle červenými křížky a jsou označována jako podezření.



**Obr. 7.3.:** Obrázek hrdla s defektem a nalezené příznaky

Uvedená podezření zpravidla vytvářejí shluky odpovídající svým rozsahem velikosti dané vady. Tato podezření jsou podrobena shlukové analýze, jejímž výstupem jsou již příznaky, které jsou na témže obrázku znázorněny žlutými křížky přibližně uprostřed shluků podezření. Každý příznak představuje z hlediska programové implementace strukturu obsahující informace pro následnou klasifikaci nehomogenit. Struktura obsahuje informace o poloze shluku vzhledem ke středu hrdla, informace o počtu podezření tvořící příslušný shluk a nakonec informace o jasových úrovních uvnitř shluku a v blízkém okolí.

Typy defektů na hrdle a jejich přesná specifikace je závislá na požadavcích konkrétního provozu a v následující tabulce 7.1 jsou uvedeny nejčastější vady a jejich popis.

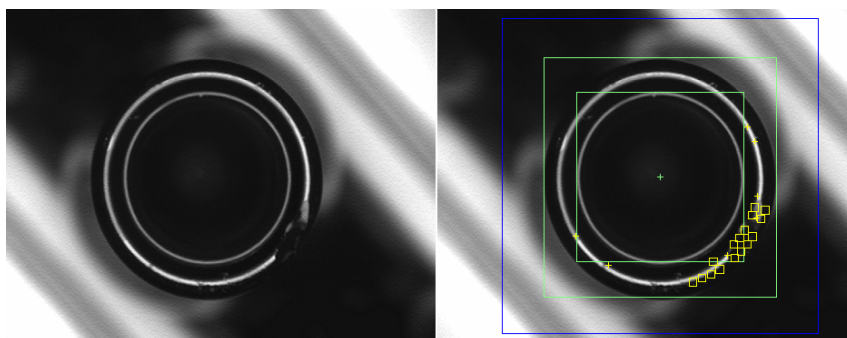
**Tabulka 7.1.:** Specifikace standardních defektů na hrdle láhve

Typ vady	Popis
Úlomek	Tmavá oblast zpravidla u vnějšího okraje hrdla, charakteristické přerušování světlých pruhů.
Výštipky	Nepřavidelné mezikruží světlého obvodu a tmavého vnitřku, výskyt kdekoli na hrdle.
Bílá vada	Zpravidla podpovrchové praskliny ve skle charakteristické vysokým jasnem, často v rámci světlých pruhů.
Odřené hrdlo	Vysoký počet drobných nehomogenit v celé kontrolované oblasti hrdla tmavých i světlých jasových hodnot.

První tři uvedené defekty jsou rozděleny do tříd na základě průměrné jasové hodnoty v kombinaci s rozměrem nehomogenity daným počtem podezření tvořících shluků. Příznakový prostor je tedy tří-rozměrný obsahující čtyři klasifikační třídy odpovídající „Úlomku“, „Výštipku“, „Bílé vadě“ a šumu, tedy nehomogenní oblasti o rozměrech nepřesahujících nastavenou mez. Speciální třídu defektů představuje vada „Odřené hrdlo“, která odpovídá vysokému počtu prostorově oddělených nehomogenních oblastí po celé ploše hrdla.

Na následujícím obrázku 7.4 je ukázána klasifikace příznaků na snímku hrdla s úlomkem na vnějším obvodu.

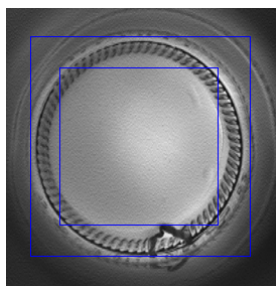




**Obr. 7.4.:** Klasifikace snímku hrdla s úlomkem

## 7.2 EXTRAKCE A KLASIFIKACE PŘÍZNAKŮ ZE SNÍMKU DNA

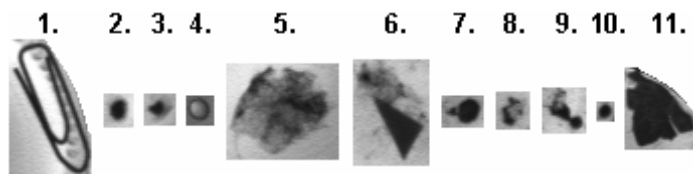
V případě snímku dna jsou pro kontrolu stanoveny dvě smyčky, z nichž jedna vymezuje oblast vnitřního dna a druhá navíc i oblast vroubků. Snímek dna s vadou a vyznačenými smyčkami je ukázán na obrázku 7.5.



**Obr. 7.5.:** Vymezení oblastí kontroly na snímku dna dvěma smyčkami

Vnitřní smyčka vymezuje oblast vnitřního dna, kde se mimo vad mohou vyskytovat také vzory zpracované podle kapitoly 6. Vnější smyčka určuje oblast dna, kde se vzory nevyskytují, zato se zde často vyskytují nehomogenní oblasti odpovídající vroubkům na vnější straně dna. V obou oblastech probíhá extrakce příznaků stejným způsobem a rozdíl nastává až při jejich klasifikaci, kdy jsou pro oblast vroubků zpravidla nastaveny benevolentnější parametry.

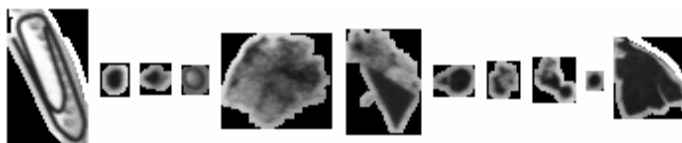
Obdobným segmentačním způsobem jako v případě filtrace vzorů na snímku dna pouze s jinými citlivostními parametry jsou i zde získány segmenty nehomogenit. Obrazové reprezentace několika vybraných vad jsou uvedeny na obrázku 7.6.



**Obr. 7.6.:** Segmentované oblasti vad ze snímku dna

Před samotnou extrakcí příznaků jsou tyto segmenty dále zpracovány pomocí sekvence Cannyho gradientním operátorem, filrací šumu a malých objektů, vyplněním uzavřených oblastí a kopírováním příslušných pixelů z originálního

segmentu do výstupního obrazu. Finální vstupní obrazy extraktoru příznaků pak mají podobu, jak uvádí obrázek 7.7.



**Obr. 7.7.:** Vstupní segmenty extraktoru příznaků snímků dna

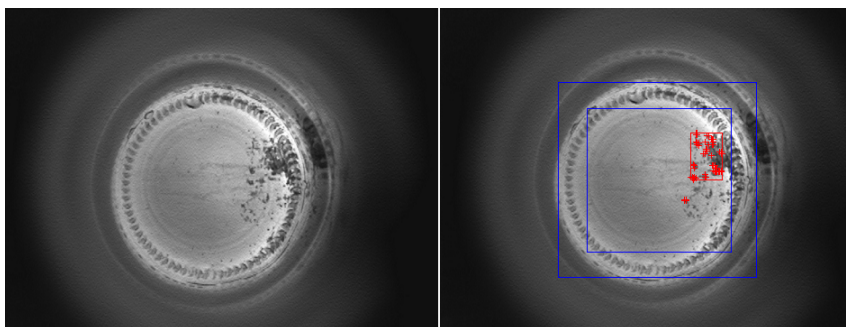
Na základě těchto uvedených obrazových segmentů jsou získány popisné charakteristiky nehomogenit a uloženy do datové struktury tvořící vstupní data následné klasifikace. Získané příznaky lze rozdělit na geometrické a radiometrické. Mezi geometrické příznaky patří celkový počet pixelů objektu a délka a šířka objektu vypočítána na základě hlavní a vedlejší osy objektu. Pro kruhové nebo čtvercové objekty jsou obě osy pochopitelně zaměnitelné. Mezi radiometrické příznaky byly po zkušenostech vybrány pouze základní dva a to průměrná jasová hodnota objektu a průměrná jasová hodnota jeho blízkého okolí.

Nehomogenity jsou klasifikovány na základě uvedených příznaků a pro kontrolu dna jsou klasifikovány tak, jak ukazuje tabulka 7.2.

**Tabulka 7.2.:** Specifikace standardních defektů na dně láhve

Oblast	Typ vady	Popis
vnitřní dno	tmavá vada	cizí předměty vhozené do láhve, špína, defekty skla, střepty skla
	světlá vada	
	fólie	fóliový obalový materiál, střepty skla
vnější dno (vroubky)	tmavá vada	cizí předměty vhozené do láhve, špína, defekty skla, střepty skla

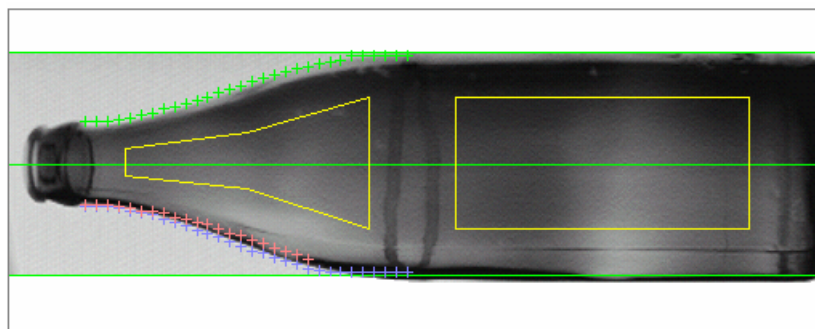
Oblast klasifikace je tedy rozdělena na vnitřní dno a oblast vroubků, kde jsou právě kvůli jejich přítomnosti zhoršené možnosti detekce nehomogenit. Na následujícím obrázku 7.8 je uvedena klasifikace na snímku dna s plísní na vnitřním dně.



**Obr. 7.8.:** Klasifikace snímku dna s plísní na vnitřním dně

### 7.3 EXTRAKCE A KLASIFIKACE PŘÍZNAKŮ ZE SNÍMKU STĚNY

Snímky stěny láhve jsou získávány celkem pomocí čtveřice kamer umístěných na dvou měřicích místech. Pro jednu každou láhev jsou tedy k dispozici čtyři snímky tvořící její kompletní obrazový popis. V každém měřicím místě je dvojice kamer označovaných jako levá a pravá. Snímky z těchto kamer se liší pouze kontrastnějším přechodem matnice-láhev, který je buďto na horní straně snímku nebo na spodní. Od tohoto přechodu je nalezena přesná oblast výskytu láhve na snímku a stanoveny smyčky jak ukazuje následující obrázek 7.9.

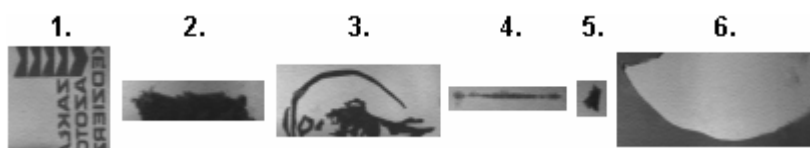


Obr. 7.9.: Lokalizace polohy stěny láhve a stanovení smyček kontroly

Oblast kontroly je na stěně rozdělena do dvou smyček, protože ve střední části se často vyskytují odřené pruhy od vzájemného kontaktu lahví na dopravníkovém pásu. Z hlediska extrakce i klasifikace příznaků jsou tyto dvě oblasti inspekce rovnocenné a jsou tedy použity i stejné metody.

Pro extrakci příznaků ze snímku stěny láhve jsou použity podobné postupy jako v případě dna. Rozdíl je pouze v nižší citlivosti gradientního operátoru ve svislém směru láhve, protože se na snímcích často vyskytují vertikální (z pohledu stojící láhve) svary skleněného materiálu. Na předchozím obrázku je takový svar viditelný ve spodní části láhve pod obdélníkovou smyčkou.

Příklady segmentovaných obrazových dat ve smyslu nehomogenit obdobně jako v případě dna jsou pro inspekci stěny láhve znázorněny na obrázku 7.10.



Obr. 7.10.: Segmentované oblasti vad ze snímku stěny

Postupem předzpracování principiálně stejným jako v případě snímku dna jsou získány obrazové segmenty jako vstupní obrazy extraktoru příznaků a uvedeny na obrázku 7.11.



Obr. 7.11.: Vstupní segmenty extraktoru příznaků snímků stěny

Klasifikace příznaků na stěně láhve probíhá obdobným způsobem jako v případě dna. Rozdíl je pouze v řídicí části klasifikátoru, která seskupuje výsledky ze všech čtyř snímků stěny jedné láhve a obou kontrolních smyček v rámci jednoho snímku. Nehomogenita klasifikovaná jako vada v libovolné smyčce na kterémkoliv ze čtyř snímků má za následek vyřazení příslušné láhve z plnicí linky na odstavný stůl. Specifikace standardních vad na snímku stěny láhve je uvedena v tabulce 7.3.

Tabulka 7.3.: Specifikace standardních defektů na stěně láhve

Typ vady	Popis
velká vada	zbytky etikety, špína, defekty skla, prasklá láhev
malá vada	
Fólie	fóliový obalový materiál

Rozdělení vad na malé a velké u kontroly stěny má stejný význam jako v případě dna na světlé a tmavé, čili získání vyššího stupně volnosti při adaptaci parametrů na daný provoz při zachování rozumné míry složitosti nastavení inspekčního systému.

Na následujícím obrázku 7.12 je uvedena ukázka okna měřicího režimu inspekčního systému instalovaného v provozu Jurajska (Polsko).

The screenshot shows a software interface for bottle inspection. At the top, it says 'Wizualny system do kontroli czystości butelek, © CAMEA spol. s r.o.'. Below this are navigation buttons for 'Pomiar', 'Widoki', and three camera views 'D1', 'D2', and 'D3'. The current view is 'Aktualny' with the user 'DebuggingUser'. The main area displays six camera feeds of bottles from different angles: 'Butelka 0.33l Gardło H 16:08:48', 'Butelka 0.33l Sciana-A2 T 16:07:30', 'Butelka 0.33l Sciana-A1 S 16:08:31', 'Butelka 0.33l Dno D 16:07:50', 'Butelka 0.33l Sciana-B1 U 16:08:19', and 'Butelka 0.33l Sciana-B2 V 16:08:19'. Below the feeds is a 'Statystyka' section with a timestamp '16:10:13'. The statistics table is as follows:

Zkontrolowano	11238					
Wyrzucono	176					
Uszkodzonych	Gardło	Dno	Ściana-A1	Ściana-A2	Ściana-B1	Ściana-B2
	59	61	34	35	21	36
Uszkodzonych	Ciecz 1	Ciecz 2	Ciemnia	Ciecz w f	Zawysoka	
	0	0	0	0	0	

At the bottom, there is a 'Powrót' button and a green bar indicating 'moc 25200 but./godz.'.

Obr. 7.12.: Měřicí režim inspekčního systému s kontrolou hrdla, dna i stěny láhve

## 8 ZÁVĚR

V předložené práci jsou diskutovány všechny důležité aspekty týkající se kamerové kontroly transparentních materiálů – lahví v potravinářských provozech. Pozornost byla z důvodů citelných požadavků z průmyslu zaměřena především na rozvíjející se východní trhy charakteristické nižší kvalitou kontrolovaných lahví a tím ztíženou situací při návrhu a implementaci inspekčního systému.

V úvodních kapitolách práce je objasněna terminologie oboru a nastíněn současný stav řešené problematiky. V kapitole 2 jsou stručně stanoveny hlavní požadavky na cíl práce v souladu s požadavky vyplývajícími ze strany průmyslových subjektů. Dále je již v kapitole 4 popsán konkrétní inspekční systém BTCAM612 vyvíjený ve spolupráci s vývojovou firmou CAMEA spol. s r.o. Zmíněny jsou jak základní principy činnosti celého systému tak i použitého hardware a metod pořízení snímků hrdla, dna a stěny láhve.

Od kapitoly 5 dále je již text práce věnován algoritmičké části systému. Nejprve je pozornost zaměřena na samotnou lokalizaci oblastí kontroly na snímcích hrdla, dna a stěny. Poté je v kapitole 6 navržen a verifikován postup filtrace umělých vzorů z oblasti kontroly na snímku dna pomocí funkcí komplexních invariantů. Značná část kapitoly je věnována praktickým zkouškám navrhovaných metod a také diskuzi použitelnosti a míry diskriminační schopnosti získaných příznaků pro rozlišení jednotlivých vzorů od třídy vad. Z tohoto pohledu jsou navržené metody rozpoznávání vzoru zobecnitelné na širší třídu aplikací.

Poslední kapitola 7 se věnuje extrakci příznaků a jejich klasifikaci. Tato část algoritmů je již na celé řadě inspekčních systémů implementována a předána do provozu. Z tohoto důvodu již tyto kapitoly neobsahují tak rozsáhlé testování správnosti navržených metod, protože všechny zmíněné stroje úspěšně pracují v průmyslu již řadu měsíců (v některých případech dokonce i let) a splňují požadavky kladené jednotlivými průmyslovými zadavateli.

Stanovené cíle byly v rámci práce splněny, zejména se pak jedná o úspěšně ověřený návrh metod pro rozpoznávání vzoru na transparentním materiálu. Navržená metoda využití komplexních invariantů na degradovaných segmentech je navíc zobecnitelná pro širší třídu aplikací a poskytuje tak podklady pro další realizace nejen inspekčních systémů.

Další stanovené cíle jak z hlediska hardwaru tak i softwaru jako např. návrh řešení kontroly stěn, technický rozvoj systému pořízení snímků včetně řízení expoziční doby u kontroly dna a stěny láhve nebo návrh a realizace algoritmů byly rovněž splněny a ověřeny přímo implementací na reálné stroje určené do provozů jak v rámci ČR (Samson, Hlinsko) tak i do provozů v cizině (Polsko, Rusko, Lotyšsko).

Z hlediska perspektivy pokračování práce je třeba říci, že zejména metodicky navržená filtrace vzorů na dně láhve spadá do kategorie vývoje algoritmů a pilotní implementace na zkušební stroj. Při filtraci vzorů lze také docílit nezávislosti získaných příznaků na obecné afinní transformaci, což by vedlo ke znatelnému posunu inspekčního systému vpřed. Tento plánovaný rozvoj je však otázkou spíše

komerční a je závislý na konkrétních požadavcích ze strany některého průmyslového zařízení.

Důležitým přínosem předložené práce je sestavení metodických podkladů pro vývoj a technický rozvoj vizuálních inspekčních systémů určených pro již dříve zmiňované specifické provozy s nižší kvalitou lahví nebo/a vyšším výskytem syntetických vzorů. Práce poskytuje rovněž ucelený pohled na postup řešení reálné aplikace metod počítačového vidění ověřený řadou funkčních inspekčních systémů.

## 9 LITERATURA

- [1] DUDA, R.O., HART, P.E. *Pattern Classification and Scene Analysis*. John Willey & Sons New York, 1982. 482 pages. ISBN 978-0471223610.
- [2] DUDA, R.O., HART, P.E., STORK, D.G. *Pattern Classification*. John Willey & Sons New York, 2001. 654 pages. ISBN 978-0471056690.
- [3] FLUSSER, J. *On the independence of rotation moment invariants*. The Journal of Pattern Recognition Society, vol. 33. Pergamon. 1999. ISSN 1405-1410.
- [4] FLUSSER, J. *On the inverse problem of rotation moment invariants*. The Journal of Pattern Recognition Society, vol. 35. Pergamon. 2002. ISSN 3015-3017.
- [5] FLUSSER, J., SUK, T. *Construction of Complete and Independent System of Rotation Moment Invariants*. Petrov & Westenber Editor, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2003.
- [6] HLAVÁČ, V., SEDLÁČEK, M. *Zpracování signálů a obrazů*. Vydavatelství ČVUT Praha, 2005. 255 stran. ISBN 80-01-03110-1.
- [7] HLAVÁČ, V., ŠONKA, M. *Počítačové vidění*. Grada, 1992. 272 stran. ISBN 80-85424-67-3.
- [8] HU, M.K. *Visual pattern recognition by moment invariants*. IRE Trans. Information. 1962, 179-187.
- [9] JÄHNE, B. *Digital Image Processing*. Springer. 2002. ISBN 3-540-67754-2.
- [10] JÄHNE, B., HAUBECKER, H. *Computer Vision and Applications, A Guide for Students and Practitioners*. Academic Press. 2000. ISBN 0-13-085198-1.
- [11] RUSS, C. *The Image Processing Handbook*. CRC Press, 1994. 674 pages. ISBN 0-8493-2516-1.
- [12] SCHLESINGER, M.I., HLAVÁČ, V. *Deset přednášek z teorie statistického a strukturního rozpoznávání*. Vydavatelství ČVUT Praha, 1999.
- [13] TEAGUE, M.R. *Image analysis via the general theory of moments*. Optical Society of America, JOSA Communications. 1980. 920-930.
- [14] VERNON, D. *Machine Vision, Automated Visual Inspection and Robot Vision*. Prentice Hall International Ltd., 1991. 259 pages. ISBN 0-13-543398-3.

## 10 PUBLIKACE

- [15] HORÁK, K., KALOVÁ, I. Applied methods for Transparent Materials Inspection In Proceedins of the CompIMAGE Symposium. Taylor&Francis Group, Computational Modelling of Object Represented in Images. Porto. 2007. ISBN 978-0-415-43349-5.

- [16] HORÁK, K., KALOVÁ, I., RICHTER, M. Řízení expozice kamerových systémů. Automatizácia a riadenie v teórii a praxi ARTEP 2007. Technická univerzita v Košiciach, 2007, s. 27-30. ISBN 978-80-8073-758-0.
- [17] HORÁK, K., KALOVÁ, I., RICHTER, M. Řízení expozice kamerových systémů. Acta Mechanica Slovaca, Košice. 2007. ISSN 1335-2393.
- [18] KALOVÁ, I., HORÁK, K. Vehicles Measuring and Classification In Proceedins of the CompIMAGE Symposium. Taylor&Francis Group, Computational Modelling of Object Represented in Images. Porto. 2007. ISBN 978-0-415-43349-5.
- [19] HORÁK, K., KALOVÁ, I. Řízení expoziční doby CCD kamery. Elektrovue, 2006, č. 2006/19, s. 1 - 8. ISSN 1213-1539.
- [20] HORÁK, K. Visual 3-D Reconstruction. In Proceedings of the 11th Conference Student EEICT. Brno, vol 2. 2005. Ing. Zdeněk Novotný CSc., 2005. s. 17-21. ISBN: 80-214-2889-9.
- [21] HORÁK, K. Three-dimensional objects model acquiring by Metod of active triangulation. Miskolc 5th International Konference of PhD Students. 2005. ISBN 963-661-673-6.
- [22] KALOVÁ, I., HORÁK, K. Optické metody měření 3D objektů. Elektrovue, 2005, č. 2005/23, s. 1-12. ISSN: 1213-1539.
- [23] HORÁK, K., PETYOVSÝ, P., RICHTER, M., KALOVÁ, I. Praktické programování v cpp. (elektronické texty)

## 11 CURRICULUM VITAE

Jméno: Ing. Karel Horák

Narozen: 1. 8. 1979 v Pardubicích

E-mail: [horakk@feec.vutbr.cz](mailto:horakk@feec.vutbr.cz)

Adresa: ÚAMT FEKT VUT v Brně, Kolejní 2906/4, Brno 612 00

GSM: +420 604 331 528

Telefon: +420 541 143 647

### Vzdělání

1995 – 1998 SPŠE Kounicova, Brno – slaboproudá elektrotechnika, specializace na lékařskou přístrojovou techniku.

1998 – 2004 FEKT VUT, Brno – magisterské studium oboru Kybernetika, automatizace a měření na Ústavu automatizace a měřicí techniky.

2004 – 2007 FEKT VUT, Brno – postgraduální studium oboru Kybernetika, automatizace a měření na Ústavu automatizace a měřicí techniky.

2007 – dosud FEKT VUT, Brno – akademický a vědecký pracovník Ústavu automatizace a měřicí techniky.

### Praxe

2002 – 2006 CAMEA, spol. s r.o. – technický pracovník vývoje vizuálních inspekčních a dopravních systémů.

### Další aktivity

2004 – dosud Člen Skupiny počítačového vidění na Ústavu automatizace a měřicí techniky FEKT VUT Brno.

2007 – dosud Výuka kurzů v oblasti počítačového vidění a zpracování obrazu na Ústavu automatizace a měřicí techniky FEKT VUT Brno.

## **12 ABSTRACT**

A lot of production lines contain camera inspection systems that increase quality of production. Therefore this presented work deals with applications of computer image processing methods in defectoscopy. Concretely the thesis is concerned with defects evaluation of glass bottles in food operations by the help of visual system BTCAM612, which is in existing configuration installed inland and in several foreign countries. The system is developed in conjunction with developer company CAMEA Ltd. from Brno and it is its sole ownership.

The whole process of bottles inspection is described in sequence. First of all it is the hardware acquisition of images of three main controlled parts of bottles – neck, bottom and side. Next chapters are concentrated on image processing and features classification. The features are obtained from image by methods based on detection of in-homogeneities on glass material. Essential part of work is focused on filtration of synthetic patterns from bottles bottoms using function of complex invariants. These patterns are occurred especially in many plants in eastern countries, where marketplace with inspection systems and generally with quality inspection of industrial lines is expanded lately.