

**Tento dokument je vytištěn jen v 75dpi kvalitě
z důvodu zmenšení velikosti (limit 5MB). V původní
kvalitě je umístěn v elektronické příloze.**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu Doktor (Ph.D.)

ve studijním oboru

KYBERNETIKA, AUTOMATIZACE A MĚŘENÍ

Ing. Peter Honec

SPOLEHLIVÉ SYSTÉMY ZPRACOVÁNÍ OBRAZU

Školitel:

Ing. Ilona Kalová, Ph.D.

Datum státní doktorské zkoušky:

Datum odevzdání práce:

Práce je k dispozici na Vědeckém oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně,
Údolní 53, Brno, 602 00

Poděkování

Děkuji především svým školitelům, Prof. Ing. Petru Vavřínovi, DrSc. a Ing. Iloně Kalové, Ph.D. za cenné rady a tematické vedení po dobu doktorského studia. Děkuji i všem fyzikům, optikům, konstruktérům a odborníkům nejrůznějších profesí, kteří mně a mým kolegům vždy ochotně poskytli cenné rady. Bez nich by tato práce nemohla vzniknout. Zvláštní poděkování si zaslouží Doc. Ing. Teodor Baláž Univerzita obrany Brno, RNDr. Milan Držík SAV Bratislava, RNDr. Lubomír Mach KVANT Bratislava, RNDr. Zbyněk Melich Optická dílna ČSAV Turnov, Ing. Karel Matějček KOMFI Lanškroun, RNDr. Pavel Pokorný Ústav přístrojové techniky AV Brno.

Dále děkuji společnosti Camea spol. s r.o. za umožnění práce na takto zajímavém tématu. Tato práce byla podporována Centrem aplikované kybernetiky, konkrétně projekty LN00B096 a 1M0567.

Abstrakt

V této disertační práci je na příkladech reálných zařízení podrobně ukázán postup návrhu spolehlivých průmyslových vizuálních systémů. Zvláštní pozornost je věnována systému pro detekci vad na pásích nekonečné výroby s využitím řádkových kamer. Systém umožňuje detekci a klasifikaci vad vznikajících ve fázi výroby v reálných podmínkách.

V rámci práce byl proveden teoretický rozbor vizuálního systému pro detekci vad na nekonečných pásích, vhodného osvětlení a uspořádání scény. Dále byly vybrány, přizpůsobeny a navrženy klíčové komponenty hardwaru. Po navržení a optimalizaci vhodných algoritmů byl prototyp systému nainstalován na výrobní linku netkaných textilií. Na základě tohoto prototypu vzniklo celkem osm vizuálních systémů nasazených do reálných podmínek v průmyslu.

Klíčová slova

Optické metody, detekce vad, klasifikace, řádková kamera, zpracování obrazu, robustní metody, digitalizační karta, neuronové sítě.

Abstract

The Doctoral thesis demonstrates the design of reliable industrial visual systems. The special emphasis is dedicated to the detection of defects on webs in industrial applications based on line-scan cameras. This system makes possible detection and classification of defects originating during the real production conditions. This work covers a theoretical study of a visual system for the defect detection on endless bands as well as of appropriate lighting and the scene arrangement. Further to that have been selected, adjusted and designed key components of hardware. Following the design and optimization of algorithms a system prototype had been installed on non-woven textiles production line. Eight visual systems implemented into real-life industrial conditions based on this prototype.

Keywords

Optical methods, defect detection, classification, line-scan camera, image processing, robust methods, image grabber, neural networks.

OBSAH

1 Úvod	5
1.1 Vizuální systémy v průmyslu	5
2 Přehled současného stavu problematiky	6
2.1 Koncepce zpracování obrazu	8
2.2 Příklady aplikací	10
2.2.1 Systém pro měření objemu a plochy kapek stříbrné lepící pasty	10
2.2.2 Multianody	17
2.2.3 Kontrola kvality svarů na discích automobilových kol	20
2.2.4 Kontrola brzdových čepů	24
2.2.5 Detekce a počítání osob v tunelu pražského metra	25
2.3 Aplikace s řádkovými kamerami.	28
3 Cíle disertační práce	31
4 Aplicační rozbor skenování materiálu řádkovými kamerami	32
4.1 Netkaná textilie	32
4.2 Požadavky na systém	33
4.3 Volba parametrů řádkové kamery	34
4.4 Návrh mechanicko-optického uspořádání	35
5 Popis řešení systému	38
5.1 Osvětlení	38
5.2 Řízení objektivů	39
5.3 Celkové uspořádání zařízení	42
5.4 Umístění systému do výrobní linky	43
6 Videosignál a jeho předzpracování	45
6.1 Vlastnosti obrazu	45
6.2 Eliminace vlivu modulace zdroje osvětlení síťovým napětím	46
6.3 Kalibrace systému na nerovnoměrné osvětlení	49
6.4 Ekvalizace jasových charakteristik obrazu	53
7 Detekce a klasifikace vad	57
7.1 Stanovení požadavků	57
7.2 Detekce vad	58
7.3 Shluková analýza	60
7.4 Klasifikace vad	62
7.5 Reprezentace nalezených vad a jejich další zpracování	63
7.6 Obecná koncepce systému	66
7.7 Optimalizace algoritmů	68
7.8 Implementace algoritmů	70

8 Závěr	71
8.1 Přínos práce a splnění cílů	71
8.2 Použití systému	73
8.3 Možnosti zdokonalení systému	73
9 Literatura	75
9.1 Seznam použité literatury	75
9.2 Seznam vlastních prací	76
10 Curriculum Vitae	77
Přílohy	78
10.1 Typické vady a jejich rozdělení dle klasifikace neuronovou sítí	79
10.2 Modul CanEF pro řízení objektivů	83
10.3 Reference Pegas Nonwovens, a.s. – netkané textilie	87
10.4 Reference AVX – Systém pro měření objemu a plochy kapek stříbrné lepící pasty – kapitola 2.2.1	88

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Snímek dvouřádkového rámečku s jednotlivými kapsami pro anody	10
Obr. 2.2 Snímek kapsy rámečku s nanesenou pastou	11
Obr. 2.3 Princip 2D triangulace – označení objektu vzorem.....	12
Obr. 2.4 Opticko mechanické uspořádání snímače objemu kapek	13
Obr. 2.5 Sestavená snímací hlava	14
Obr. 2.6 Snímek s promítnutým vzorem bez pasty a s nanesenou pastou	14
Obr. 2.7 Nalezené pruhy promítnutého vzoru a finální pruhy.....	15
Obr. 2.8 Šedotónová výšková mapa (přímý výstup z algoritmu).....	15
Obr. 2.9 Barevná výšková mapa a 3D drátový model vyhlazeného povrchu kapky.....	15
Obr. 2.10 Snímek nejmenšího (typ J180) a největšího (typ VM) rámečku.	16
Obr. 2.11 Snímky chybně nanesených kapek	17
Obr. 2.12 Snímek anody s napastovanou čtveřicí kapek stříbrné pasty.....	18
Obr. 2.13 Příklad vyhodnocení	19
Obr. 2.14 Snímek plechového disku	20
Obr. 2.15 Schéma laboratorního přípravku.....	21
Obr. 2.16 Snímek z kamery v televizním režimu – stacionární obraz laserového paprsku	21
Obr. 2.17 Princip pořízení obrazu s mnohonásobnou expozicí	22
Obr. 2.18 Výřez snímku s mnohonásobnou expozicí laserového paprsku	23
Obr. 2.19 Snímky kontrolovaných brzdových čepů.....	24
Obr. 2.20 Sada snímků čepu s odstupem 10° - první testy.....	24
Obr. 2.21 Výsledný 3-D drátový model povrchu čepu	25
Obr. 2.22 Snímek osvětlený infračerveným reflektorem	26
Obr. 2.23 Osoba nezachycená systémem.....	26
Obr. 2.24 Snímek s kontrastním vzorem na pozadí a tmavou osobou	27
Obr. 2.25 Snímek s kontrastním vzorem na pozadí a světlou osobou	27
Obr. 2.26 Zjednodušené schéma vizuálního systému s řádkovými kamerami	29
Obr. 4.1 Bikomponentní vlákno netkané textilie	33
Obr. 4.2 Výrobní linka netkaných textilií	33
Obr. 4.3 Předmětová a obrazová rovina.....	34
Obr. 4.4 Reflexní osvětlení - nákres	36
Obr. 4.5 Transmisní osvětlení - nákres	36
Obr. 4.6 Difúzní osvětlení - nákres.....	36
Obr. 4.7 Transmisní osvětlení – reálné snímky.	37
Obr. 4.8 Difúzní osvětlení – reálné snímky	37
Obr. 5.1 Pracovní nákres mechaniky osvětlení.....	39
Obr. 5.2 Inverzní inženýrství.	40
Obr. 5.3 Ukázka komunikace mezi tělem fotoaparátu a objektivem Canon-EF	41
Obr. 5.4 Kamera LINE531 s objektivem a modulem CanEF	41
Obr. 5.5 Koncepce systému	43
Obr. 5.6 Fotografie systému instalovaného na výrobní lince netkaných textilií	44
Obr. 6.1 Obraz před a po kompenzaci zvlnění.....	49
Obr. 6.2 Snímek před a po kompenzaci na nerovnoměrné osvětlení.....	51
Obr. 6.3 Obraz před a po kompenzaci na zvlnění a na nerovnost osvětlení	52
Obr. 6.4 Obraz (detail cca 250 mm x 200 mm) před a po kompenzaci	53
Obr. 6.5 Histogram jasových hodnot obrazu netkané textilie.....	54
Obr. 6.6 Postup ekvalizace obrazu při gramáži 50g/m ²	55
Obr. 6.7 Postup ekvalizace obrazu.....	56
Obr. 6.8 Snímek netkané textilie s gramáží 50g/m ² a 12g/m ²	56
Obr. 7.1 Hodnoty prahů pro detekci vad.....	58
Obr. 7.2 Horizontální a vertikální řez obrazu vady.....	59

Obr. 7.3 Hodnoty prahů pro hledání vad – zobrazeno v jasovém řezu.....	60
Obr. 7.4 Struktura dopředné perceptronové neuronové sítě použité pro klasifikaci vad.....	62
Obr. 7.5 Stránka se seznamem nalezených vad	64
Obr. 7.6 Stránka s grafickým zobrazením nalezených vad klasifikovaných do tříd	65
Obr. 7.7 Příklad grafického rozložení opakujících se vad	65
Obr. 7.8 Symbolické znázornění rozložení vad do jednotlivých rolí.....	66
Obr. 7.9 Navržená a realizovaná koncepce systému z pohledu obecnosti řešení	67
Obr. 7.10 Ukázka nejvnitřnější smyčky algoritmů	70
Tab. 7.11 Vytížení procesoru s běžícími algoritmy	70
Tab. 10.1 Seznam a stručný popis hlavních příkazů modulu CanEF	84
Obr. 10.2 Elektrické schéma navrženého modulu CanEF	84
Obr. 10.3 Komunikace mezi modulem CanEF a objektivem	85
Obr. 10.4 Plošný spoj modulu CanEF	85
Obr. 10.5 Část technické dokumentace mechaniky modulu CanEF	86

1 Úvod

1.1 Vizuální systémy v průmyslu

Použití kamery jako zdroje informace v nejrůznějších aplikacích je v dnešní době běžné. Spojením kamery s digitizérem obrazu a výpočetní jednotkou zpracovávající obraz vznikne systém počítačového vidění – vizuální systém. Mnoho veličin původně neměřitelných kamerou může být účelně převedeno na úlohu zpracování obrazu vhodným nastavením scény, osvětlení, systému snímání a jiných parametrů ovlivňujících optickou scénu. Systémy počítačového vidění potom umožňují kontrolu prakticky jakéhokoliv parametru, který má nebo může mít vazbu na vzhled či charakter snímané scény – tvaru, rozměru, polohy, objemu, plochy, rychlosti, barvy, detekce objektu s jeho následnou klasifikací atd. Z obrazových dat lze ve většině případů a při vhodném nastavení snímané scény extrahovat mnohem větší množství relevantních informací než z dat pořízených jednoduchými senzory.

Cílem vizuálních systémů v průmyslu je zastoupit funkci měřícího členu regulační smyčky a často i samotného regulátoru. Vizuální systémy musí být koncipovány tak, aby byly schopny plnit svou funkci při běžném provozním stavu a tím pádem aby svým provozem neomezovaly chod výrobního či jiného zařízení. Při použití takových systémů v mnoha odvětvích průmyslu je potom kladen důraz hlavně na přesnost měření, rychlost, cenu, spolehlivost, provozní náklady a náročnost údržby.

Naměřené údaje z průmyslových vizuálních systémů mohou sloužit jako data pro on-line regulaci výrobního procesu nebo jen jako data pro výstupní kontrolu tam, kde není možný okamžitý zásah do výrobního procesu.

Důležitou kapitolou v oblasti vizuálních systémů se stává sledování kontinuální (nekonečné) výroby. Tímto způsobem je vyráběno velké množství průmyslových materiálů a polotovarů, například papír, tkané i netkané textilie, tažené plasty, válcované plechy, obalové materiály, různé technické i potravinářské fólie a jiné. Vizuální systém pro tato měření je v mnohém velmi odlišný od většiny systémů v průmyslu. Je to dáno charakterem snímané scény – zpravidla velmi rychle se pohybující nepřetržitý pás vyráběného materiálu široký až několik metrů. Požadavek detekce vad s malými rozměry vede na konstrukci vizuálních systémů, jejichž technické parametry (rychlost snímání a vyhodnocení obrazu, rychlost reakce systému) jsou na hranici technických možností a ekonomické únosnosti. Nároky na provozní vlastnosti systému, jako je bezporuchový provoz, jednoduchost obsluhy, spolehlivá detekce a klasifikace morfologicky různorodých vad, zůstávají.

2 Přehled současného stavu problematiky

V přehledu stavu problematiky se omezím jen na oblast, se kterou mám praktické zkušenosti. Na příkladech projektů, na jejichž řešení jsem se přímo podílel, budou ukázány některé problémy, se kterými se mohou setkat řešitelé reálných úloh. Na všech těchto úlohách je patrná snaha o dosažení co nejlepších užitečných vlastností vyvíjených zařízení. Bude ukázáno, že tohoto cíle lze dosáhnout jen komplexním řešením navzájem souvisejících úloh, počínaje formulací problému a konče návrhem konstrukčního řešení a vlastní realizací. Doufám, že tyto ukázky budou inspirací případným řešitelům podobných projektů.

Uvedené příklady jsem se snažil popsat tak, aby vynikl jejich společný rys. Pro jejich úspěšné zvládnutí až do realizačního výstupu nestačilo pouze se věnovat izolovanému problému, například návrhu byt' velmi robustního algoritmu zpracování obrazových dat. Samotné algoritmy tvoří jen část funkčního celku. Proto je nutné k takovým úlohám vždy přistupovat komplexně, každá část řešení zpravidla souvisí s ostatními částmi celku. Pro takový pohled na problém je nutné mít širší rozhled a pochopit souvislosti nesoucí se napříč celou cestou zpracování dat - od fyzikální podstaty měřené veličiny, metody snímání dat (obrazu), přes algoritmy zpracování obrazu až po vhodnou reprezentaci výsledků měření. Nelze zanedbat ani konstrukční stránku věci – systém musí být vyrobitelný a servisovatelný. Mnohdy je také nutné znát i další vazby s průmyslovou výrobou nebo jiným odvětvím. To je hlavním rozdílem oproti řešení teoretických nebo akademických úloh, kdy je problém často vytržen z reality a je řešen v izolaci.

Prakticky ve všech technických aplikacích se dnes používají kamery s polovodičovými obrazovými senzory. Používají se dvě technologie - CMOS a CCD [3], [4]. Vlastnosti těchto snímačů jsou dostatečně známé a jsou podrobně zveřejněny v katalogových listech na stránkách výrobců (SONY, KODAK, MICRON, FAIRCHILD, TOSHIBA...).

Technologie CMOS dominuje v levných aplikacích, kde příliš nezáleží na citlivosti. V důsledku převodu latentního obrazu na klasický analogový nebo digitální obrazový signál a řízení expozice metodou šterbinové závěrky se nehodí pro aplikace, ve kterých se snímají objekty s velkou úhlovou rychlostí nebo kde je nutné kameru synchronizovat s vnějšími událostmi.

CCD snímače nemají tyto nevýhody, ale za vyšší kvalitu obrazu platí nižším stupněm dosažitelné integrace. Neobsahují A/D převodník, všechny (u plošných snímačů dost komplikované) signály se generují vnějšími obvody. Z hlediska aplikací, které budu popisovat, je to výhoda. Mít pod kontrolou časování CCD snímače na nejnižší úrovni poskytuje možnost použít jej v množství nestandardních režimů, záleží jen na fantazii a odvaze uživatele [17]. Takovéto kamery vyrábí firma CAMEA (www.camea.cz) od r. 1998, nově začala nabízet kamery s podobnými možnostmi firma

PULNIX (www.jaipulnix.com). Uvedené se týká hlavně řízení plošných CCD snímačů, řádkové mají jednodušší řízení a neposkytují takové množství kombinací časování řídících signálů. Jaké výhody poskytuje možnost řízení časování CCD snímače na nejnižší úrovni bude ukázáno například v kapitole 2.2.3.

Při výběru vhodné kamery pro průmyslovou aplikaci je nutné rozhodovat hlavně podle použitého senzoru – od něj se potom odvíjí většina technických parametrů kamery (rozlišení, citlivost, rychlost). Velmi důležitým parametrem je také výstupní rozhraní kamery. Základní rozdělení výstupních rozhraní je na analogové a digitální (Camera-Link, USB, FireWire, ethernet...).

Analogové rozhraní – je nejpoužívanější u CCTV systémů, zabezpečovacích a monitorovacích zařízení. Jeho podstatou je analogový signál, tzv. kompozitní směr, která obsahuje jednotlivé řádky obrazu a synchronizační směr (horizontální a vertikální synchronizační pulzy). Nejčastějším přenosovým médiem je koaxiální kabel (desítky metrů), kroucená dvoulinka (s linkovými vysílači a přijímači až stovky metrů) a optický kabel (pomocí optických převodníků až kilometry). Náklady na přenosovou trasu jsou tak minimální. Při použití analogového rozhraní se musí počítat s nutností digitalizace na straně výpočetní jednotky. Samotná koncepce kamery potom může být velmi jednoduchá.

Camera-Link – je jednoúčelové rychlé rozhraní vyvinuté přímo pro kamery a obrazové digitizéry. Fyzická vrstva je založena na LVDS (Low-voltage-differential-signaling). V praxi je využíváno hlavně pro nejnáročnější aplikace, hlavními nevýhodami jsou cena a maximální délka kabelu 10 metrů.

USB (Universal-Serial-Bus) – je sériová sběrnice pro připojení periférií. Verze USB 2.0 umožňuje díky teoretické rychlosti až 480 Mbit/s připojit zařízení náročnější na datový přenos, jako jsou právě kamery. Maximální délka kabelu bez opakovací je 5 metrů. Velkou nevýhodou je konstrukce řadiče, který není vybaven podporou DMA přenosu – data musí přejít přes procesor počítače, čímž roste jeho vyžití.

FireWire – rychlá sériová linka vyvinutá firmou Apple a později převzata jako standard pro komunikaci periferních zařízení (fotoaparáty, kamery, datová úložiště...). Díky konstrukci řadiče, který podporuje DMA přenos dat, je vhodnější než USB. Teoretická rychlost je 400 Mbit/s (1394a) nebo 800 Mbit/s (1394b). Maximální délka kabelu bez opakovací je 4,5 m.

Gigabitový ethernet – je dnes již standardem, který svými vlastnostmi v mnohém předčí ostatní digitální rozhraní. Díky masivnímu nasazení v oblasti lokálních sítí jej výrobci zařadili i do portfolia různých zařízení – kamery, tiskárny, síťová úložiště. Museli se však přizpůsobit trendu a nevyužívat pouze fyzickou vrstvu, ale kvůli kompatibilitě s LAN sítěmi použít i standardy transportní a aplikační vrstvy. To činí relativně náročným návrh ethernetové kamery, protože je nutná velká režie pro obsluhu TCP/IP komunikace. Levnější a mnohdy dostačující variantou je komunikace UDP protokolem s jednodušší implementací. Samotný gigabitový ethernet s rychlostí 1000 Mbit/s je možné táhnout vhodným metalickým kabelem až do vzdálenosti 100 metrů.

Z digitálních rozhraní se v současné době jeví jako nejprogresivnější gigabitový ethernet. Pro kamery je toto rozhraní výhodné nejen kvůli příznivé ceně, ale také kvůli

možnosti začlenění takovýchto kamer do sítě, kdy jsou využity dnes již standardní výhody síťových řešení – jednoduchost vzdálené správy, monitoringu a nastavování parametrů.

2.1 Koncepce zpracování obrazu

Postup zpracování obrazu se dá rozdělit do několika kroků. Toto rozdělení však není striktně předepsáno, vždy záleží na konkrétním problému, charakteru scény a použitých metodách, hardwaru vizuálního systému, zvycích a zkušenostech řešitelů.

Základní kroky zpracování obrazu jsou :

- pořízení obrazu,
- digitalizace,
- předzpracování,
- detekce objektů nebo relevantních příznaků, popis obrazu, klasifikace.

Řešení projektu s vizuálním systémem je iterativní proces. Při tom nezáleží ani tak na tom, zda se jedná o návrh zcela nového stroje, jehož součástí je vizuální systém – takový stroj pro kontrolu lahví byl popsán např. v [18] – anebo se má tento implantovat do již hotového stroje. V druhém případě se úloha jen rozšíří o několik omezujících, zpravidla technologických podmínek.

Z mých zkušeností vyplývá, že nejdůležitější fází při řešení libovolného technického projektu je pořízení obrazu. Na tom, v jaké kvalitě, jakým způsobem a za jakých podmínek se sejme obraz bude záležet, jak dopadne řešený projekt. Největší pozornost (samozřejmě se znalostí možností metod zpracování obrazu) by se měla věnovat návrhu opticko-mechanického řešení úlohy, aby pokud možno odpadly, případně byly zjednodušeny operace spadající do fáze předzpracování, kdy je obraz transformován do podoby vhodné pro finální zpracování.

Bohužel se lze i u profesionálních systémů velmi často setkat s opačným přístupem. Prostě se to nějak udělá a pak se hledají metody, jak to napravit. Mohou při tom vzniknout metody, které se s úspěchem publikují, ale ve většině případů je výsledný systém nestabilní, nespolehlivý nebo nereprodukovatelný.

Detekce objektů nebo relevantních příznaků – je fáze, kdy jsou v obraze hledány atributy a příznaky, které souvisí s hledanými objekty, veličinami a zkoumanými vlastnostmi. Cílem těchto operací je nalezení zájmových objektů nebo příznaků v obraze a jejich další analytický popis - poloha objektu, velikost, tvar, statistické charakteristiky. Popis objektu a jeho příznaků je vždy volen v závislosti na charakteru obrazu.

Po fázi hledání příznaků přímo následuje proces klasifikace na základě nalezených příznaků. Spolehlivost tohoto procesu je v největší míře ovlivněna právě kvalitou a vhodnou volbou příznakového vektoru jakožto i vstupních dat pro klasifikaci. Proto metody pro získání příznakového vektoru jsou jedny z nejdůležitějších v celém řetězci

zpracování obrazu. Do procesu výběru příznaků by měl v největší míře zasahovat expert – vhodná volba je často podmíněna zkušenostmi, intuicí a znalostí širších souvislostí mezi charakterem obrazu a měřenou veličinou.

Prvky příznakového vektoru musí splňovat tyto tři základní kritéria :

- nezávislost – při změně jednoho příznaku není v podstatné míře změněna hodnota jiného příznaku
- spolehlivost – hodnota příznaku se nesmí významně lišit pro různé objekty spadající do stejné skupiny (třídy)
- diskriminabilita – hodnota příznaku se musí významně lišit pro objekty spadající do odlišných skupin (tříd)

Klasifikace – poslední fáze zpracování obrazu, kdy se na základě zjištěných příznaků obrazu klasifikuje a formuluje výsledek. Výsledky klasifikace jsou ovlivněny nejen kvalitou samotného klasifikátoru, ale také již zmiňovanou kvalitou příznakového vektoru.

Výstupem z klasifikátoru je zpravidla informace o klasifikační třídě spojená s doplňujícími informacemi (míra podobnosti, pravděpodobnost chybné klasifikace). Pro sestavení klasifikátoru neexistuje žádný obecný předpis, vždy je přihlíženo k formě vstupujícího příznakového vektoru, ke konkrétnímu účelu klasifikátoru a k nadefinovaným klasifikačním třídám. Obecná funkce klasifikátoru spočívá v přiřazení konkrétní klasifikační třídy k předloženému příznakovému vektoru. Existuje mnoho typů klasifikátorů z pohledu realizace – např. statistický klasifikátor, pravidlový, syntaktický, neuronový.

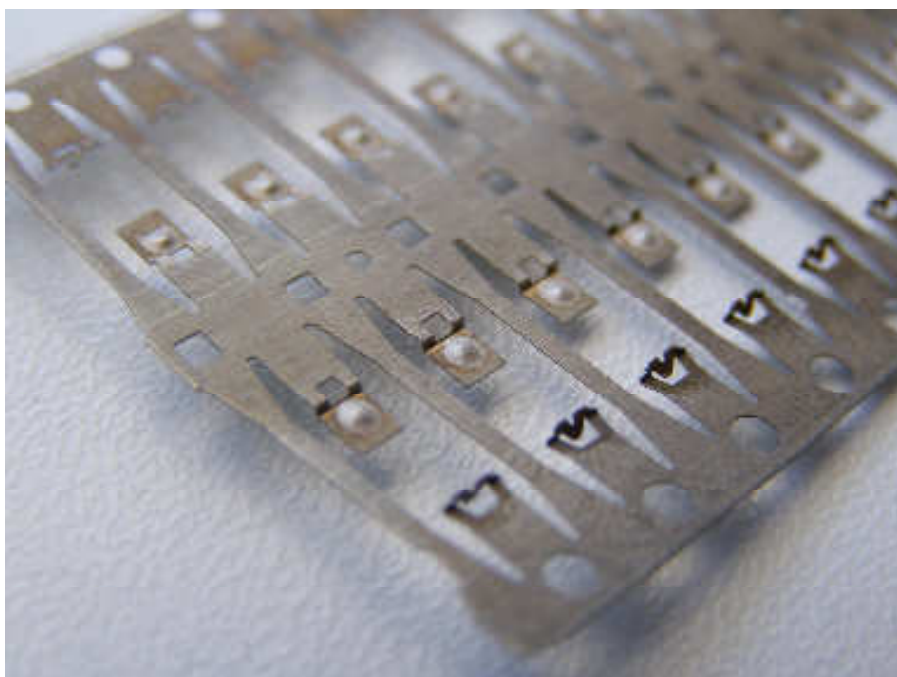
Celý proces zpracování obrazu je realizován kaskádou komponent a metod. Je-li jediný prvek procesu špatný, projeví se to zákonitě i na kvalitě výsledku.

Proces zpracování obrazu je vlastně snahou o zpětný analytický popis vybraných parametrů reálné scény s tím, že k dispozici je pouze obraz (projekce) této scény. I když v různých fázích zpracování obrazu dochází k degradacím v obraze (kvantování, šum, zkreslení, výpočetní chyby, aproximace...), největší degradace relevantních informací probíhá ve fázi pořízení obrazu – projekce reálné scény (která obsahuje maximum informací) do většinou 2D obrazové informace. V této fázi je ztraceno právě největší množství informací z reálné scény. Všechny další kroky potom směřují k více či méně kvalitní snaze tyto informace nějakým způsobem získat zpět a analyticky popsat. Proto nejdůležitější částí zpracování obrazu, na kterou by měly být kladeny největší nároky, je samotná fáze pořízení obrazu. Základem úspěchu není pouze správná volba kamery s dostatečnou rychlostí a dostatečným rozlišením, ale zejména princip snímání, osvětlení a vhodné využití jiných specifických vlastností scény v návaznosti na měřenou veličinu nebo zkoumanou vlastnost objektu. Tento přístup se pokusím názorně ukázat na příkladech mnou řešených projektů.

2.2 Příklady aplikací

2.2.1 Systém pro měření objemu a plochy kapek stříbrné lepící pasty

Tento systém byl navržen pro účely elektrotechnického průmyslu, konkrétně pro měření objemu a plochy stříbrných kapek lepidla nanesených na vodícím rámečku při výrobě tantalových SMD kondenzátorů. Každá anoda tantalového kondenzátoru je lepena pomocí viskózního elektrovedivého stříbrného tmelu, který musí být co nejpřesněji dávkován. Malý obsah tmelu způsobí vyšší sériový odpor budoucího kondenzátoru a zvýšené riziko delaminace anody, velký obsah tmelu zvyšuje riziko vnitřního zkratu anodového drátku a rámečku.



Obr. 2.1 Snímek dvouřádkového rámečku s jednotlivými kapsami pro anody

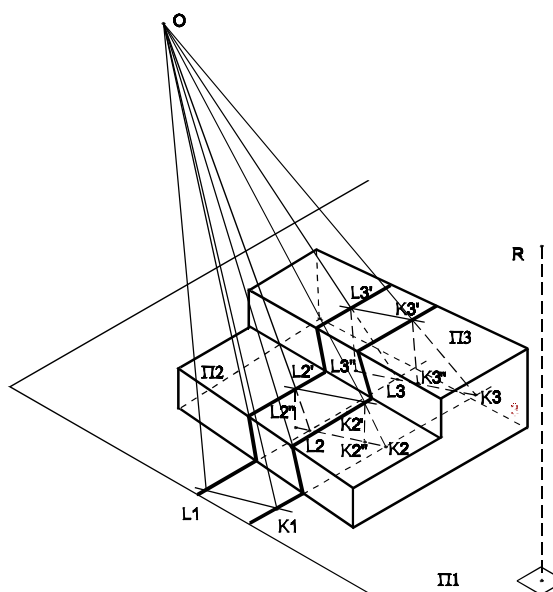


Obr. 2.2 Snímek kapsy rámečku s nanesenou pastou

Původní kamerové řešení (Acuity CiMatrix, Siemens group), instalované na pastovacím stroji, bylo pro firmu AVX Lanškroun nedostatečné – systém měřil pouze půdorysnou plochu nanesené kapky stříbra a z této hodnoty pouze odhadoval nanesené množství. S měnícími se vlastnostmi stříbrné pasty, zejména s měnící se viskozitou, se rapidně měnil objem skutečně nanesené pasty při konstantní půdorysné ploše. V době, kdy byl projekt řešen, nikdo nenabízel zařízení, které by mohlo měřit objem kapek stříbrné pasty s požadovanou přesností a rychlostí.

Již při návrhu metody bylo jasné, že optické měření objemu a plochy takového objektu bude možné pouze s použitím některé z metod 3D rekonstrukce. Klasický stereofotogrammetrický postup by vycházel z použití dvojice dvourozměrných obrázků objektu jakožto trojrozměrného tělesa. U tohoto plně obecného postupu je možné pro každý bod předmětového prostoru, který se zobrazí jako dvojice odpovídajících si bodů v obou dvourozměrných obrázcích, stanovit jeho třetí souřadnici. Problémem při použití klasické stereofotogrammetrie pro tento projekt by zajisté byl samotný povrch stříbrné pasty – na tomto povrchu s nekonstantními optickými vlastnostmi by bylo velmi obtížné hledat dvojice odpovídajících si bodů.

Nakonec bylo zvoleno řešení s jedinou kamerou a projektorem, který na snímáný objekt promítá známý, tzv. hodnotící obrazec. Tento obrazec se na obecné ploše povrchu kapky deformuje, což umožňuje dodatečně nalézt funkci $h(x, y)$ – výška povrchu pasty nad základnou. Tato metoda 3D rekonstrukce je nazývána *označení objektu vzorem* nebo *technika světelného vzoru* a je popsána např. v [8].



Obr. 2.3 Princip 2D triangulace – označení objektu vzorem s centrální projekcí z bodu O, který se pro pozorovatele vlivem centrální projekce do bodu R deformuje.

Výpočet výšky $h(x, y)$ v jednotlivých bodech je potom klasickou triangulační úlohou vycházející ze znalosti původního promítaného vzoru a skutečného obrazu pořízeného kamerou, která je posunuta vůči projektoru vzoru o známou bázi.

Použitelnost popsaného principu je podmíněna:

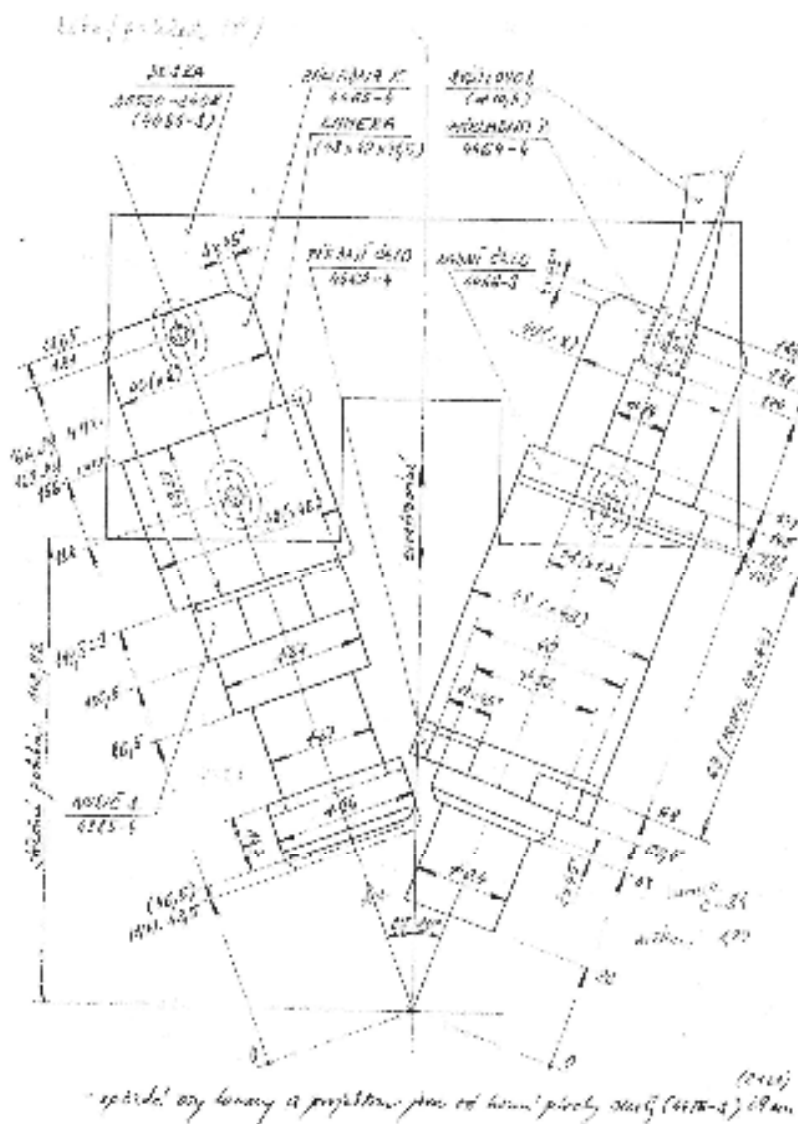
- příznivými povrchovými optickými vlastnostmi objektu a podkladu. Pokud není tato podmínka splněna, nasvícený vzor není dostatečně kontrastní a je velmi obtížné jej algoritmicky hledat,
- takovým tvarem objektu a úhlem projekce, kdy samotný tvar objektu vrhá pokud možno co nejmenší vlastní stín. V oblasti stínu není možné určit výšku objektu nad podložkou (problém viditelnosti u triangulačních metod),
- uložení roviny, na které leží objekt, musí být známé nebo zjistitelné.

Při návrhu osvětlení byl kladen maximální důraz na kvalitu sejmutého snímku a na takové uspořádání scény, které by maximálně zjednodušilo následný výpočet v obraze. Osvětlovací jednotka (projektor) byla navržena tak, aby generovala proužkový vzor promítaný na měřený objekt, kamera potom takto označený objekt sleduje z jiného úhlu. Vlivem projekce vzoru pod známým prostorovým úhlem a vlivem snímání scény z jiného prostorového úhlu byl navržen restituční obrazec, který zkreslení těchto dvou projekcí v co největší možné míře kompenzuje. Ostření zvláště kamery a zvláště projektoru by bylo velmi obtížné, nehledě k omezeným podmínkám v provozu. Z technických důvodů a kvůli jednoduché údržbě byl proto tento systém kamery a projektoru navržen jako optická soustava, kde na nosné desce jsou společně upevněny kamera a projektor a jsou nastaveny tak, aby se jejich optické osy protínaly v místě zaostření.

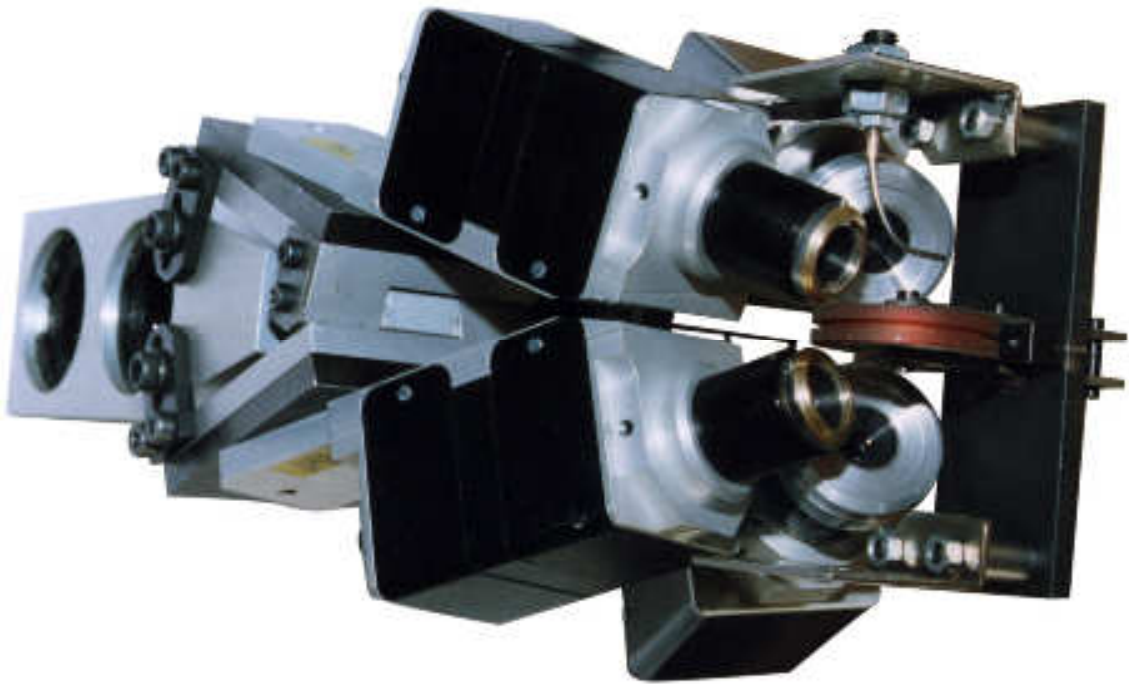
Opticko-mechanické uspořádání snímací soustavy kamera–projektor je zřejmé z Obr. 2.4. Snímač se nastavuje na optické lavici, takže odpadají problémy s kalibrací – prvky vnitřní a vnější orientace jsou apriorně známy.

Objektivy projektoru i kamery byly navrženy ve spolupráci s Optickou dílnou ČSAV. Mají zanedbatelné zkreslení a tím odpadá nutnost korekce obrazu. Navíc jsou objektivy telecentrické. Tak se eliminují chyby, které by mohly být způsobeny rozptylem výšky podložek.

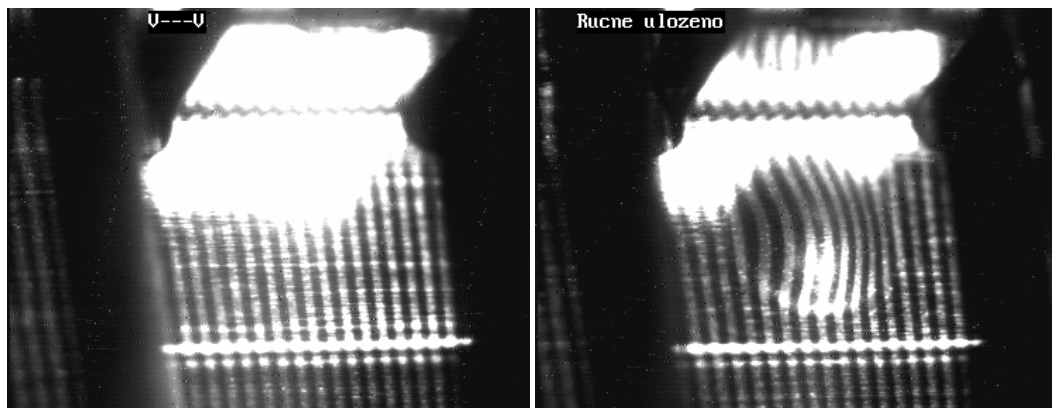
Zde je popsáno vítězné řešení úlohy. Paralelně s tímto řešením vznikalo i konkurenční. Pracovalo na podobném principu, ale autoři ušetřili na konstrukci optické soustavy ve víře, že se její kalibrace podaří vyřešit algoritmicky přímo na stroji, což ale zadavateli nepřipustně zkomplikovalo servisní operace. Systém nebyl schopen přesně pracovat bez častého nastavování. V soutěži neobstál, protože nebyl kladen dostatečný důraz na první, jednu z nejdůležitějších fází projektu, ne z důvodů použití nevhodných metod zpracování obrazu.



Obr. 2.4 Opticko mechanické uspořádání snímače objemu kapek. Vlevo kamera, vpravo projektor. Pracovní náčrso prototypového řešení

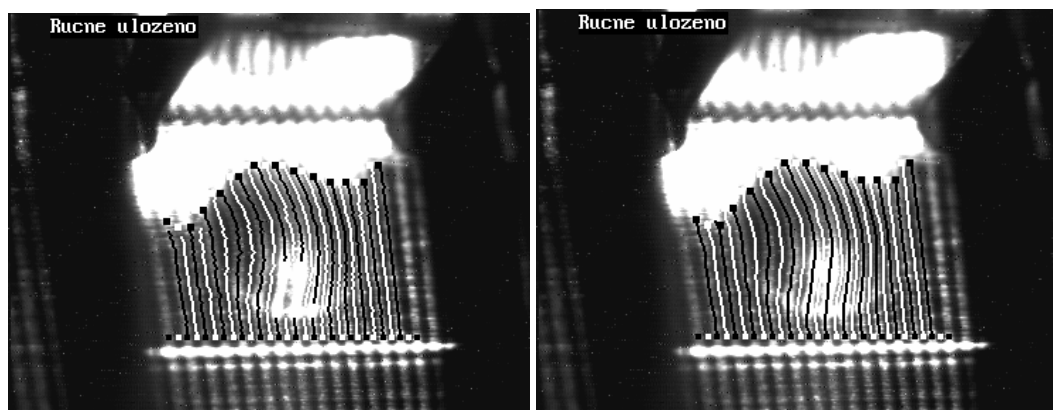


Obr. 2.5 Sestavená snímací hlava. Modul kamera-projektor je instalován na unášecím mechanismu po obou stranách pro možnost měření objemu pasty na dvouřádkových vodících rámečcích



Obr. 2.6 Snímek s promítnutým vzorem bez pasty a s nanesenou pastou

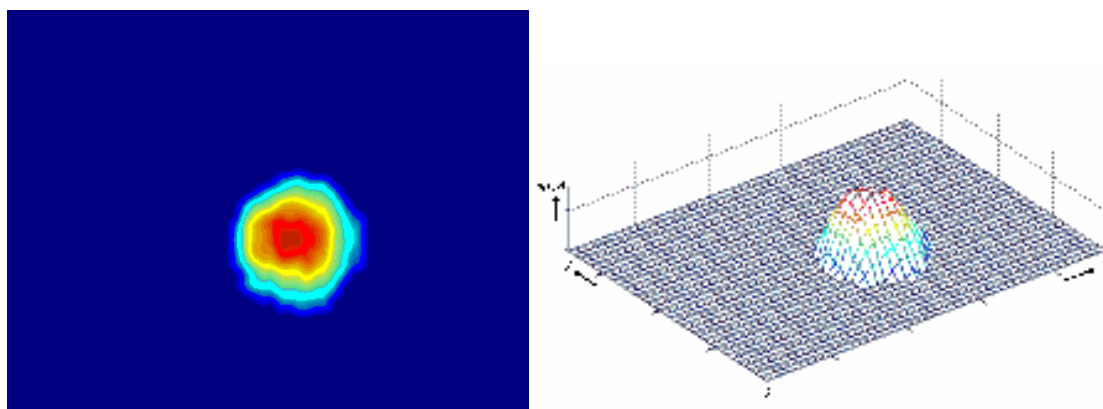
Při sejmutí obrazu popsaným snímačem pak postačí proložit pruhy obrazce odpovídajícími křivkami, které reprezentují povrch kapky. Při prokládání povrchu kapek se vychází z předpokladu, že díky viskozitě lepicí pasty je povrch alespoň po částech hladký. Tento předpoklad postačí i na interpolaci plochy tam, kde se obrazec z nějakého důvodu ztrácí. Jestli je znám povrch kapky, výpočet jejího objemu je rutinní záležitostí.



Obr. 2.7 Nalezené pruhy promítnutého vzoru a finální (vyhlazené a v chybějících místech interpolované) pruhy



Obr. 2.8 Šedotónová výšková mapa (přímý výstup z algoritmu)

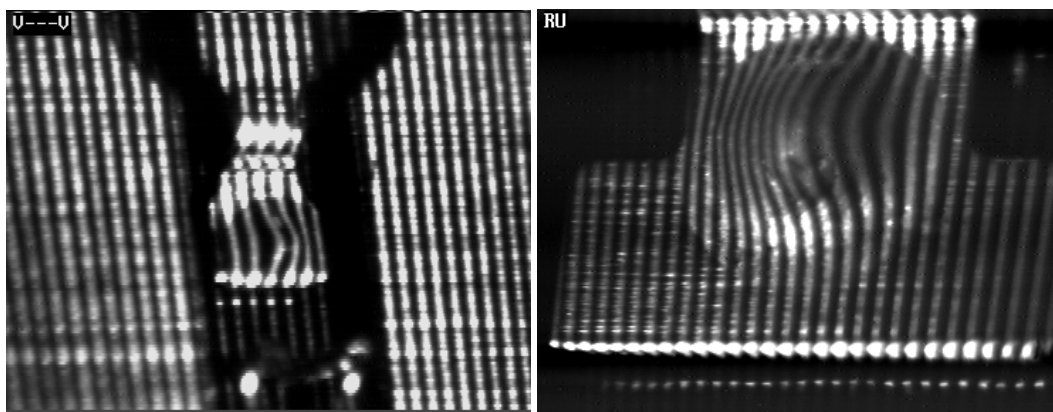


Obr. 2.9 Barevná výšková mapa a 3D drátový model vyhlazeného povrchu kapky

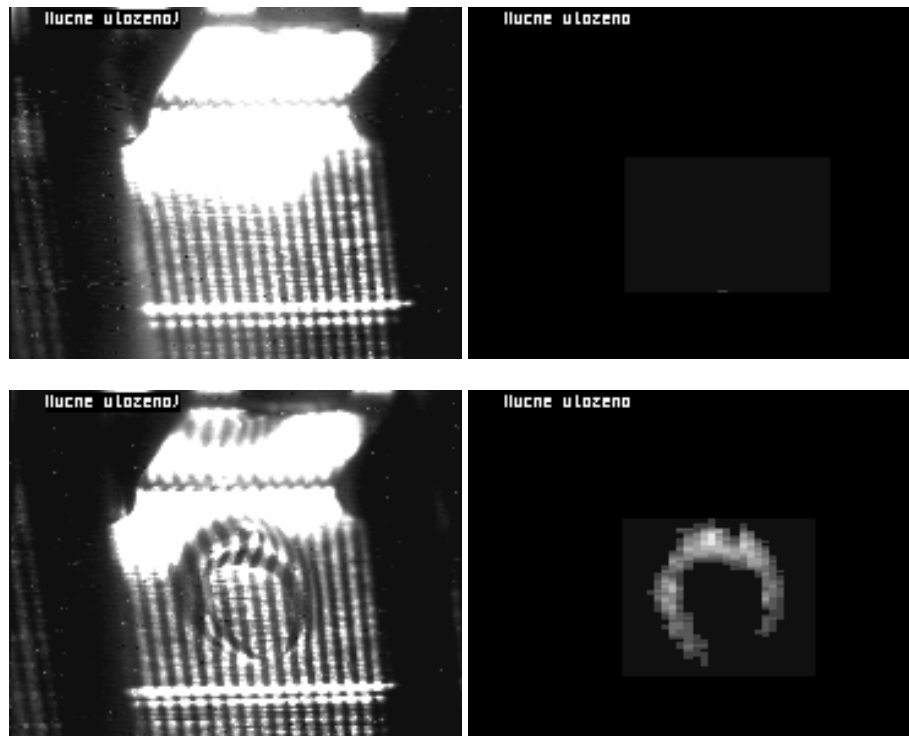
Systém je přizpůsoben provozu – veškerá měření jsou prováděna v reálném čase. Díky optimalizacím výpočetního algoritmu je toto zařízení schopno měřit objem a plochu čtyřiceti kapek za sekundu při použití průmyslového počítače s procesorem Intel® Pentium™ III 333MHz.

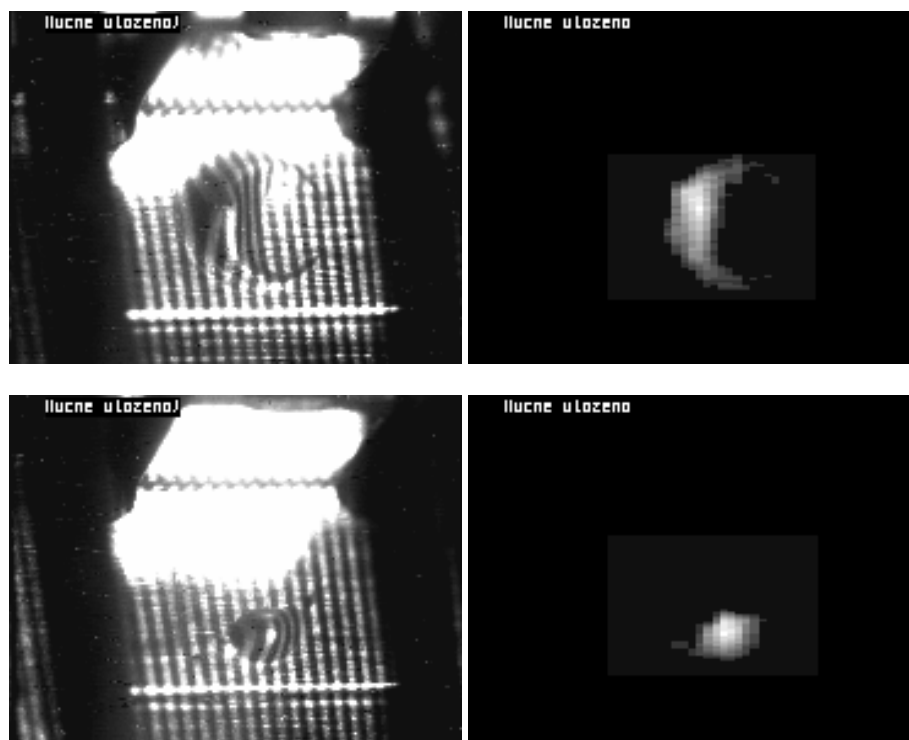
Každé měření probíhá jako oddělený proces s výstupem naměřených hodnot. Na základě těchto měření pastovací stroj provede dopastování nebo vyřadí nevyhovující vzorky z dalších výrobních procesů.

Snímky představují kapky pro lepení kondenzátorů rozměrového typu E90/E180 se základnou 3,6 mm x 2,0 mm a s nominálním pastovaným objemem stříbra 0,32 mm³. Nejmenší kontrolovaný typ J180 má základnu kapsy s velikostí 0,95 mm x 0,7 mm a nominální pastovaný objem 0,08 mm³, největší kontrolovaný typ VM má základnu 5,0 mm x 3,1 mm a nominální pastovaný objem 0,64 mm³.



Obr. 2.10 Snímek nejmenšího (typ J180) a největšího (typ VM) rámečku.

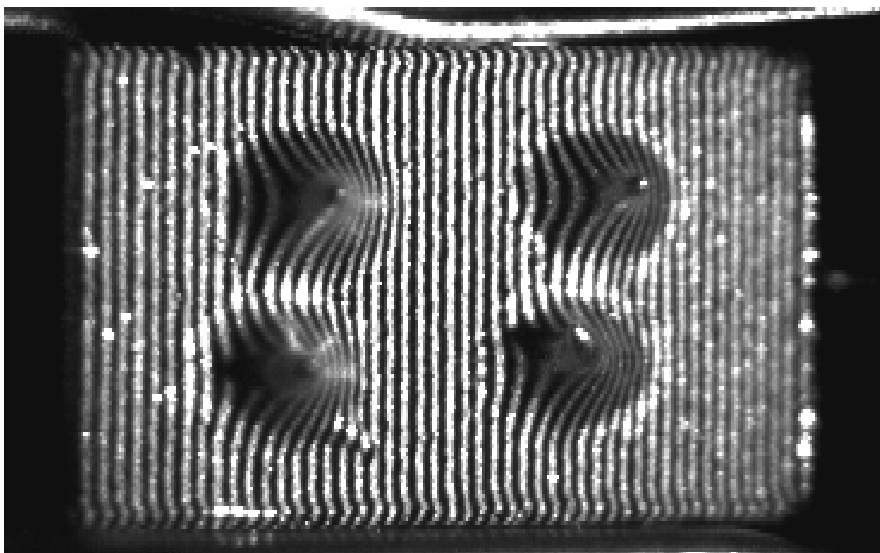




Obr. 2.11 Snímky chybně nanesených kapek a odpovídající šedotónové výškové mapy (rozměr E180, přímý výstup z algoritmu)

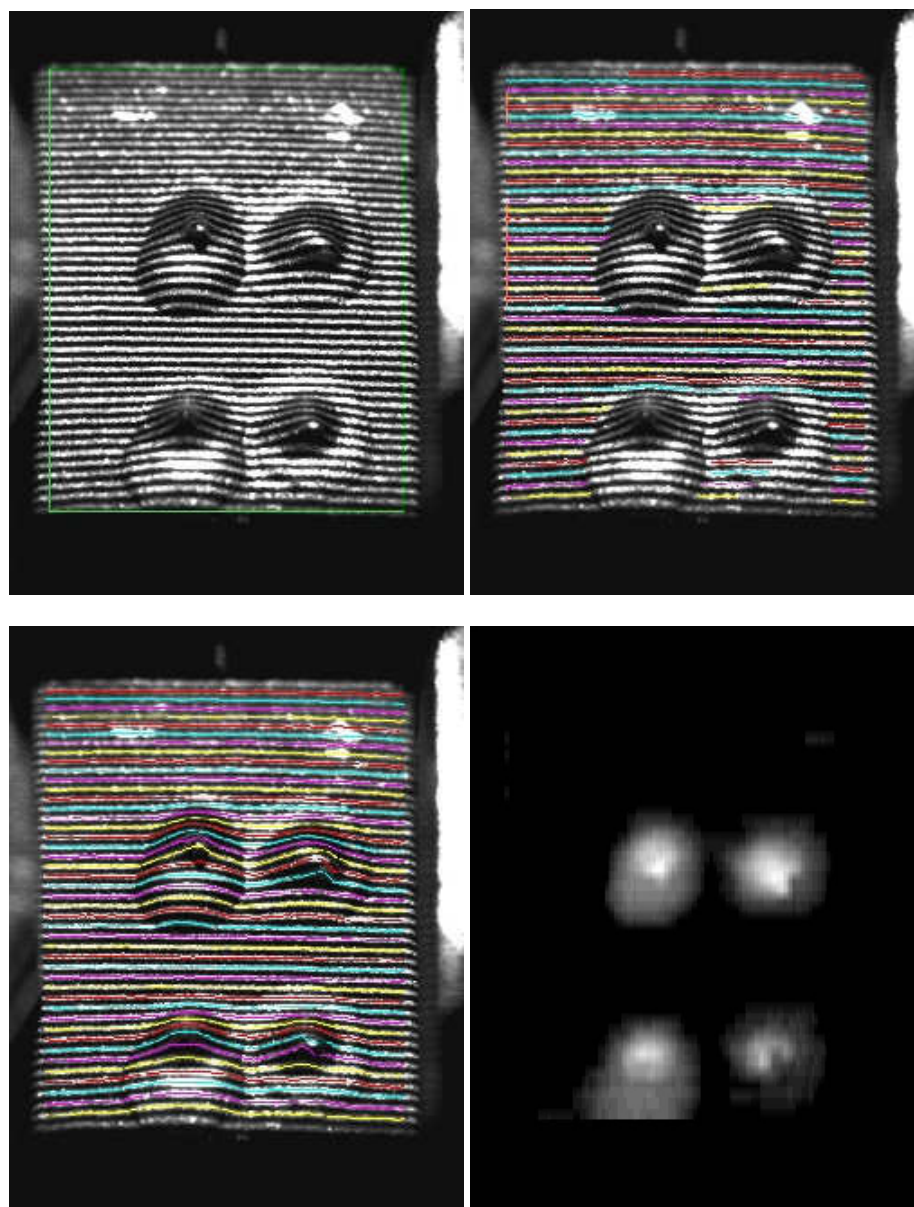
2.2.2 Multianody

Po úspěšném nasazení systému na měření objemu kapek na vodících rámečcích tantalových SMD kondenzátorů se modul kamera-projektor (viz Obr. 2.4) uplatnil i pro 3D rekonstrukci povrchu pasty nanesené přímo na anodě - technologický proces při výrobě multianodových kondenzátorů. Tyto kondenzátory mají čip složený z paralelně spojených plochých anod, což oproti standardní technologii snižuje sériový odpor a zlepšuje frekvenční vlastnosti. Na rozdíl od výše popsaného systému se z hlediska zpracování obrazu mění to, že vodivá pasta není nanesena na rovinnou podložku ale na zpravidla zakřivený povrch anody. Proto systém musí z pruhů promítaných na nenapastovanou část anody zjistit zakřivení povrchu anody a tuto plochu potom použít jako referenci pro výpočet výškového reliéfu a objemu pasty.



Obr. 2.12 Snímek anody s napastovanou čtveřicí kapek stříbrné pasty

Samotný snímač zůstal vůči výše popsanému systému koncepčně shodný, jen vlivem jiného prostorového úhlu a požadované vyšší přesnosti byl změněn promítaný hodnotící obrazec. Ukázalo se tedy, že návrh snímače byl úspěšný a že tento snímač byl použit i pro jiný projekt. Algoritmy pro tento projekt vycházely z již odzkoušených algoritmů.



Obr. 2.13 Příklad vyhodnocení – původní snímek, první iterace hledání pruhů, finální nalezené pruhy a výškový reliéf (přímý výstup z algoritmu).

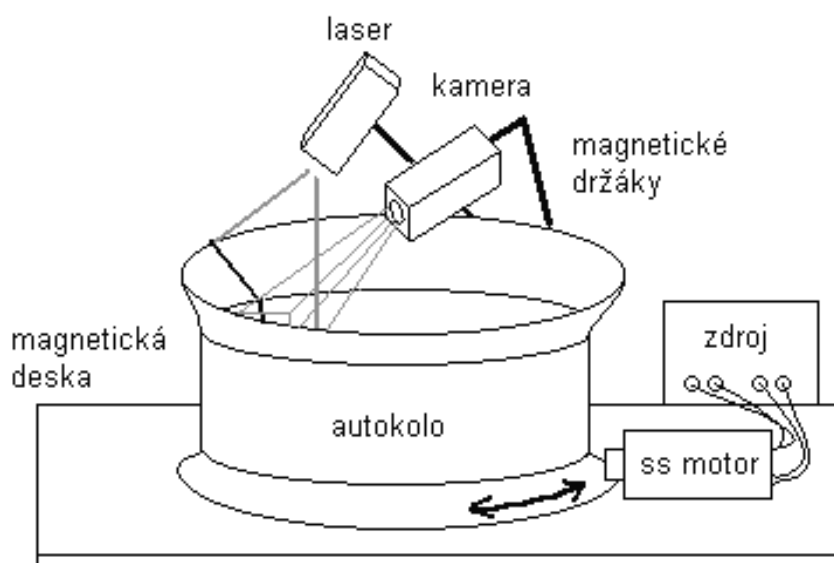
2.2.3 Kontrola kvality svarů na discích automobilových kol

Dalším projektem, na kterém jsem se podílel, byla studie pro Hayes Lemmerz Autokola a.s pro automatickou kontrolu svarů automobilových disků [9]. Cílem bylo měřit kvalitu svarů plechových disků kol. Kvalita těchto typů svarů se dá posoudit změřením povrchu a objemu materiálu ve svaru.

Vzhledem k již popsaným zkušenostem, zvládnutému matematickému aparátu 2-D triangulace a zpracování obrazu se zvolilo podobné řešení jako v předcházejících kapitolách. Hlavní těžiště práce spočívalo v návrhu technicky realizovatelného a v průmyslu použitelného systému. Roli projektoru převzal laserový generátor proužku s difrakční mřížkou.

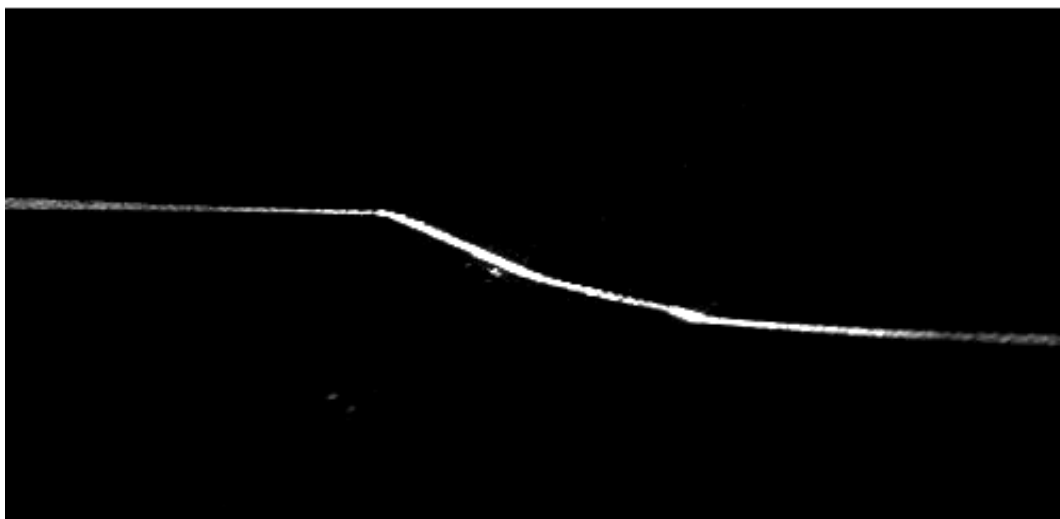


Obr. 2.14 Snímek plechového disku



Obr. 2.15 Schéma laboratorního přípravku

Postupným otáčením disku je získáván obraz laserového paprsku odraženého od povrchu svaru po celém vnitřním obvodu disku.

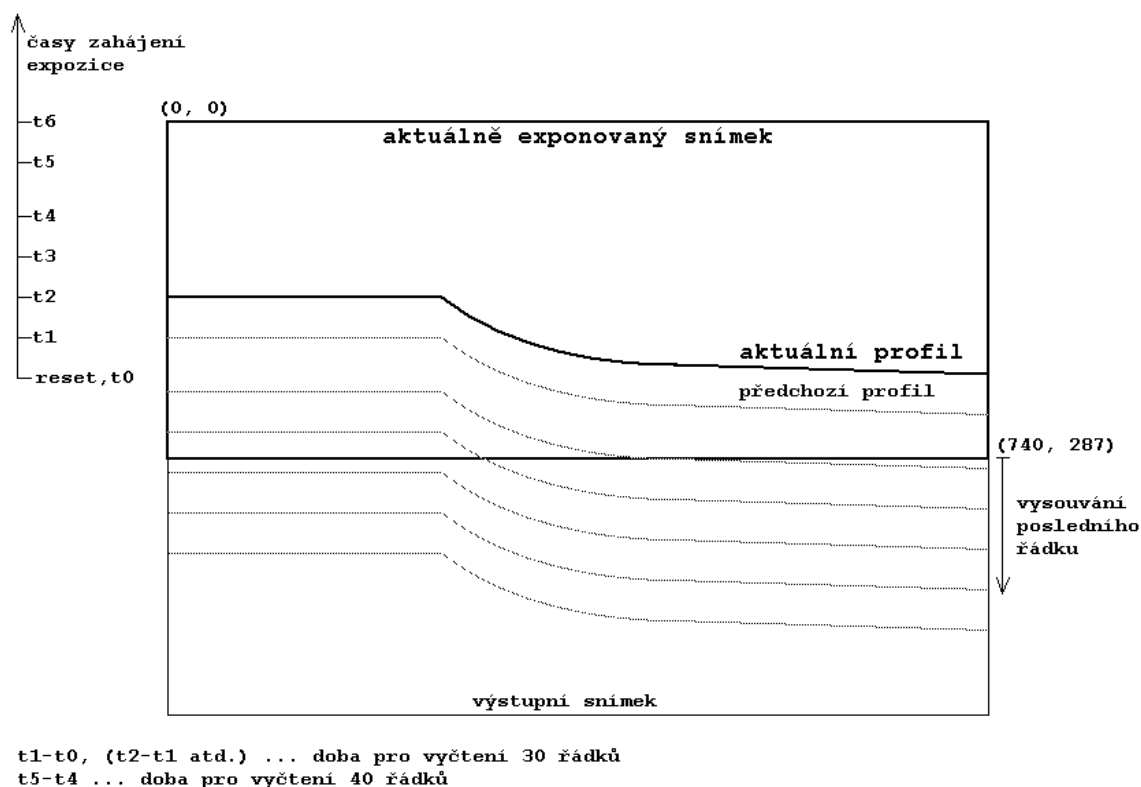


Obr. 2.16 Snímek z kamery v televizním režimu – stacionární obraz laserového paprsku

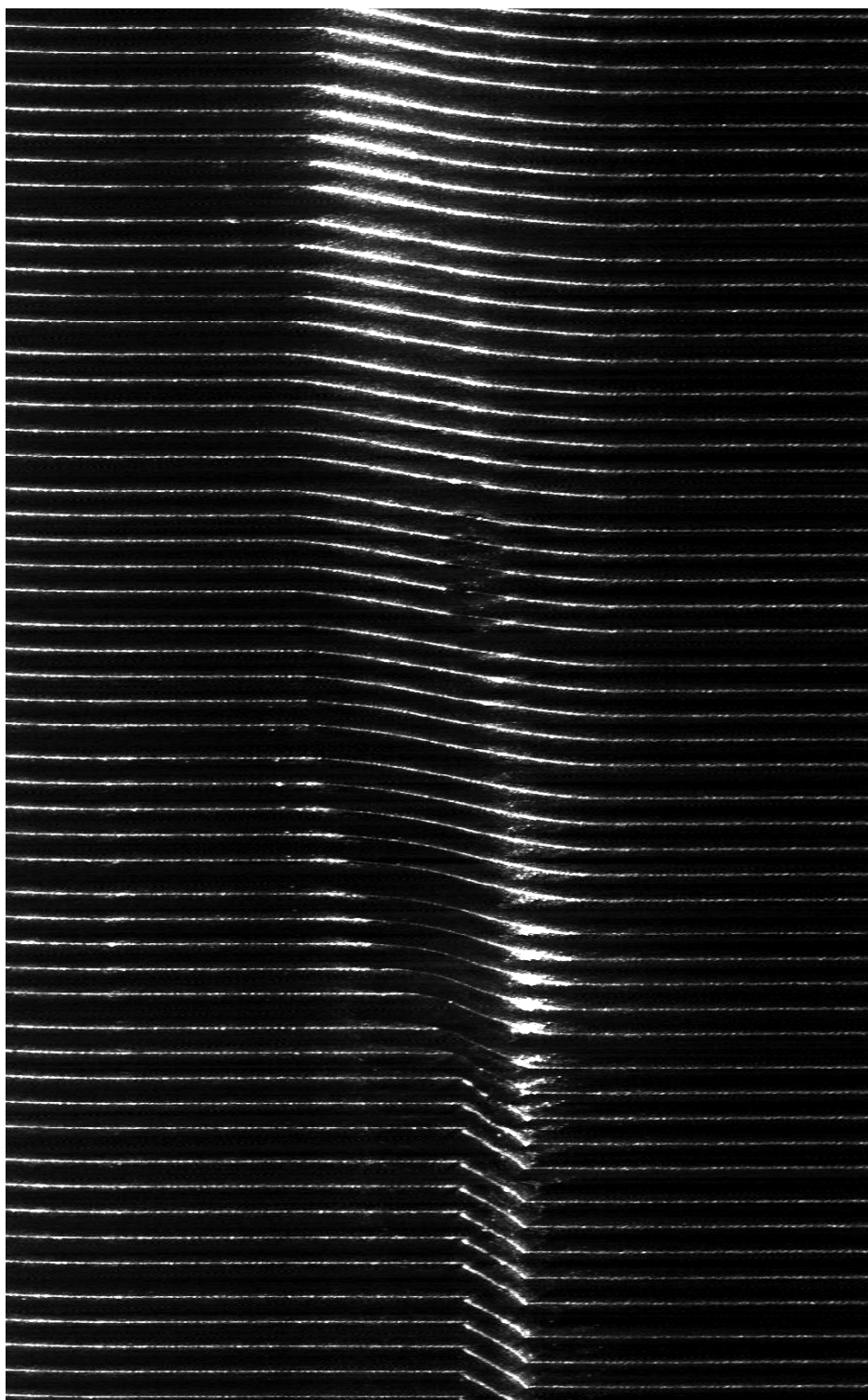
Za účelem této studie bylo modifikováno časování čipu kamery Modicam 612 tak, aby generovala kontinuální obraz s mnohonásobnou expozicí. Princip takové úpravy spočívá v cyklickém přičítání exponovaného obrazu k latentnímu obrazu uchovaném ve vertikálních registrech CCD čipu posunutého o několik řádků. Úpravou časování CCD čipu se dosáhlo téměř desetinásobného zrychlení snímání obrazu. Tím bylo dosaženo splnění jednoho z požadovaných parametrů zařízení s použitím snadno dostupných technických prostředků.

Pro snadnější algoritmické zpracování je kamera nastavena tak, aby exponovala vždy pětici snímků s krokem 30 televizních řádků a poté je mezera v časování prodloužena na 40 řádků. To umožnilo jednoznačně identifikovat levé a pravé konce světelného paprsku v případě jejich křížení anebo překrývání vlivem velmi nerovnoměrného svaru.

Princip byl ověřen na laboratorním přípravku, na jehož základě bylo vyrobeno finální zařízení. Podrobněji bylo popsáno v [9] a již čtvrtým rokem pracuje v Hayes Lemmerz Autokola a.s.



Obr. 2.17 Princip pořízení obrazu s mnohonásobnou expozicí



Obr. 2.18 Výřez snímku s mnohonásobnou expozicí laserového paprsku. Na snímku je patrný rozestup mezi jednotlivými pěticemi expozice

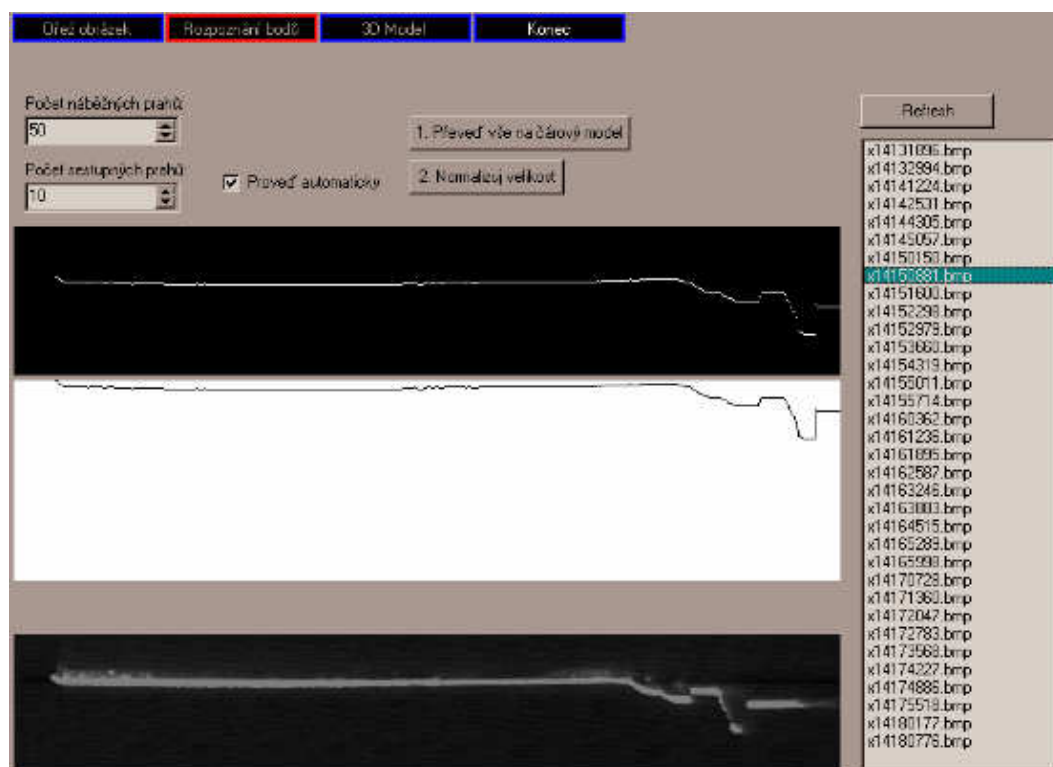
2.2.4 Kontrola brzdových čepů

Technologie 3-D rekonstrukce, která byla odladěna při řešení předcházejících úloh, umožnila úspěšné řešení řady dalších projektů. Jedním z nich byl požadavek na přesné měření povrchu a profilu rotačních čepů automobilových brzd pro firmu Lisi Automotive (Form a.s.) [10].

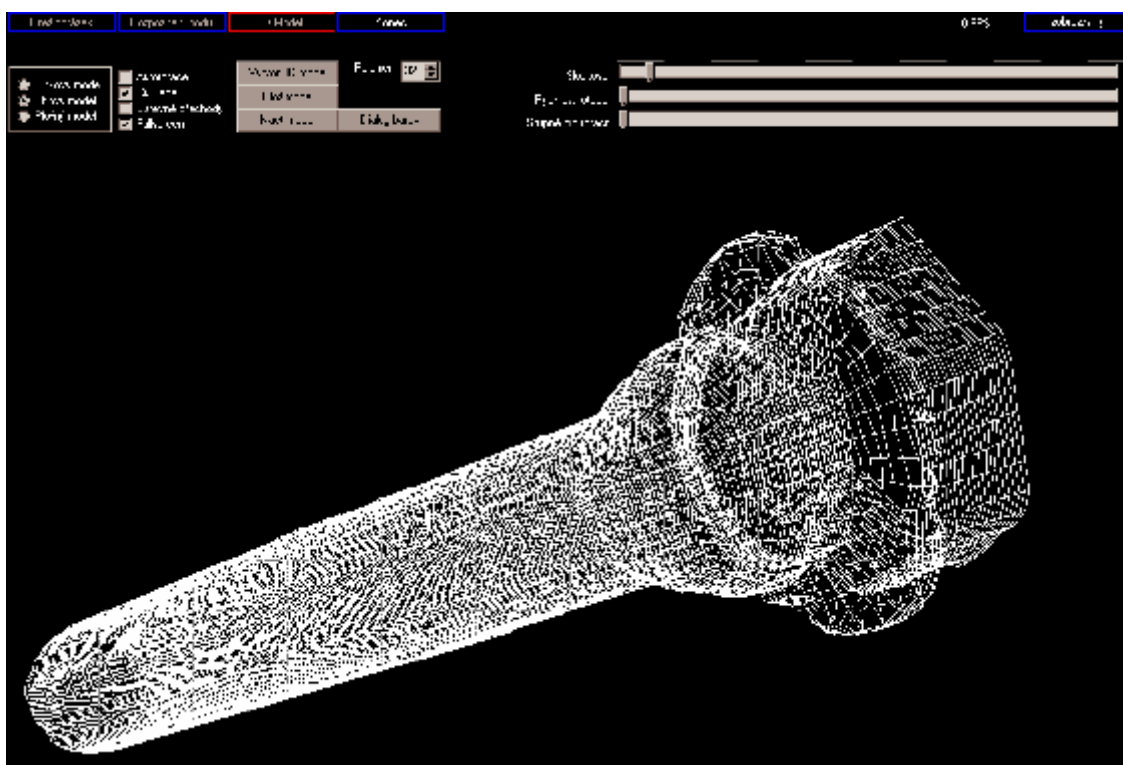


Obr. 2.19 Snímky kontrolovaných brzdových čepů

Opět se použila kamera s upraveným časováním v kombinaci s laserovým generátorem proužku a rotačním mechanismem, který se zkoumaným čepem otáčel kolem jeho osy. Výsledkem byla soustava čar reprezentujících 3-D povrch čepu.



Obr. 2.20 Sada snímků čepu s odstupem 10° - první testy



Obr. 2.21 Výsledný 3-D drátový model povrchu čepu

2.2.5 Detekce a počítání osob v tunelu pražského metra

Tento projekt zde uvádím proto, že názorně ilustruje, jak lze jednoduchým trikem při aranžování scény zjednodušit úlohu rozpoznávání obrazu. Pro detekci osob jdoucích po kolejišti byl navržen vizuální systém, který byl schopen pomocí soustavy kamer počítat osoby v uzavřeném prostoru. Kamery jsou uspořádány tak, že sledují všechny zóny, kterými je možno se dostat dovnitř nebo ven z uzavřeného prostoru.

Požadavkem na systém bylo detekovat a počítat osoby v reálných podmínkách nezávisle na osvětlení kolejiště. Bylo nutno tedy zvolit takový způsob osvětlení, které neoslňuje strojvůdce vlakových souprav. Nejjednodušším řešením je použití infračerveného reflektoru a instalace infračerveného filtru před čip kamery, aby nebyla kamera přesprávně oslňována od světla projíždějících vlakových souprav.



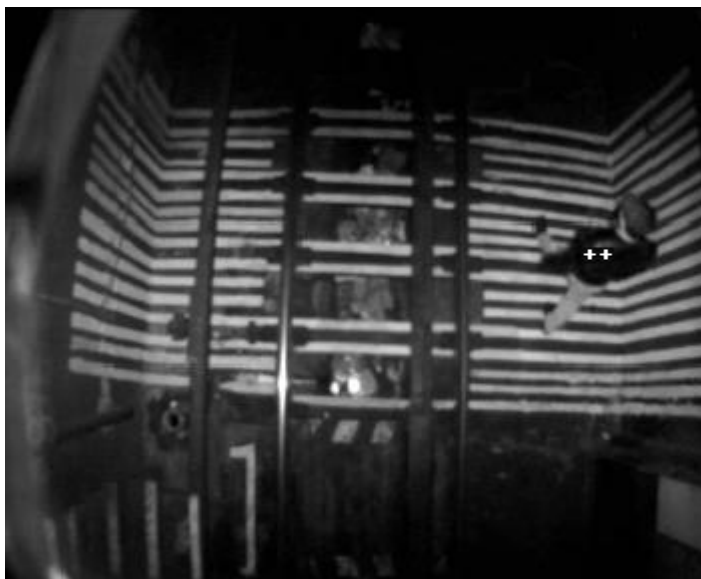
Obr. 2.22 Snímek osvětlený infračerveným reflektorem. Zachycená osoba je obléknuta do černé bavlněné pracovní vesty, která má v infračerveném spektru vysoký kontrast

Jak se později ukázalo, i při infračerveném osvětlení měly některé osoby velmi malý kontrast – splývaly s pozadím. Pro jejich správnou detekci bylo nutné zvýšit citlivostní prahy algoritmů, což zase zvýšilo četnost falešných detekcí (např. falešně detekovaná osoba při blížící se vlakové soupravě, která svými potkávacími světly vytváří pohyblivé stíny).



Obr. 2.23 Osoba nezachycená systémem oblečená do čínské bavlněné pracovní vesty vyrobené ze 100% polypropylénu

Nakonec jsem navrhnul použití kontrastního pozadí se vzorem – na dno a stěny tunelu byly namalovány pruhy o šířce přibližně 80 milimetrů.



Obr. 2.24 Snímek s kontrastním vzorem na pozadí a tmavou osobou



Obr. 2.25 Snímek s kontrastním vzorem na pozadí a světlou osobou

Z obrázků je zřejmé, že díky takto vytvořenému pozadí bude jakákoliv osoba kontrastní. Problém detekce nekontrastních osob byl tedy vyřešen místo použití velmi citlivých algoritmů (které by měly vlastnost falešných detekcí při průjezdu souprav a při změnách okolního osvětlení) instalací kontrastního vzoru. O robustnost celku se tak ve velké míře zasloužil spíše princip snímání scény než algoritmy.

Zajímavou fází bylo samotné testování kamerového systému. V době odstávky metra reprezentativní množina dvaceti osob simulovala průchody pod kamerami a snažila se vytvořit realitu se co nejvíce blížící průchody osob. Ve výsledku algoritmus musel vyhodnotit více jak 600 průchodů jednotlivých osob, osob nesoucích různá zavazadla, různých tanečních kreací i mileneckých párů, které se při průchodu pod

kamerami objímaly. Systém je schopen počítat jednotlivé osoby s přesností vyšší než 99%.

Popsaný systém je instalovaný v pražském metru mezi stanicemi Vyšehrad a I.P.Pavlova – celkem 6 kamer.

Při řešení všech rozebíraných úloh jsem se snažil postupovat podle ideje, která byla zmíněna v kapitole 2.1 – nejdůležitější část zpracování obrazu nemusí být vždy jen v použitých algoritmech, sebelepší metody nezachráně nevhodně sejmutý obraz, špatně předzpracovaný obraz nebo nevhodně zvolenou metodu. Všechny výše popsané úlohy byly vyřešeny spíše použitím osvědčených algoritmických metod avšak s velmi pečlivě připravenou fází snímání obrazu.

2.3 Aplikace s řádkovými kamerami.

Řádkové kamery se poměrně často používaly v době před nástupem kamer s plošnými snímači. Pořízení 2-D snímku řádkovou kamerou je podmíněno přirozeným nebo vynuceným pohybem snímaného objektu vzhledem ke kameře¹. Příkladem je dodnes pracující systém firmy KRONES pro kontrolu lahví ve Sklárnách Dubí. Láhev se musí po příchodu do zorného pole kamery zastavit a pak roztočit kolem podélné osy.

Takovéto systémy byly s nástupem plošných obrazových snímačů postupně vyřazovány z provozu [18]. Doménou řádkových snímačů zůstaly skenery a některé specializované aplikace.

Dnes se řádkové kamery používají v aplikacích, kde se objekty plynule pohybují jedním směrem, například materiál na dopravníkových pásích, plechy ve válcovnách, pásy papíru, tažené plasty, textilie, snímkování terénu z letadla nebo družice. Použití kamer s plošnými snímači bývá v těchto případech problematické, hlavně vzhledem k nutnosti časově náročného spojování snímků, relativně malého rozlišení plošných kamer a jiných nevýhod.

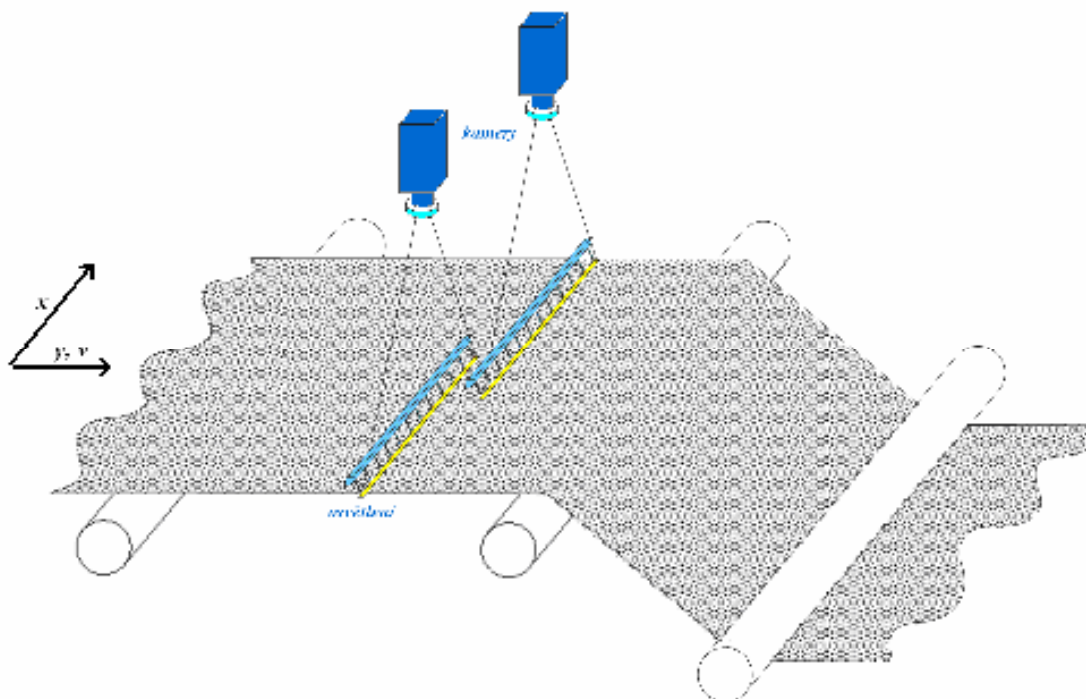
Kromě již zmíněných skenerů se s aplikacemi používajícími řádkové kamery lze setkat jen řídce, možná proto, že byly pozapomenuty². Kromě triviálních aplikací, jako jsou měření šířky anebo polohy okraje běžícího pásu, jsem měl alespoň v hrubých rysech možnost seznámit se se zařízením pro detekci okují firmy KYBERNETIKA Košice na válcovaných materiálech v Košických železárnách, a to proto, že zde byly použity řádkové kamery firmy CAMEA.

Použití řádkových kamer má na rozdíl od plošných několik zvláštností, ani ne tak v metodách zpracování obrazu jako v technologii akvizice obrazových dat. Požadavky na osvětlení scény jsou jednodušší, postačí osvětlit úzký pruh scény odpovídající

¹ První CCD kamery používaly řádkový čip v kombinaci s rotujícím hnaním nebo zrcátkem. Tato konstrukce prožívá renesanci v panoramatických kamerách s extrémně velkým rozlišením až 15000x50000 pixelů. Ty se používají v bezpečnostních aplikacích při vyhledávání podezřelých osob na letištích a výtržníků na sportovních utkáních.

² I firma Sick se snaží použít zatím s malým úspěchem plošné kamery, kde se přímo nabízí použití řádkových kamer. Jedná se o kontrolu kvality papíru při jeho výrobě v papírnách.

snímanému řádku. Problémy přinášejí až velmi rychlé systémy s velkým datovým tokem. O řešení tohoto problému bude zmínka později.



Obr. 2.26 Zjednodušené schéma vizuálního systému s řádkovými kamerami

Vlastnosti řádkových kamer jsou v největší míře dány vlastnostmi použitých řádkových snímačů. S běžnými CCD snímači lze dosáhnout řádkový kmitočet 10 kHz při rozlišení 5000 pixelů (SONY, TOSHIBA, KODAK). Expoziční doba odpovídá řádkovému kmitočtu. Při maximálním řádkovém kmitočtu musí být osvětlovací soustava schopna poskytnout osvětlení s intenzitou až 5000 luxů.

Mezi výrobci CMOS snímačů dominuje firma Photon-Vision Systems (www.photon-vision.com) se svými snímači řady SLIS. Lze s nimi dosáhnout řádkového kmitočtu více než 30 kHz, ale jejich citlivost je několikanásobně nižší než u CCD snímačů. Při snímání širších pásů při větších rychlostech lze jen těžko splnit požadavky na dostatečnou intenzitu osvětlení.

Kamery jsou s výpočetní jednotkou propojeny vhodným komunikačním kanálem (u řádkových kamer nejčastěji LVDS, Camera-link nebo FireWire). Důležitým požadavkem u řešení s řádkovými kamerami je schopnost kontinuálně digitalizovat a zpracovávat obrazová data, aniž by došlo ke ztrátě byť jediného obrazového řádku. To může být často problém, neboť řádkové kamery produkují data s tokem i 50 MB/s. Jako výpočetní jednotka může být použito PC, signálový procesor nebo jiné zařízení, které je schopno přenést a zpracovat takto velký objem dat.

Mezi nejznámější světové výrobce řádkových kamer, obrazových digitizérů a komplexních řešení pro kontrolu na nekonečných páslech patří firmy I2S, ISRA, Electronic SYSTEMS a DALSA.

V dnešní době (2008), a o to více i v době počátku řešení úlohy popsané v této práci, panovalo informační embargo na výrobky zmiňovaných firem. Každé řešení je dodáváno na klíč. O programovém vybavení těchto výrobců se neví v podstatě nic. Lze se jen dohadovat a podle zveřejněných materiálů vyvozovat [21], že pracují s univerzálními algoritmy založenými na umělé inteligenci (v mnoha materiálech je tato skutečnost přímo vyzdvihována). Zajisté jsou vhodné pro řadu aplikací, ale v mnou popisované aplikaci selhávají při detekci specifických chyb. Tyto chyby se vyznačují velmi malým optickým kontrastem vůči sledovanému materiálu a jsou velmi obtížně zachytitelné. Tyto podstatné a další jiné nevýhody, které instalace zmíněných systémů přináší, budou popsány v cílech této disertační práce.

3 Cíle disertační práce

Téma této disertační práce vychází z reálních požadavků výrobce netkaných textilií, konkrétně firmy Pegas Nonwovens a.s., která ke své produkci využívá výrobních linek REICOFIL/Reifenhäuser. Jedná se o jednu z nejpokročilejších technologií v tomto odvětví. Nutnost detekce vad na vyráběném materiálu je dána jeho dalším použitím při výrobě hygienických a zdravotnických potřeb. V počátku řešení této práce (2003) firma Pegas nedisponovala vizuálním systémem, vyráběný materiál byl dodavatesky kontrolován u majoritního odběratele 3M U.S., který měl převíjecí linku vybavenou v té době špičkovým vizuálním detektorem vad od italské firmy ELECTRONIC Systems [21]. Tento systém však nebyl (a dosud není) schopen detekovat vady s nízkým kontrastem. Výrobky reklamované spotřebiteli pak byly posílány zpět až k výrobcu netkané textilie společně se zbytkem celé šarže textilie.

Na základě praktických požadavků jsem si položil za cíl návrh a realizaci v porovnání s konkurenčními systémy kvalitativně lepšího vizuálního systému, který nebude mít v takové míře pro uživatele nevhodné funkční a konstrukční vlastnosti jako současné systémy :

1. nízká citlivosti detekce pro vady s malým optickým kontrastem,
2. velký počet vyhodnocovacích jednotek (PC), zpravidla jedno obslužné PC na jednu až maximálně dvě kamery (důvodem jsou velmi složité a tím pádem výpočetně náročné algoritmy),
3. komplikovanou, drahou a na servis náročnou osvětlovací soustavu, která z podstaty použitých metod detekce vad musí zabezpečit homogenní osvětlení na celé šířce kontrolovaného materiálu a regulaci intenzity osvětlení v závislosti na vlastnostech kontrolovaného materiálu,
4. technologicky nevhodné umístění výpočetní jednotky a vyhodnocovacího pracoviště v těsné blízkosti výrobní linky dané omezeními použitého komunikačního kanálu kamera-počítač – poskytuje malý komfort obsluhy a přináší nutnost klimatizovaného zázemí pro výpočetní jednotku.

Cíle práce lze rozdělit do základních oblastí, které jsou dále složeny vždy z několika dílčích úloh :

- návrh způsobu osvětlení a snímání materiálu,
- volba a příprava vhodného hardwarového vybavení,
- návrh a optimalizace algoritmů pro detekci vad v materiálu,
- praktické ověření, uživatelské rozhraní.

4 Aplikační rozbor skenování materiálu řádkovými kamerami

V následujícím textu se zaměřím na komplexní řešení konkrétního problému – detekce a klasifikace vad při produkci netkaných textilií. Vedlo mě k tomu to, že se jedná o poměrně složitou úlohu a to jak konstrukčně, tak i z pohledu tvorby spolehlivých algoritmů detekce vad v reálných podmínkách. Z hlediska zpracování disertační práce by bylo jednodušší podrobně popsat řešení některého z dílčích problémů, například úlohu rozpoznání vad. Taková je většina disertačních prací. V mnoha případech je to způsobeno tím, že v našich podmínkách jsou disertanti akademickým prostředím často izolováni od reality a řeší modelové úlohy anebo v horším případě syntetické problémy. Tím nechci snižovat úlohu základního výzkumu bez kterého by neexistoval pokrok.

Domnívám se, že užitečnější a doufám i inspirující bude ukázat celé řešení systému pro detekci a klasifikaci vad na netkaných textiliích.

4.1 Netkaná textilie

Jako netkaná textilie [19] je zpravidla považován materiál složený z náhodně orientovaných vláken mechanicky, termicky (kalandrovacím válcem) nebo jinak zpevněný. Vlákná jsou vyráběna například dloužením z roztavených kapilár (tzv. trysky) pomocí tažného vzduchu, nejčastějším materiálem jsou polypropylen a polyethylen [22]. Běžná šířka vláken je od méně než mikrometru až po desítky mikrometrů. Vlákná dopadají na pohybující se dopravník (pás). Finální materiál je tvořen několika vrstvami, každá může mít specifické vlastnosti (savost, hydrofobní úprava, pevnost, jemnost...) a každá může být vyrobena jinou technologií. V průmyslové výrobě dominují 2 technologie :

Meltblown – vlákna s průměrem 1 μm až 5 μm a s délkou v jednotkách milimetrů, výchozí surovina – polypropylen.

Spunbond – nekonečná vlákna (filamenty) s průměrem 5 μm až 40 μm , výchozí surovina – polypropylen nebo kombinace polypropylenu a polyethylenu v případě výroby bikomponentních vláken.



Obr. 4.1 Bikomponentní vlákno netkané textilie (Pegatex® Bico [20]). Jádru z polypropylenu dává vláknu pevnost, plášť z polyethylenu jemnost a savost.



Obr. 4.2 Výrobní linka netkaných textilií [20]

4.2 Požadavky na systém

Při procesu výroby netkané textilie vznikají různé vady – díry, výkapky, zátrhy, zalisovaná špína. Výskyt těchto vad lze sice dodržováním předepsaných technologických postupů minimalizovat, ale nikdy ne úplně eliminovat. Z toho vyplývá nutnost vizuální kontroly vyráběného materiálu.

Požadavky na vizuální systém vychází z reálných požadavků zadavatele :

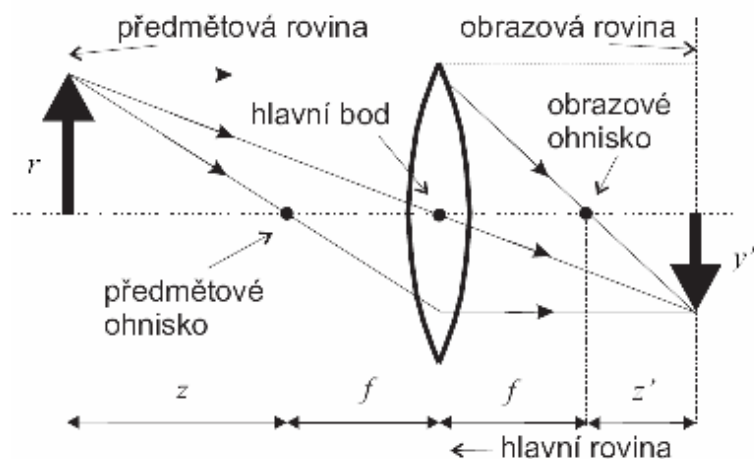
- detekce opticky kontrastních vad v materiálu,
- detekce vad s rozměry od 1,0 mm x 1,5 mm,
- rychlost snímání a vyhodnocení vad v reálném čase při rychlosti výroby 550 m/min při šířce sledovaného materiálu až 4200 mm,

- integrace vizuálního systému do výrobní linky bez omezení jejího provozu,
- klasifikace detekovaných vad podle uživatelem definovatelných tříd,
- on-line i off-line reprezentace detekovaných vad.

4.3 Volba parametrů řádkové kamery

Tato kapitola byla zařazena pro úplnost. Obsahuje základní vztahy, kterými se řídí volba kamer a objektivů. Nezahrnuje technologická omezení vycházející z konkrétního zadání jako jsou požadavky na rozměry, mechanickou tuhost soustavy, odolnost proti vlivům prostředí a pod. Mé rozhodování bylo zjednodušeno tím, že jsem na začátku řešení projektu měl k dispozici kameru s digitizérem a analogovou přenosovou trasou po optickém vlákne, která byla zkonstruována speciálně pro tento projekt. Tato kamera byla osazena CCD čipem Sony ILX531A s rozlišením 5136 pixelů, přičemž se pro zvýšení citlivosti počítaly sudé a liché pixely, takže výsledné rozlišení bylo 2568 pixelů. Bylo s ní možné dosáhnout řádkového kmitočtu až 10900 Hz.

Snímání obrazu na nekonečném výrobním pásu s použitím řádkových kamer využívá principu, kdy je obraz ve směru kolmém na osu řádkového senzoru snímán pohybem scény (sledovaného materiálu). Z tohoto principu také vyplývá základní rovnice pro výpočet rozlišení kamery v obou směrech. V následujícím textu budiž uvažováno rozlišení r_x jako pixelové rozlišení kamery ve směru kolmém na pohyb materiálu, r_y jako rozlišení ve směru pohybu materiálu.



Obr. 4.3 Předmetová a obrazová rovina – model jednoduché čočky (objektivu)

Rozlišení r_x potom bude

$$r_x = y'_x \left(\frac{a}{f} - 1 \right) \quad (4.1)$$

kde y'_x rozměr pixelu řádkového senzoru ve směru řádku,
 f ohnisková vzdálenost čočky
 a předmětová vzdálenost od optické roviny ($z + f$)

Rozlišení r_y je analogické k r_x , avšak zde je nutno připočítat posun materiálu po dobu expozice kamery

$$r_y = y'_y \left(\frac{a}{f} - 1 \right) + v_y \cdot t_{\text{exp}} \quad (4.2)$$

kde y'_y rozměr pixelu řádkového senzoru ve směru kolmém na řádek,
 v_y rychlost pohybu materiálu v podélném směru
 t_{exp} expoziční doba kamery

Ve většině případů je u řádkových kamer expoziční doba shodná s řádkovou periodou kamery $t_{\text{exp}} = \frac{1}{f_{\text{LINE}}}$. Potom

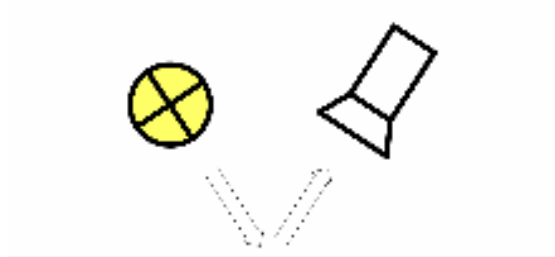
$$r_y = y'_y \left(\frac{a}{f} - 1 \right) + \frac{v_y}{f_{\text{LINE}}} \quad (4.3)$$

f_{LINE} snímací kmitočet řádkové kamery,

4.4 Návrh mechanicko-optického uspořádání

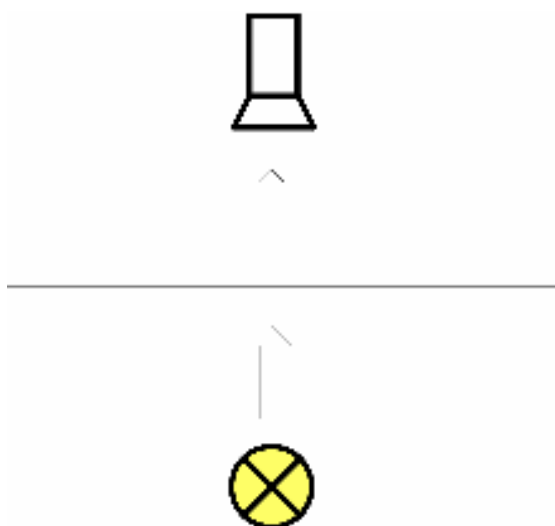
Optické vlastnosti sledovaného materiálu jsou vždy závislé hlavně na samotném materiálu. Obecně se nedá navrhnout univerzální způsob osvětlení optimální pro všechny typy materiálu a všechny typy hledaných vad. V zásadě je možné využít těchto principů osvětlení :

- reflexní využívající odraz světla od částečně nebo úplně reflexního povrchu sledovaného materiálu. Tento způsob uspořádání scény je vhodný pro materiály, jako jsou tažené plasty, lamináty, fólie,



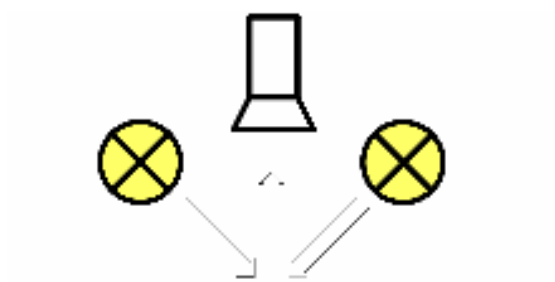
Obr. 4.4 Reflexní osvětlení - nákres

- transmisní osvětlení využívá úbytku světla při průchodu materiálem nebo detekovanou vadou v materiálu,



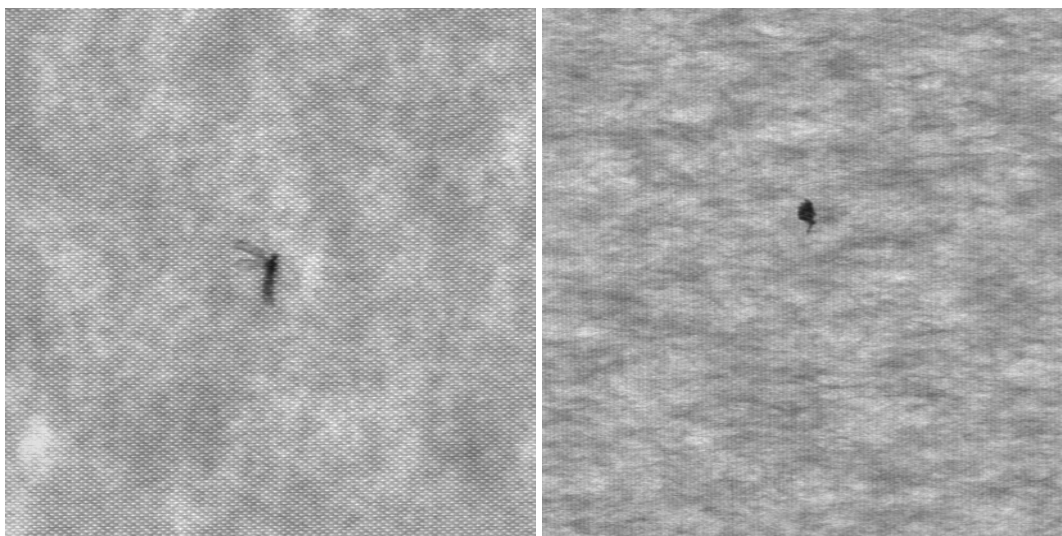
Obr. 4.5 Transmisní osvětlení - nákres

- difúzní osvětlení využívající rozptylu světla na povrchu a uvnitř materiálu.

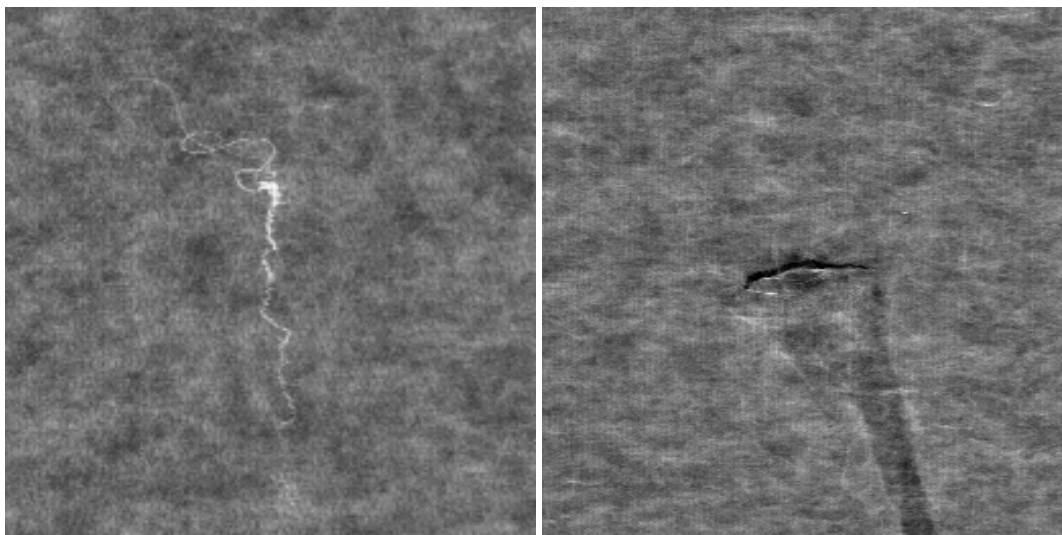


Obr. 4.6 Difúzní osvětlení - nákres

Pro konkrétní případ netkaných textilií vyráběných firmou Pegas Nonwovens a.s. se ukázalo, že pro detekci vad je nutné použít transmisní (detekce děr a zalisovaných předmětů) i difúzní osvětlení (detekce děr a výkapků – míst s větší hustotou materiálu). Každé z těchto osvětlení má samostatnou kameru. Na následujících obrázcích jsou typické vady sejmuté s transmisním a difúzním osvětlením.



Obr. 4.7 Transmisní osvětlení – reálné snímky. Výhodou tohoto způsobu osvětlení je úbytek procházejícího světla tmavým defektem (špína, olej, hmyz³), který může být na libovolné straně a v libovolné vrstvě materiálu.



Obr. 4.8 Difúzní osvětlení – reálné snímky. Vyniknou vady, které nejsou patrné při transmisním osvětlení (levý snímek – výkapek, pravý snímek - díra). Při tomto typu osvětlení nejsou zachytitelné tmavé vady v materiálu, které jsou ve spodní vrstvě – dále od kamery

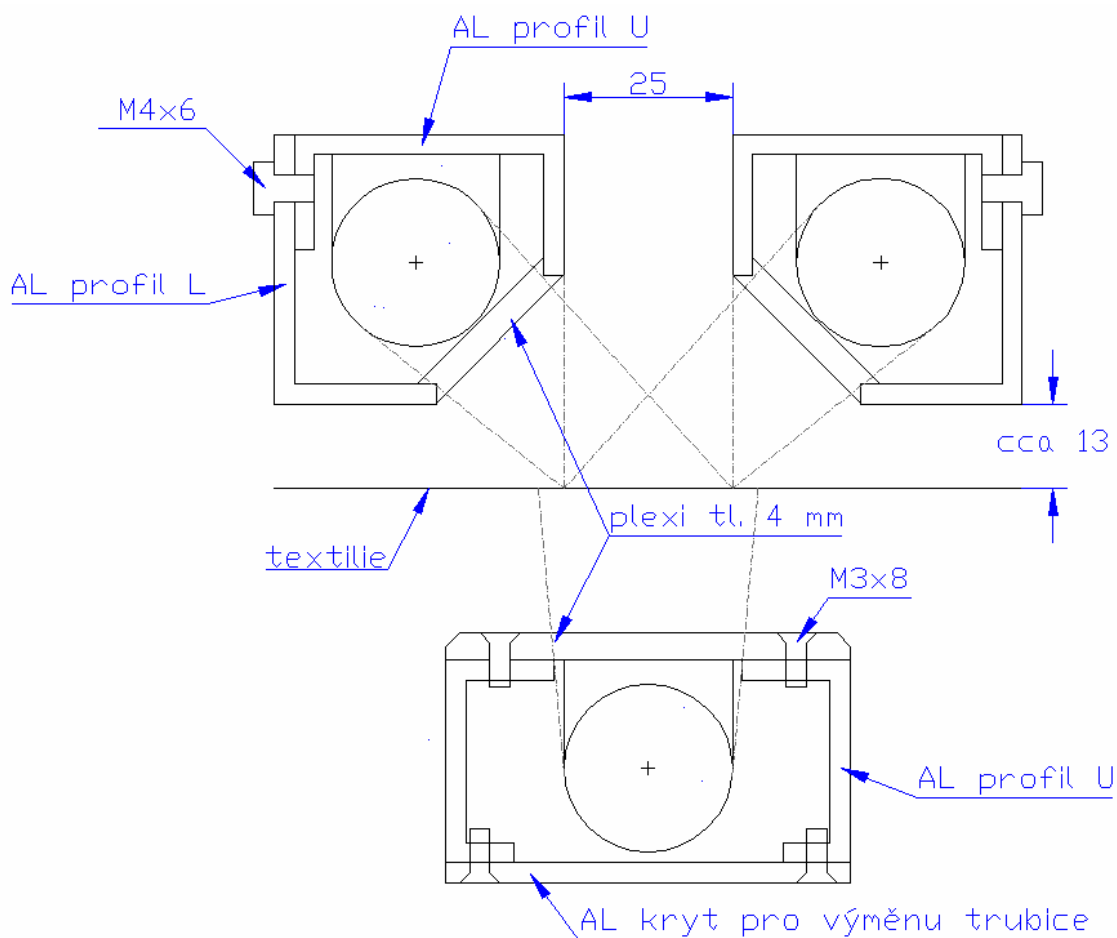
³ Velmi závažná vada spíše psychologického charakteru. Na okraj uvádím, že z tohoto materiálu se vyrábějí dětské pleny a prostředky dámské hygieny. Po nález jediného takového vady odběratel zpravidla vrací celý kamion textilie.

5 Popis řešení systému

V této kapitole budou popsány jednotlivé hardwarové součásti systému, který byl nasazen do testovacího provozu na výrobní lince netkaných textilií L03 závodu Pegas – Bučovice. Tato linka je osazena třemi výrobními hlavami, každá hlava má 14400 kapilár, které produkují vzduchem tažené vlákno s tloušťkou 12 μm až 24 μm (spunbond technologie). Vlákna z těchto hlav jsou promíchávána a chlazená vzduchem a dopadají na ujíždějící výrobní pás. Všechny tři vrstvy jsou potom pomocí horkého kalandrovacího válce termicky zpevněny. Linka je stavěna na maximální rychlost 550 m/min.

5.1 Osvětlení

V kapitole 4.4 byl popsán experimentálně zjištěný způsob osvětlení – kombinace transmisního a difúzního osvětlení. Požadavek na vysokou intenzitu, cenu a servisovatelnost splňují lineární zářivky. U supermarketových lineárních výbojek se projevovala podélná nestabilita výboje, něco jako kmitny a uzly, které se přesouvaly. Tento jev se neprojevoval u výbojek renomovaných výrobců. Závislost jasu na střídavém síťovém napájení lze částečně eliminovat elektronickými předřadníky. Jen některé však vyhověly pro snímání kamerou s řádkovým kmitočtem přes 10 kHz. Pak již stačilo navrhnout mechaniku světla (Obr. 5.1), která současně zajišťovala soustředění vyzařovaného světla do požadovaného místa.



Obr. 5.1 Pracovní náčrtek mechaniky osvětlení. Pro jednoduchost je zobrazeno difúzní i transmisní osvětlení v jednom náčrsku

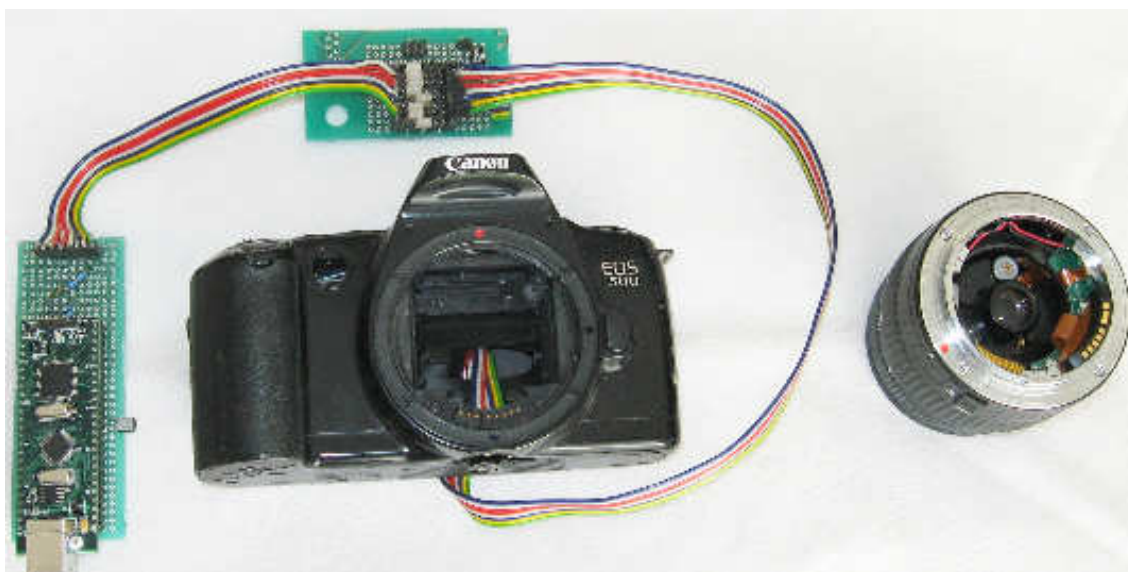
5.2 Řízení objektivů

Požadavky na exponování snímků vychází z nutnosti přizpůsobit se celému sortimentu výroby. Optické vlastnosti materiálu se mění s gramáží a barvou vyráběného materiálu. Použitá řádková kamera Modicam LINE531 nemá podobně jako většina rychlejších řádkových kamer elektronickou závěrku a řídit intenzitu světla u výbojek je obtížné. Správnou expozici obrazu lze dosáhnout jen změnou clonového čísla objektivu a to automaticky bez zásahu obsluhy. Vzhledem k rozměru CCD čipu nelze použít objektivy pro CCD kamery s automatickým řízením clony.

Jedním z požadavků na systém je schopnost detekce vad při výrobě netkané textilie s plošnou gramáží od 8 g/m² do 50 g/m². Experimentální měření závislosti světlosti textilie (při difúzním osvětlení) a útlumu světla při průchodu textilií (při transmisním osvětlení) na gramáži vykázalo zhruba desetinásobnou dynamiku světla při porovnání nejmenší a největší gramáže. Jak se dalo očekávat, difúze světla na materiálu roste přibližně lineárně s gramáží, závislost útlumu na gramáži je exponenciálně klesající.

Měřením bylo potvrzeno, že rozsah clonových čísel libovolného objektivu dokáže při dostatečném výkonu zdroje světla vyrovnat rozptyl optických vlastností všech druhů kontrolovaného materiálu.

Nejelegantnějším řešením se jevilo použití objektivů Canon řady EF. U těchto objektivů jsou clona i ostření řízeny integrovanými motory v těle objektivu. Jediným problémem bránícím nasazení těchto objektivů byl komunikační protokol, který se nepodařilo od výrobce získat žádným způsobem s odůvodněním, že není v zájmu firmy jej uvolňovat.



Obr. 5.2 Inverzní inženýrství.

Nakonec se jej podařilo získat metodou „inverzního inženýrství“ (Obr. 5.2) za cenu jednoho fotoaparátu, ze kterého byly vyvedeny klíčové signály (DLC, DCL, CLK) [13]. Tyto komunikační signály byly napojeny na vývojový modul DLP2232PB [15] s jednočipovým procesorem PIC16F877A, který posloužil jako simulátor objektivu i řídicí jednotky fotoaparátu. V kombinaci s logickým analyzátozem se podařilo zjistit podstatu fyzické vrstvy. Ukázalo se, že převládající názor [14] o komunikaci založené na SPI protokolu se nezakládá na pravdě. Časování zajišťuje signál CLK.



Obr. 5.3 Ukázka komunikace mezi tělem fotoaparátu a objektivem Canon-EF. Na snímku z osciloskopu je patrné, která strana kdy přebírá časování signálu CLK (zelený a žlutý signál změřený na straně těla resp. objektivu zatížený odporovým mostem)

Samotná komunikace probíhá v režimu master-slave v prvních osmi bitech, poslední devátý bit je potvrzovací. Nakonec se podařilo analyzovat kompletní komunikaci mezi tělem a objektivem a vytvořit modul CanEF se standardní sériovou linkou RS232. Jelikož při odposlechu signálů byl použit modul s jednočipovým procesorem PIC16F877A, využil jsem již vytvořených částí programu a modul CanEF jsem založil na procesoru PIC16F876A se stejným jádrem ale menším pouzdrům a menším počtem vývodů.



Obr. 5.4 Kamera LINE531 s objektivem a modulem CanEF

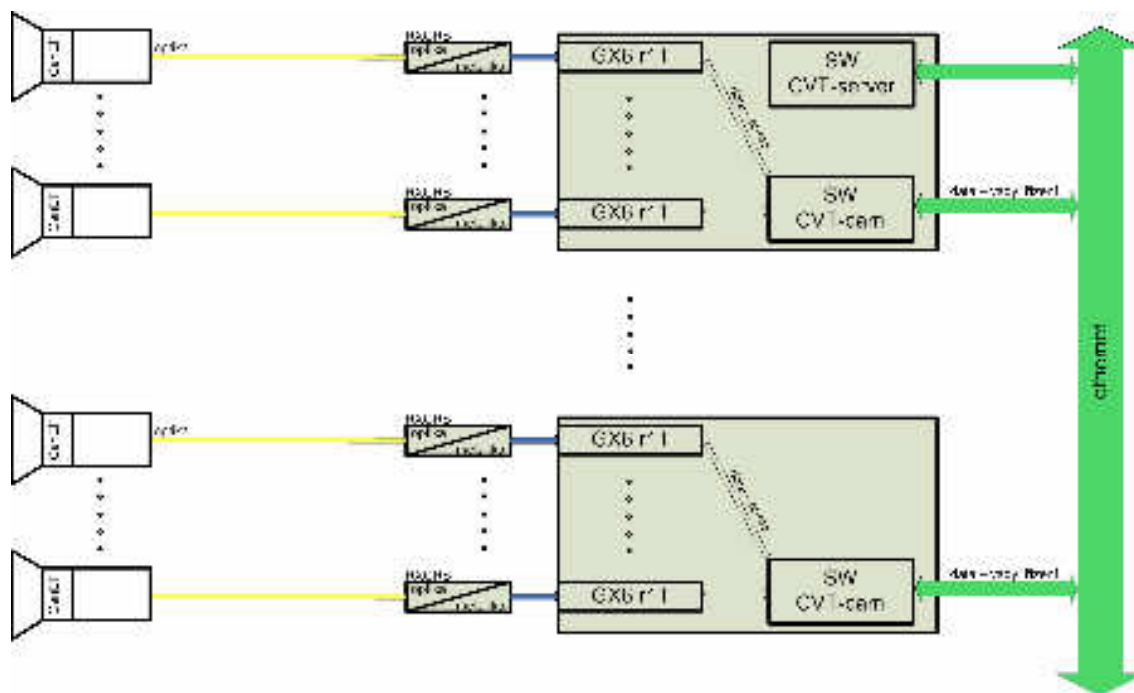
Modul CanEF je řízen po sériové lince sadou příkazů, které jsem navrhnul s ohledem na univerzálnost - pro případ použití i v jiných projektech. Řízení několika modulů CanEF po jediné sériové lince je zajištěno přiřazením jednoznačného ID každému z nich. Komunikační protokol, elektrické schéma a sada příkazů modulu CanEF jsou uvedeny v příloze.

5.3 Celkové uspořádání zařízení

Na základě zadání, rozboru charakteru chyb, s respektováním technických omezení a požadovaného rozlišení, bylo stanoveno, že zařízení je nutné osadit dvěma čtveřicemi kamer. Jedna čtveřice slouží pro transmisní druhá pro difúzní osvětlení. Každou čtveřici kamer obsluhuje jeden počítač⁴. Na okraj uvádím, že každý z počítačů zpracovává obrazová data přicházející s rychlostí 112 MB/s.

Vizuální zařízení jsem navrhl jako distribuovaný systém propojený pomocí TCP/IP socketů. Na lokální síti je spuštěn softwarový arbitr CVT-server, který ovládá jednotlivé softwarové moduly CVT-cam. Na ty jsou potom přímo napojeny maximálně 4 digitalizační karty GX6 r.11 vzhledem k omezení datové propustnosti PCI sběrnice. Systém s takovouto koncepcí je možné libovolně rozšiřovat a konfigurovat – data z každé kamery mohou být zpracovávány algoritmy s individuálním nastavením.

⁴ Běžné uspořádání při velkých datových tocích a požadavcích na jejich on-line zpracování je jeden počítač na jednu kameru. Díky znalosti všech komponent systému na nejnižší úrovni se našim systémovým programátorům povedlo tento poměr zlepšit a tím podstatně zjednodušit systém jako celek.



Obr. 5.5 Koncepte systému – jediný arbitr (CVT-server) umístěný na libovolném počítači dohlíží nad chodem všech modulů CVT-cam. Detekované vady jsou odesílány do arbitru přes TCP/IP sokety

5.4 Umístění systému do výrobní linky

Celý systém je umístěn na konci výrobní linky, těsně před návinem materiálu do rolí. Díky tomu může odchytnout defekty vzniklé v kterékoliv výrobní fázi.

Při detekci vad na nekonečných páslech zpravidla nelze okamžitě reagovat na výskyt nežádoucích vad zastavením linky a vyřazením vadné části výrobku. Detekované vady se lokalizují a archivují. Zaznamenaný protokol umožní rozhodnout o vhodném rozvržení řezacích nožů při dělení role na jednotlivé výměny tak, aby neobsahovaly nežádoucí vady⁵.

⁵ Po navinutí role v délce asi 15 000 m podle gramáže se tato dělí na užší pásy bez vad. Jejich šířka závisí od toho, co se z nich bude vyrábět. Zbytky s vadami se recyklují, vracejí se do taveniny.



Obr. 5.6 Fotografie systému instalovaného na výrobní lince netkaných textilií, konfigurace s osmi kamerami, transmisním i difúzním osvětlením

6 Videosignál a jeho předzpracování

6.1 Vlastnosti obrazu

Vzhledem k povaze snímané scény, způsobu osvětlení a parametrům kamery je snímaný obraz zatížen několika nepříznivými jevy, které bude nutné eliminovat, aby se zjednodušily algoritmy pro detekci vad a zvýšila se spolehlivost systému. Jedná se zejména o :

- aditivní šum. Má náhodný charakter a relativně velkou úroveň – po digitalizaci se lze spolehnout na rozlišení jasových úrovní na 6-7 bitů. Největší podíl na tom má to, že kamery pracují - vzhledem k vysokým požadavkům na intenzitu osvětlení - na hranici citlivosti CCD snímačů. Snad by jej bylo možné částečně eliminovat s využitím morfologických vlastností netkaných textilií, ale výsledek by asi neodpovídal vynaložené práci ani zvýšeným nárokům na výpočetní kapacitu systému. Problém byl vyřešen experimentální optimalizací polohy kamer a osvětlovací soustavy vzhledem ke snímané tkanině tak, aby bylo dosaženo uspokojivě kontrastního zobrazení zájmových oblastí,
- nerovnoměrný osvit textilie po celé snímané šířce. Obecně je technicky velmi obtížné docílit ideálně rovnoměrného osvětlení v tak široké snímané oblasti. U použitých výbojek je to stejné, nezáří po celé délce homogenně. Efekt se násobí působením vinětace CCD čipu a objektivu. Při aktivní šířce CCD čipu 36 mm je již vliv vinětace velmi patrný. Osvit kolísá i vlivem vertikálního chvění textilie, která je vzdálena jen asi 20 mm od zdroje světla. Při této vzdálenosti způsobí chvění s výchylkou i jednoho milimetru změnu osvětlení asi o 10%. Tyto vlivy lze účinně kompenzovat,
- světlo zářivek je modulováno přibližně harmonickým střídavým napětím při jejich napájení ze sítě. Hloubka modulace je přibližně 10-30%. Tuto modulaci lze rovněž účinně kompenzovat.

Pokud by obraz nebyl zatížen žádnou z výše popsaných negativních vlastností, pro dostatečně spolehlivé algoritmy by bylo možno použít prostého prahování s pevně nastavenou hodnotou prahů. Samotná implementace by poté mohla být například přímo v signálovém procesoru digitalizačních karet, výpočetní náročnost takových algoritmů by byla velmi nízká.

Cílem je však přizpůsobit se reálným podmínkám snímání dat a reagovat tak na nepříznivé aspekty ovlivňující charakter sejmutého obrazu – pokusit se rekonstruovat

obraz degradovaný vinětací objektivu, nerovnoměrností osvitu, nestálou plošnou světelností materiálu a kolísáním osvětlení.

Pro účely kompenzace uvedených vlivů bude v této úloze postačující popsat videosignál jednoduchým modelem :

$$b(x, y) = b_0(x, y) \cdot g(x, y) \cdot h(y) + s(x, y) \quad (6.1)$$

kde $b(x, y) \dots$ reálný videosignál,

$b_0(x, y) \dots$ ideální videosignál,

$g(x, y) \dots$ funkce popisující nerovnoměrnost osvětlení,

$h(y) \dots$ funkce popisující časovou nestálost osvětlení v řádku,

$s(x, y) \dots$ aditivní šum,

$y \dots$ index řádku (posun materiálu)

$x \dots$ pozice v řádku.

Vzhledem k separabilnosti lze vliv nerovností osvětlení v řádku a časové nestálosti osvětlení kompenzovat zvlášť. Vliv šumu byl potlačen na únosnou míru na hardwarové úrovni, proto nebude dále uváděn.

6.2 Eliminace vlivu modulace zdroje osvětlení síťovým napětím

Napájení zdroje osvětlení síťovým napětím má za následek modulaci videosignálu kmitočtem dvojnásobným oproti kmitočtu sítě. Vzhledem k tomu, že řádkový kmitočet kamery je mnohonásobně vyšší než kmitočet sítě, projeví se to podélným zvlněním obrazu (Obr. 6.1).

Spektrální analýzou modulační křivky bylo zjištěno, že ji pro tyto účely je možné aproximovat harmonickým signálem, složky s jiným kmitočtem než 100 Hz měly v energetické bilanci signálu zanedbatelné zastoupení.

Modulaci videosignálu lze vyjádřit vztahem

$$h(y) = (1 - K \sin(\omega t + \varphi)) \quad (6.2)$$

$$b(n, x) = b_0(n, x) \cdot g(x, y) \cdot (1 - K \sin(\omega t + \varphi)) \quad (6.3)$$

kde K hloubka modulace,
 $\omega t, \varphi$ úhlový kmitočet a fáze modulačního signálu.

Modulace se odstraní dělením videosignálu výrazem $(1 - K \sin(\omega t + \varphi))$. Parametry K, φ lze nalézt různými způsoby, jako příklad uvádím klasickou spektrální analýzu s DFT, kterou lze pro tento případ zjednodušit jen do zájmových harmonických složek. Odvození základních vztahů pro identifikaci parametrů K, φ je uvedeno níže.

$$t = n \cdot t_{LINE} = \frac{y}{f_{LINE}} \quad (6.4)$$

t_{LINE} délka řádku kamery [s],

f_{LINE} řádkový kmitočet kamer [Hz],

Definujme střední hodnotu jasové funkce $b_{AVG}(y)$ na y -tém řádku který má délku X jako

$$\begin{aligned} b_{AVG}(y) &= \frac{1}{X} \sum_{x=0}^X b(x, y) = \frac{1}{X} \sum_{x=0}^X b_0(x, y) \cdot g(x) \cdot (1 - K \sin(\frac{2\pi f_K y}{f_{LINE}} + \varphi)) = \\ &= \frac{1}{X} \sum_{x=0}^X b_0(x, y) \cdot g(x) - \frac{1}{X} \sum_{x=0}^X b_0(x, y) \cdot g(x) \cdot K \sin(\frac{2\pi f_K y}{f_{LINE}} + \varphi) = \\ &= b_{0AVG}(y) - b_{0AVG}(y) \cdot K \sin(\frac{2\pi f_K y}{f_{LINE}} + \varphi) \end{aligned} \quad (6.5)$$

$b_{AVG}(y)$ střední hodnota jasu na řádku y ,

$b_{0AVG}(y)$ střední hodnota jasu na řádku y bez zvlnění

f_K kmitočet modulačního signálu.

Z praktických důvodů a kvůli omezení daných vlastností použitých digitalizačních karet jsou data z řádkových kamer zpracovávána po blocích s délkou 500 řádků (N). Průběh nežádoucího zvlnění v bloku dat o N řádcích bude mít po rozkladu pomocí DFT obecně N nenulových (a pravděpodobně i významných) harmonických složek.

Pokud však provedeme DFT na zmenšeném bloku dat tak, aby $N = k \cdot \frac{f_{LINE}}{f_K}$ odpovídalo celému počtu k period zvlnění, potom již stačí nalézt pouze k -tou harmonickou složku.

Obecný výpočet DFT je

$$X(k) = \sum_{n=0}^N f(n) \cdot e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (6.6)$$

po rozkladu na sinovou a kosinovou složku

$$X(k) = \sum_{n=0}^N f(n) \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \sum_{n=0}^N f(n) \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) = A(k) - j \cdot B(k) \quad (6.7)$$

a po aplikaci na náš případ

$$A(k) = \sum_{y=0}^{k \frac{f_{LINE}}{f_K}} b_{AVG}(y) \cos\left(\frac{2\pi ky}{k \frac{f_{LINE}}{f_K}}\right) = \sum_{y=0}^{k \frac{f_{LINE}}{f_K}} b_{AVG}(y) \cos\left(\frac{2\pi y f_K}{f_{LINE}}\right) \quad (6.8)$$

$$B(k) = \sum_{y=0}^{k \frac{f_{LINE}}{f_K}} b_{AVG}(y) \sin\left(\frac{2\pi ky}{k \frac{f_{LINE}}{f_K}}\right) = \sum_{y=0}^{k \frac{f_{LINE}}{f_K}} b_{AVG}(y) \sin\left(\frac{2\pi y f_K}{f_{LINE}}\right) \quad (6.9)$$

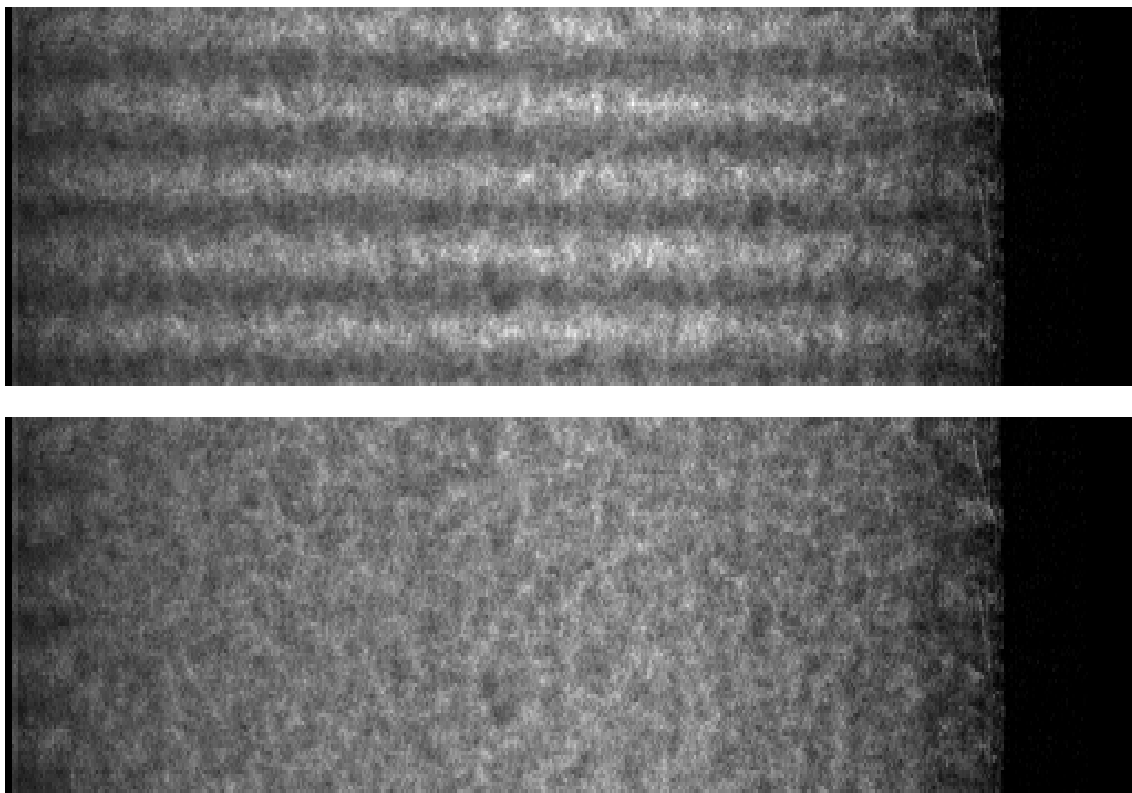
Z hodnot $A(k)$ a $B(k)$ je potom možné získat hledaný koeficient K a φ jako

$$K = \frac{k \frac{f_{LINE}}{f_K}}{\sum_{y=0}^{k \frac{f_{LINE}}{f_K}} b_{AVG}(y)} \sqrt{\left(A(k) \frac{f_K}{k \cdot f_{LINE}}\right)^2 + \left(B(k) \frac{f_K}{k \cdot f_{LINE}}\right)^2} = \frac{\sqrt{A(k)^2 + B(k)^2}}{\sum_{y=0}^{k \frac{f_{LINE}}{f_K}} b_{AVG}(y)} \quad (6.10)$$

$$\varphi = \arctan\left(-\frac{A(k)}{B(k)}\right) \quad (6.11)$$

Při implementaci tohoto výpočtu se využívá několik zjednodušení pro snížení výpočetní náročnosti :

- koeficient k (index kompenzované harmonické složky) je vzhledem ke stabilitě kmitočtu sítě, řádkovému kmitočtu kamery f_{LINE} (10900Hz) a velikosti zpracovávaného bloku N (500 řádků) konstantní a má hodnotu 4,
- hodnota $\frac{2\pi f_K}{f_{LINE}}$ je konstantou a proto je v algoritmu vyčíslena jen jednou při inicializaci parametrů.



Obr. 6.1 Obraz před a po kompenzaci zvlnění

Kompenzace na Obr. 6.1 proběhla jen v zájmové oblasti měření vad (symbolicky ohraničena tenkými svislými linkami), mimo tuto oblast se kompenzace z časových důvodů neprovádí. Na kompenzované oblasti je patrný mírný pozůstatek zvlnění, který je způsoben chybami při výpočtech s celočíselnými proměnnými – velká část výpočtů probíhá z důvodů časové optimalizace převážně s celočíselnými operandy – a také tím, že jako model zvlnění byla uvažována ideální sinusoida. Ve skutečnosti toto zvlnění neobsahuje jen jednu harmonickou složku – dosvit luminoforu, nelineární závislost světelné intenzity zářivky na proudové hustotě. Demonstrovaná kompenzace je však dostačující pro další výpočet.

6.3 Kalibrace systému na nerovnoměrné osvětlení

Na nerovnoměrnost osvětlení scény má kromě uvedených vinětací CCD čipu a objektivu a nedokonalosti průběhu intenzity světla výbojky vliv i to, že textilie není opticky homogenní. Vlivem nedokonalosti výrobní technologie gramáž textilie vykazuje náhodné odchylky, které se mění s dlouhou časovou konstantou a systematický pokles směrem k okrajům. Všechny výše uvedené nerovnoměrnosti osvitu se násobí.

Za předpokladu, že popsané nerovnoměrnosti osvitu jsou dostatečně stálé s pozicí a časem, je možno nalézt takovou kompenzační funkci, která by je eliminovala.

$$g(x) = \frac{s(x, y)}{S(y)} \quad (6.12)$$

kde $s(x, y) \dots$ dlouhodobý střední jas bodu x v blízkém okolí řádku y

$S(y) \dots$ dlouhodobý střední jas celého řádku v blízkém okolí y

Pro posouzení dlouhodobého středního jasu v konkrétním bodě x je velmi jednoduché a rychlé použít aritmetický průměr za N řádků.

$$s(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{m=y-N}^y b(x, m) \quad (6.13)$$

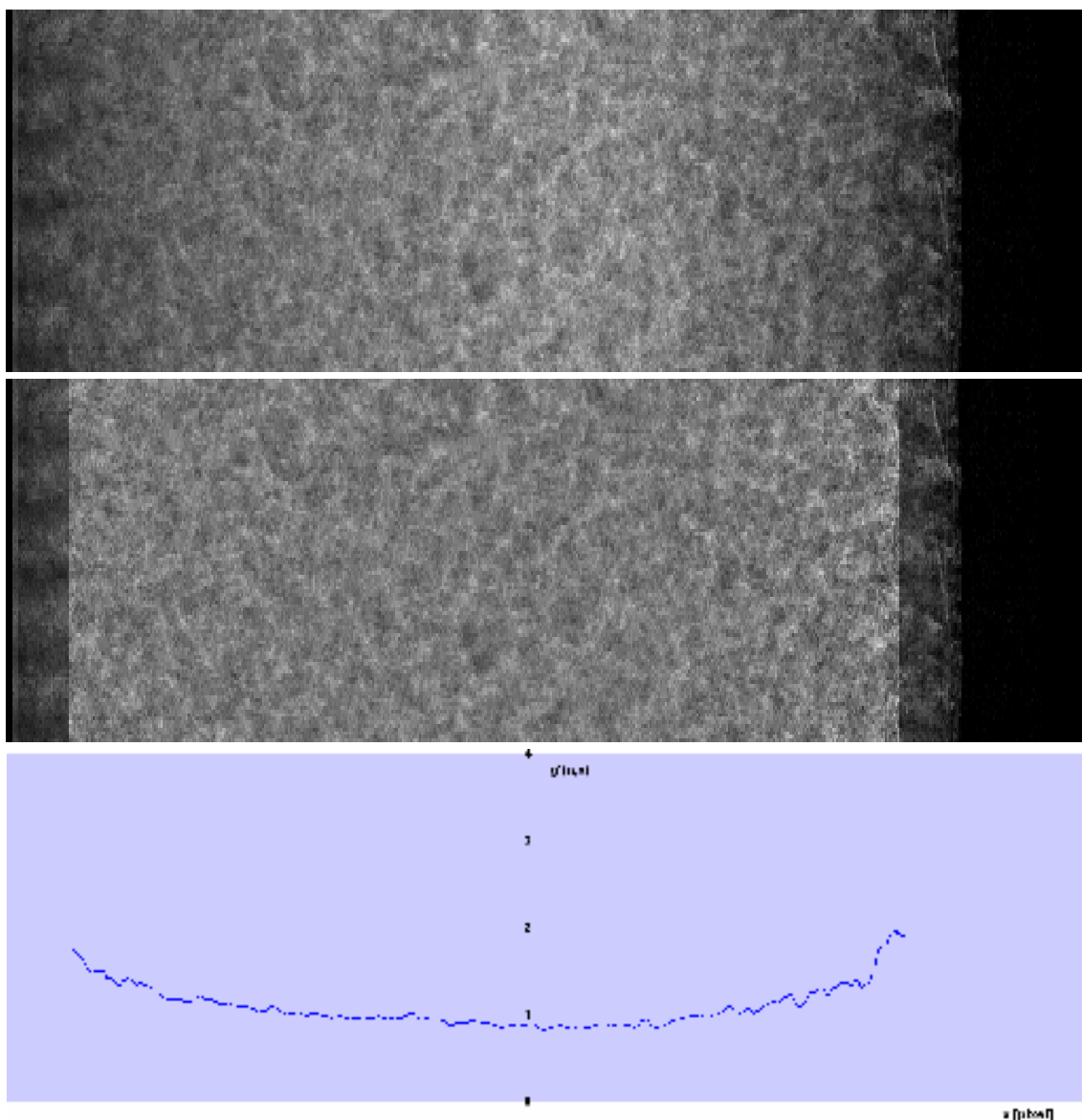
A dlouhodobý jasový průměr ve všech bodech za posledních N řádků (klasický střední jas obrazu) s použitím dříve popsané funkce $b_{AVG}(y)$

$$S(y) = \frac{1}{N} \sum_{m=y-N}^y b_{AVG}(m) \quad (6.14)$$

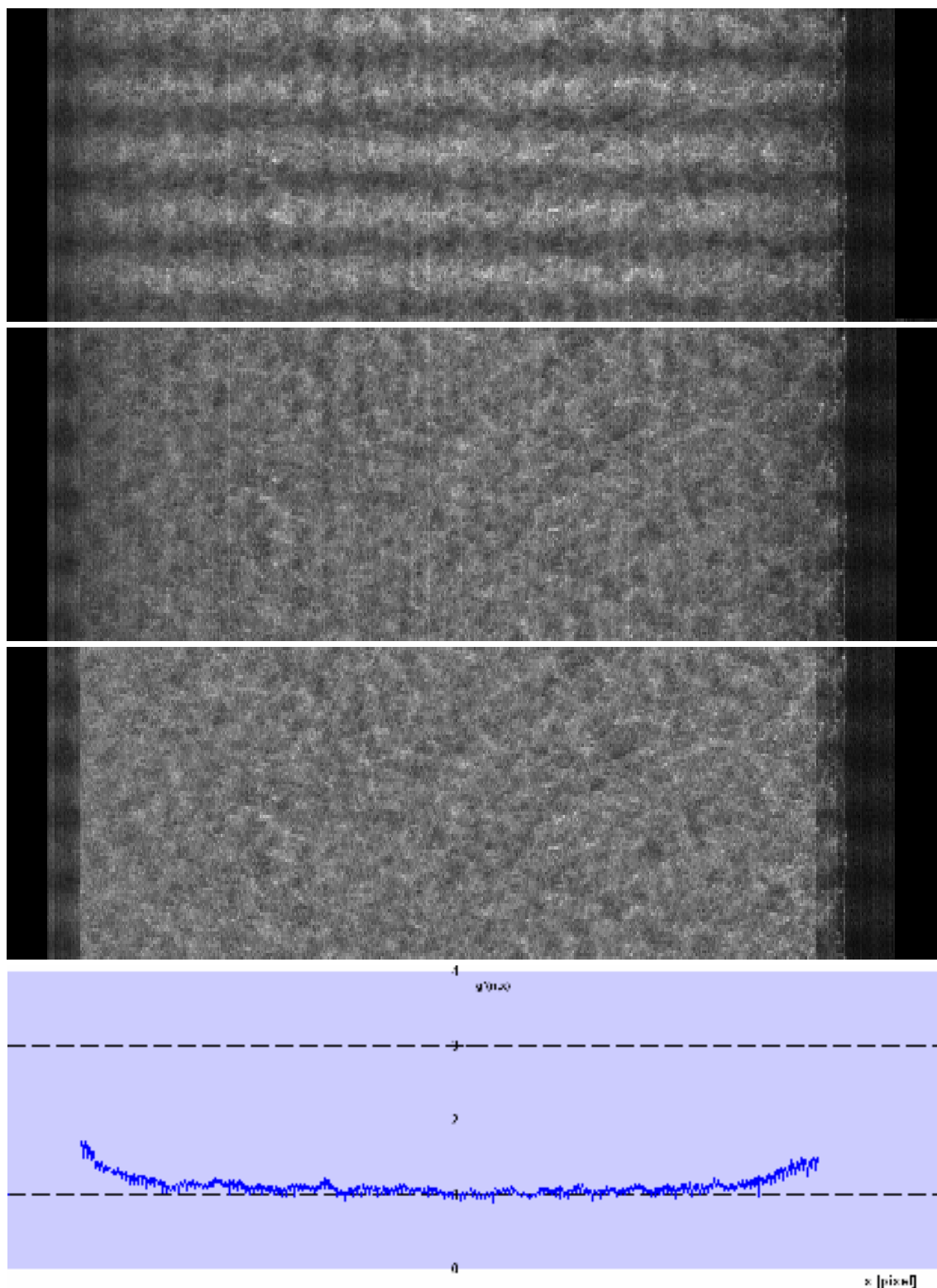
Výsledný výpočet ideálního videosignálu, který není zatížen nerovnoměrností a časovou nestálostí (modulací) osvitů je potom

$$b_0(x, y) = b(x, y) \cdot \frac{1}{g(x, y)} \cdot \frac{1}{h(y)} = \frac{b(x, y)}{1 - K \sin\left(\frac{2\pi f_K y}{f_{LINE}} + \varphi\right)} \cdot \frac{S(y)}{s(x, y)} \quad (6.15)$$

Výpočet kompenzační funkce $g(x)$ je algoritmicky časově dosti náročný, proto jsem zvolil v rámci optimalizace jednorázový výpočet hodnot $\frac{1}{g(x, y)}$ při začátku měření a potom je v občasných intervalech (1x za 30 s) prováděn dopočet kompenzační funkce $\frac{1}{g(x, y)}$ pro aktuální snímek a připočtení k předešlému výpočtu s koeficientem zapomínání (0,95).



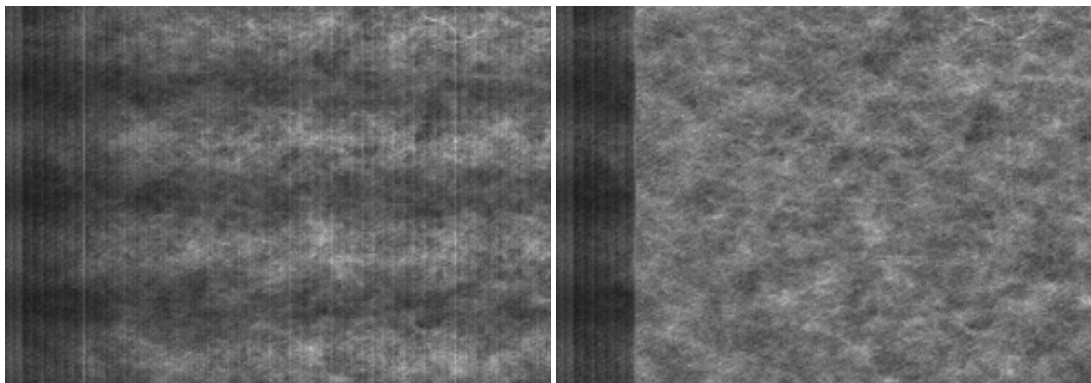
Obr. 6.2 Snímek před a po kompenzaci na nerovnoměrné osvětlení a ukázka kompenzační funkce (pro ilustraci jen krátkodobý průměr bez koeficientu zapomínání)



Obr. 6.3 Obraz před a po kompenzaci na zvlnění a na nerovnost osvětlení (kompenzační funkce - krátkodobý průměr)

Na Obr. 6.3 a Obr. 6.4 je originální obraz pořízen kamerou, která měla závadu – přeslechy mezi čítači digitálního řídicího obvodu (programovatelné hradlové pole Lattice) a mezi analogovou částí. Tyto přeslechy způsobovaly pravidelné rušení analogového signálu vždy ve stejné pozici na řádku (svislé čáry na původním obrázku).

Bez kompenzace obrazu na nerovnoměrné osvětlení by obraz z této kamery byl pro algoritmičtý výpočet asi nepoužitelný. Po aplikaci kompenzační funkce je obraz bez problémů použitelný pro další algoritmy.



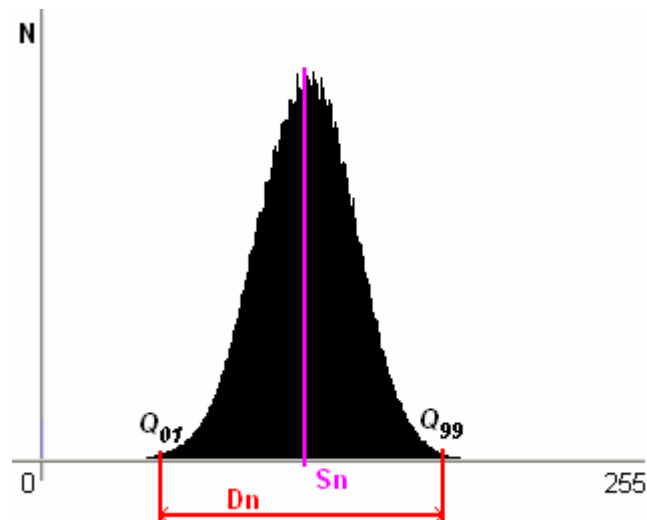
Obr. 6.4 Obraz (detail cca 250 mm x 200 mm) před a po kompenzaci na nerovnoměrné osvětlení z výše zmiňované kamery

6.4 Ekvalizace jasových charakteristik obrazu

Optické vlastnosti materiálu jsou při nestálé gramáži, rychlosti a technologii výroby velmi odlišné – mění se celková světlost materiálu, rovnoměrnost nanesení materiálu v ploše a vlivem měnící se rychlosti výrobní linky i měřítko obrazu ve směru pohybu pásu. Tyto vlivy lze kompenzovat řízením clony objektivu a nastavením zisku a digitalizačního rámce obrazového digitizéru. Jak bylo naznačeno v kapitole 5.2, pro pokrytí celého plánovaného spektra výroby je nutné zajistit minimálně 10-ti násobnou světelnou dynamiku. Tato dynamika je zajištěna řízením clony objektivů pomocí modulu CanEF a řízením analogového zisku digitalizačních karet.

Netkaná textilie je tvořena náhodně proloženými vlákny [16], histogram jasových hodnot jejího obrazu má přibližně normální rozložení.

Pro dostatečný popis takového rozložení postačí dva parametry : střední hodnota μ a směrodatná odchylka σ . Histogram jasových hodnot netkané textilie, získaný v průběhu předzpracování obrazu se používá i pro jiné účely. Z důvodu pozdější detekce vad (kapitola 7.2) je vhodné jej popsat dvěma parametry – středem S a šířkou D .



Obr. 6.5 Histogram jasových hodnot obrazu netkané textilie

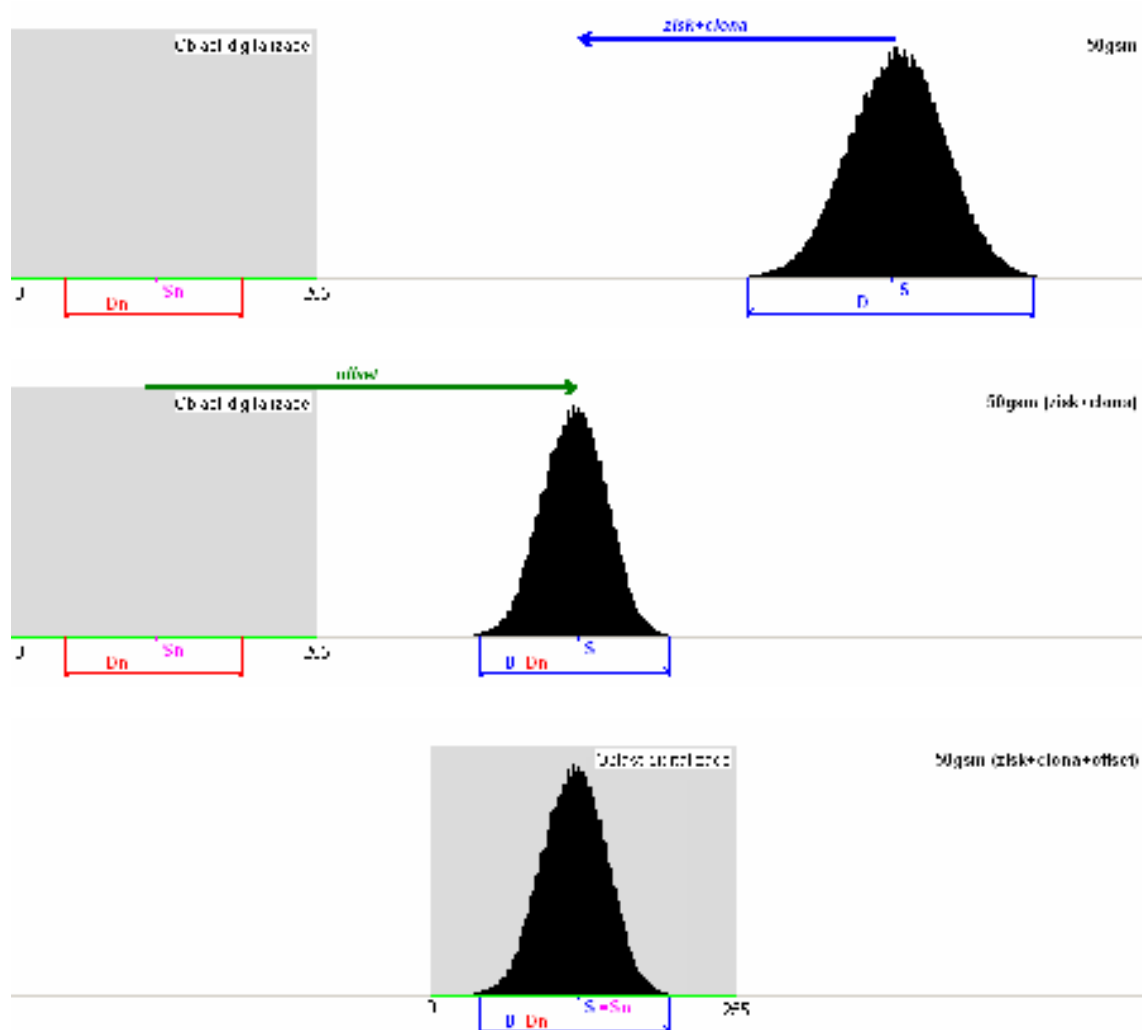
Z distribuční funkce rozdělení jasových hodnot obrazu netkané textilie se vypočtou zájmové percentily Q_i , ze kterých je odvozena hodnota středu histogramu S a mezipercentilového rozpětí histogramu D , které popisují histogram rozložení jasu

$S = Q_{50} \dots\dots$ střed (pozice) histogramu,

$D = Q_{99} - Q_{01} \dots\dots$ mezipercentilové rozpětí histogramu

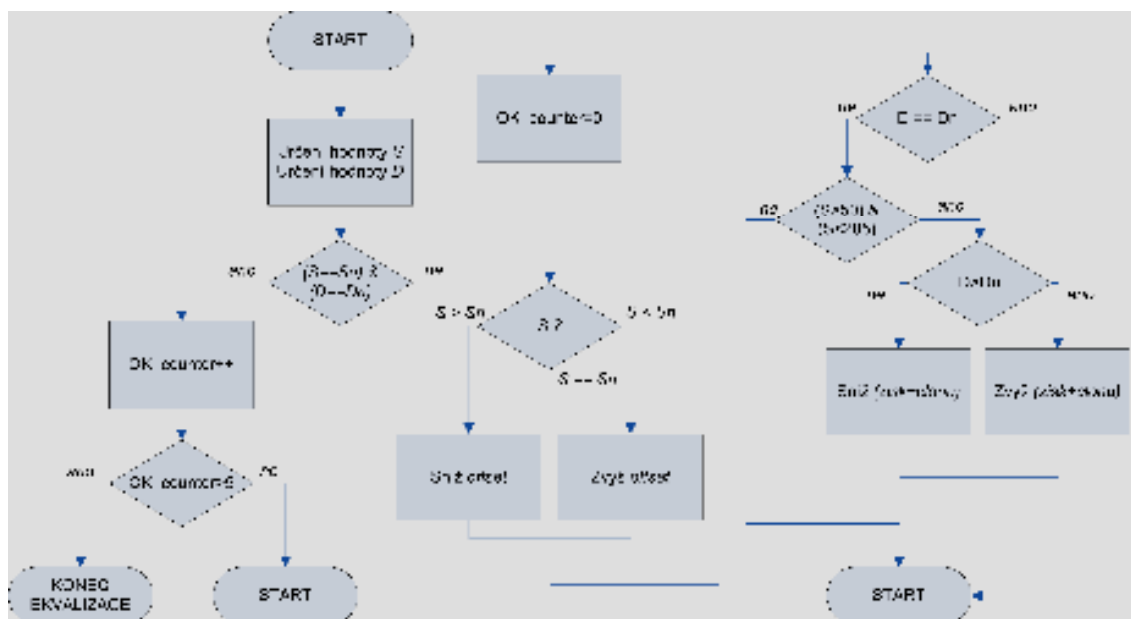
Použité obrazové digitizéry GX6 rev.11 mají možnost řízení analogového zisku (*gain*), navíc je zde možnost měnit oblast digitalizace posuvem vstupního analogového signálu (*offset*). Na úroveň videosignálu má vliv i clona.

Řízením clony, analogového zesílení a posuvem digitalizačního rámce je možné nastavit obraz tak, aby jeho histogram odpovídal nominálním parametrům $S = S_n$ a $D = D_n$.



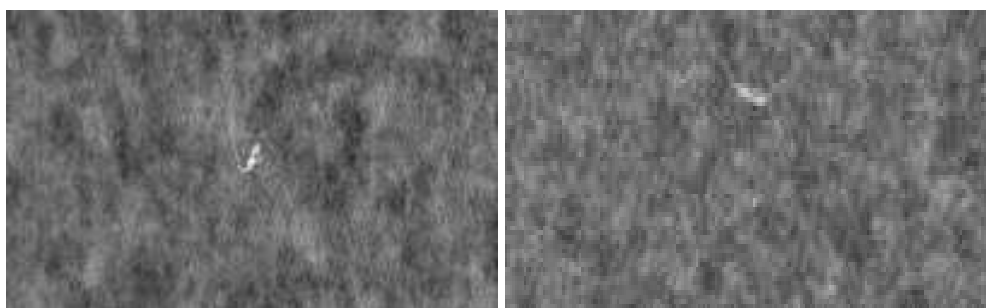
Obr. 6.6 Postup ekvalizace obrazu při gramáži 50g/m^2

Na obrázku Obr. 6.6 je znázorněn postup ekvalizace obrazu u netkané textilie s plošnou gramáží 50 g/m^2 . Zobrazen je jen teoretický postup, protože histogram mimo oblast digitalizace nemůže být určen. Proto se postup ekvalizace osvětlení řídí následujícím vývojovým diagramem.



Obr. 6.7 Postup ekvalizace obrazu

Analogový zisk je řízen v rozmezí 1,0-3,0 (experimentálně zjištěný rozsah, kdy je úroveň šumu v digitalizovaném obraze ještě přijatelná). Na systém ekvalizace obrazu lze pohlížet jako na klasickou regulační soustavu. Při návrhu řídicího algoritmu je nutné respektovat všechny požadavky kladené na regulátory. V tomto případě se použilo pro základní nastavení parametrů soustavy reléového regulátoru s hysterezí.



Obr. 6.8 Vlevo je snímek netkané textilie s gramáží 50g/m² při difúzním osvětlení, vpravo textilie s gramáží 12g/m². I když světlost obou materiálů je odlišná, jejich snímky jsou po ekvalizaci srovnatelné. Na levém snímku je patrná gravura – pravidelný obtisk (cca 1,5 mm x 1,5 mm) kalandrovacího válce, který je viditelný jen u vyšších gramáží.

Snímky na obr. 6.8 prošly všemi fázemi předzpracování popsanými v kapitole 6. Díky pečlivé unifikaci vlastností obrazu na hardwarové i softwarové úrovni se podařilo upravit jej tak, že jeho vlastnosti prakticky nezávisí na optických vlastnostech snímaného materiálu a hledané vady jsou dostatečně kontrastní. Tím, jak bude ukázáno dále, se zjednoduší nejen návrh, ale i složitost detektoru a klasifikátoru vad. V důsledku toho se zvýší spolehlivost systému jako celku při současném snížení požadavků na jeho výpočetní kapacitu.

7 Detekce a klasifikace vad

7.1 Stanovení požadavků

Při výrobě netkané textilie vznikají 3 základní typy vad :

Díry – (detekované kamerou s difúzním osvětlením) místa, kde je podprůměrné množství materiálu nebo kde materiál chybí úplně. Jejich příčinou je většinou mechanické protržení textilie nebo odklonění velkého množství vláken při nanášení na pás. Při transmisním způsobu osvětlení jsou to místa, kde je světlo procházející materiálem utlumené nečistotou (olej, chuchvalce prachu, hmyz) nebo nepřípustnou nehomogenitou materiálu.

Výkapky – (detekované kamerou s difúzním osvětlením) místa, kde je nadprůměrné množství materiálu. Vznikají hlavně při přetržení jednotlivých vláken blízko kapilár, při špatné cirkulaci tažného vzduchu nebo při dosednutí a zalisování chomáče vláken na pás. Při difúzním způsobu osvětlení má v těchto místech materiál zvýšenou světelnou intenzitu kvůli většímu množství opticky difúzního materiálu.

Zalisovaný cizí předmět (pracovní název „špína“) - (detekované kamerou s transmisním osvětlením) místa, kde je v materiálu zalisovaná nečistota, cizí předmět nebo nadměrné množství materiálu. Při transmisním způsobu osvětlení jsou to místa, kde je světlo procházející materiálem utlumené nečistotou (olej, chuchvalce prachu, hmyz) nebo velkým množstvím netkané textilie.

I když to zní banálně, pro stanovení technických parametrů (které zpravidla bývají součástí technické přílohy ke smlouvě o dílo) je nutné explicitně vyjádřit, že systém je určen jen pro hledání opticky detekovatelných vad. V parametrech se obvykle udává kontrast a morfologické vlastnosti vad, které má systém zachytit.

Pro tento konkrétní případ byla ve shodě s uživatelem stanovena tato kritéria :

- minimální rozměr vady v příčném směru 1,0 mm při sledované šířce 4200 mm,
- minimální rozměr vady v podélném směru 1,5 mm při rychlosti výroby do 10000 mm/s,

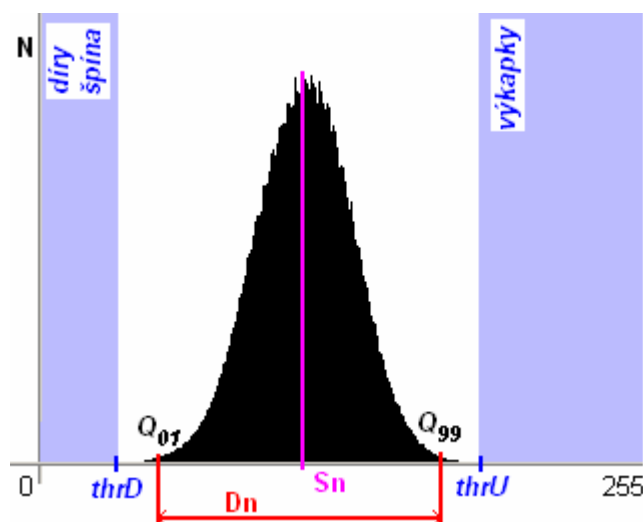
- minimální plocha vady 2 mm^2 ,
- minimální optický kontrast vady 20% vzhledem k okolí.

Podotýkám, že hodnoty těchto parametrů byly stanoveny pro konkrétní způsob snímání a osvětlení obrazu, které byly odladěny v rámci studie zaměřené na zjištění realizovatelnosti projektu.

Aby prohledávaná oblast byla vyhodnocena jako vada, musí splnit současně všechna uvedená kritéria. Obraz oblasti s detekovanou vadou je ukládán a později podroben dalšímu zpracování.

7.2 Detekce vad

V této úloze je detektor vad založen na tříúrovňovém prahování s pohyblivou hodnotou prahů (thr_D , thr_U), kterou se nastavuje citlivost algoritmu. Z technických podmínek, kde byly definovány požadavky na minimální kontrast vad, vyplývá, že prahové hodnoty pro detekci jednotlivých typů vad budou v okolí okrajů histogramu jasových hodnot ekvalizovaného obrazu (Q_{01} a Q_{99}).



Obr. 7.1 Hodnoty prahů pro detekci vad – zobrazeno v histogramu rozložení jasových hodnot ekvalizovaného obrazu

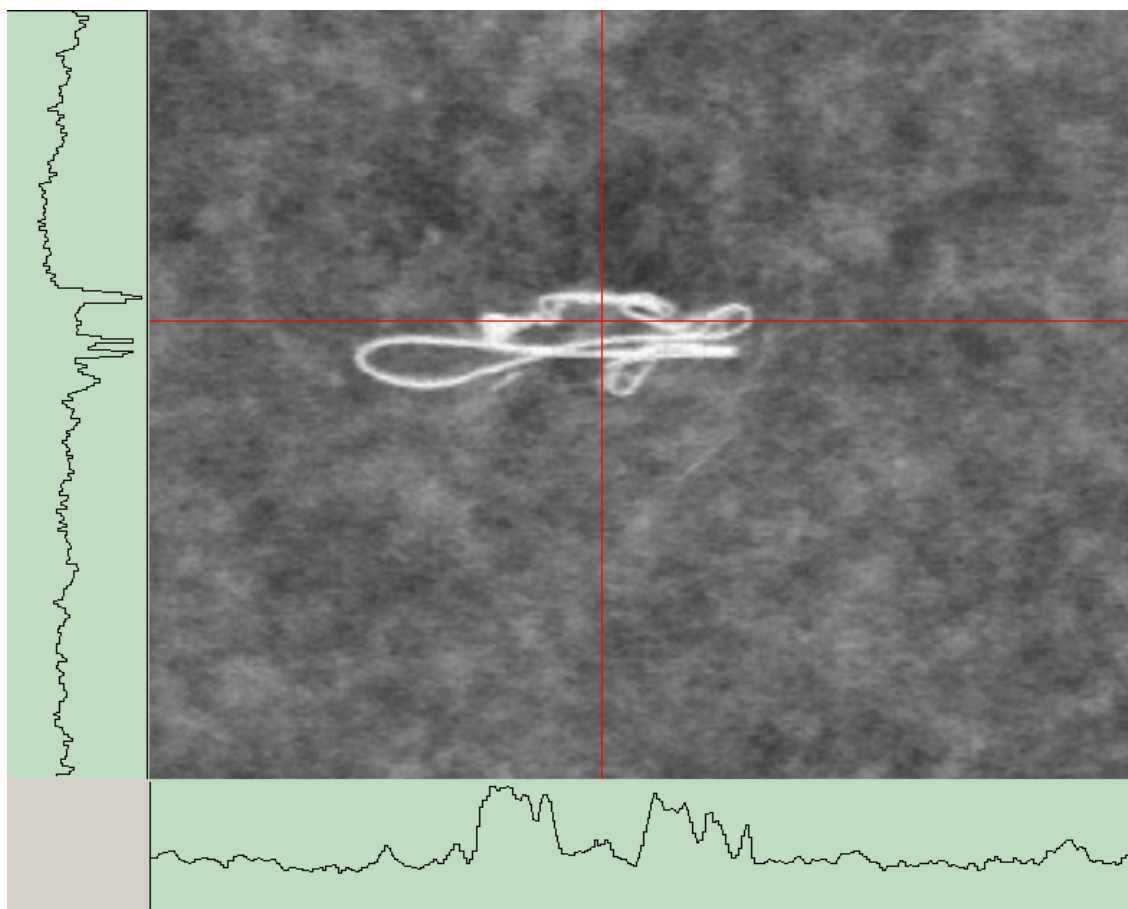
Potom

$$thr_D = Sn - \frac{Dn}{2} - K_1 \text{ a } thr_U = Sn - \frac{Dn}{2} - K_2 \quad (7.1)$$

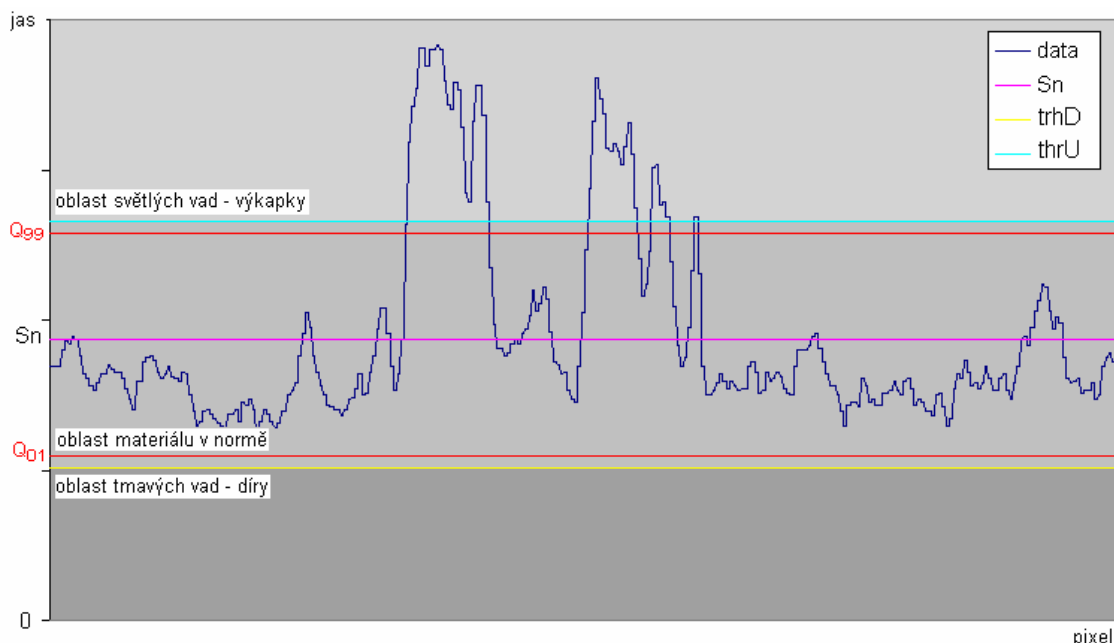
thr_D , thr_U ... hodnoty prahů,

K_1 , K_2 ... citlivosti algoritmu (vzdálenost prahů od hodnot Q_{01} a Q_{99}).

Hodnoty K_1 a K_2 byly určeny heuristicky a jsou odlišné pro různé výrobní programy.



Obr. 7.2 Horizontální a vertikální řez obrazu vady



Obr. 7.3 Hodnoty prahů pro hledání vad – zobrazeno v jasovém řezu obrazu s vadou (horizontální řez vady z Obr. 7.1)

Na Obr. 7.2 a Obr. 7.3 jsou zobrazeny jasové řezy vadou. Algoritmus detekce vad je navržen jako jednorůchodový – prochází se postupně jednotlivé body na řádku. V případě nalezení úseků, které leží mimo oblast $thr_D \div thr_U$, jsou jejich hranice považovány za začátky a konce příznaku potenciální vady. Tyto příznaky nesou informaci o případném výskytu vady. Jestli se skutečně jedná o vadu se rozhodne na základě výsledků shlukové analýzy.

7.3 Shluková analýza

Při průchodu obrazových dat jednoho řádku hlavním cyklem algoritmu jsou nalezena místa výskytu potenciální vady v jednotlivých řádcích. Parametry těchto příznaků (začátek, konec, rozložení jasů) jsou vloženy do průběžného zásobníku, kde se analyzují a spojují do větších celků shlukovou analýzou.

Je použita jednoduchá shluková analýza, kdy příslušnost daného příznaku do existující skupiny prvků je dána pouze jeho absolutní vzdáleností od této skupiny. Každému prvku patřícímu do skupiny jsou přiřazeny tyto hodnoty :

- Y – pozice řádku,
- $X1, X2$ – začátek a konec na řádku,
- histogram rozložení jasů v bodech mezi $X1$ a $X2$.

Jsou rozlišovány příznaky pod hodnotou prahu thr_D a nad hodnotou prahu thr_U , které se vzájemně neshlukují. Zároveň se neshlukují příznaky nalezené kamerami s různým typem osvětlení (difúzní nebo transmisní). Pokud je zjištěno, že vzdálenost příznaku od existující skupiny (shluku) příznaků je menší, než je nastavený limit shlukování vad (cca 30 mm), je tento příznak vložen do existujícího shluku a jeho parametry (rozměry a histogram rozložení jasu) jsou přidány do společného vektoru parametrů.

Pokud není nalezen žádný blízký shluk, příznak vytvoří nový shluk a stane se jeho prvním členem. Po skončení analýzy každého řádku se zkontroluje, jestli není v zásobníku shluk, do kterého již nemůže vstupovat žádný další prvek (jeho vzdálenost od aktuálně zpracovávaného řádku je větší než limit pro shlukování). V případě pozitivního výskytu takového shluku jsou spočteny parametry :

- $X1, X2, Y1, Y2$ – souřadnice definující polohu vady a rozměr opsaného obdélníku,
- $Area$ – skutečná plocha zaujímaná vadou,
- $FillFactor$ – poměr plochy vady k ploše opsaného čtverce,
- $Qmin, Qmax, Qavg$ – minimální, maximální a střední jas vady,
- $Q25, Q50, Q75$ – jasové kvartily histogramu.

Na základě rozměrů vady a skutečné plochy je rozhodnuto, jestli bude vada zaznamenána nebo ignorována. Ostatní parametry slouží pro pozdější klasifikaci vad neuronovou sítí.

Záznam o vadě je reprezentován jedinou položkou v databázi - soubor ve formátu JPG. Tento soubor obsahuje kromě výřezu části obrazu s vadou a blízkým okolím také dodatečné informace :

- souřadnice vady (pozice v návinu a vzdálenost od okraje netkané textilie),
- přesný datum a čas detekce vady,
- jednoznačnou identifikaci systému a kamery, které vadu zachytily,
- parametry měření, při kterých byla vada detekována (rychlost pásu textilie, nastavení kamer a objektivů, nastavená citlivost algoritmů),
- doplňující parametry o vadě nutné pro další klasifikaci ($Area, FillFactor, Qmin, Qmax, Qavg, Q25, Q50, Q75$).

Tyto dodatečné informace jsou uloženy ve speciálním formátu na konci souboru s obrázkem vady takovým způsobem, že neporušují interní formát JPG souboru. Všechny obrázky vad lze tedy prohlížet jako běžné JPG soubory programem podporujícím tento formát.

7.4 Klasifikace vad

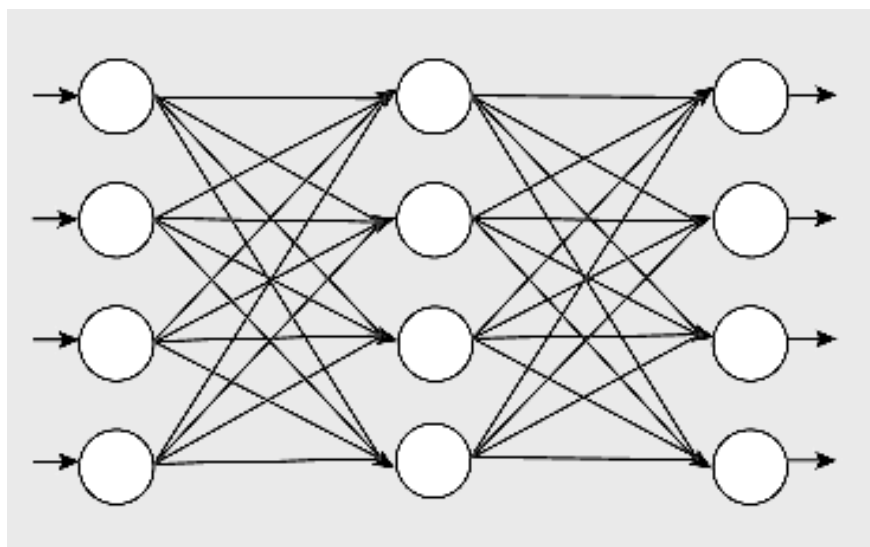
Aby bylo možné rozhodnout o závažnosti nalezených vad, je nutné tyto vady zařadit do uživatelem definovaných tříd. Dále uživatel požaduje možnost vytvořit si v případě potřeby nové skupiny vad (které mohou být specifické např. pro daný materiál či profil výroby), rozlišovat je podle jejich závažnosti (závislé např. na rozměrech, tvaru, kontrastu) a při vyhodnocování kvality výroby přihlížet k četnosti výskytu jednotlivých typů vad. Tím je dána i klasifikační úloha a základní požadavky na klasifikátor :

- učit se na nově předkládané vzory,
- schopnost odebrání špatně zařazených vzorů (vzory nejsou vždy předkládány neomylně),
- možnost přidávání a odebrání tříd klasifikace.

Výrobce rozeznává tři základní typy vad - „díry“, „výkapky“ a „špína“ (kapitola 4.4). Jako příznaky popisující danou třídu vad jsem zvolil rozměry obdélníku vymezujícího vadu, jasové statistiky (Q_{min} , Q_{max} , Q_{avg} , Q_{25} , Q_{50} , Q_{75}) a *FillFactor* (kapitola 7.3).

Ukázalo se, že volba vektoru příznaků byla šťastná a jako klasifikátor bylo možné použít klasickou dopřednou perceptronovou neuronovou síť. Z praktických důvodů byly použity tři klasifikátory – pro každou základní skupinu vad jeden. Tím se zvýší spolehlivost klasifikátorů, urychlí se proces učení i klasifikace.

Struktura použité neuronové sítě je znázorněná na Obr. 7.4. Jedná se o třívrstvou síť, tj. vstupní vrstva, jedna skrytá vrstva a výstupní vrstva. Počet vstupních neuronů je dán velikostí vstupního vektoru parametrů (v našem případě je to 13 vstupů), ve skryté vrstvě je pevně stanovený počet neuronů (20). Tento počet byl odzkoušen jako dostatečný, kdy ještě nedocházelo k přeučení sítě a zároveň síť byla schopna správně klasifikovat s dostatečnou spolehlivostí. Počet výstupních neuronů je proměnný a je dán počtem uživatelsky definovaných tříd.



Obr. 7.4 Struktura dopředné perceptronové neuronové sítě použité pro klasifikaci vad.

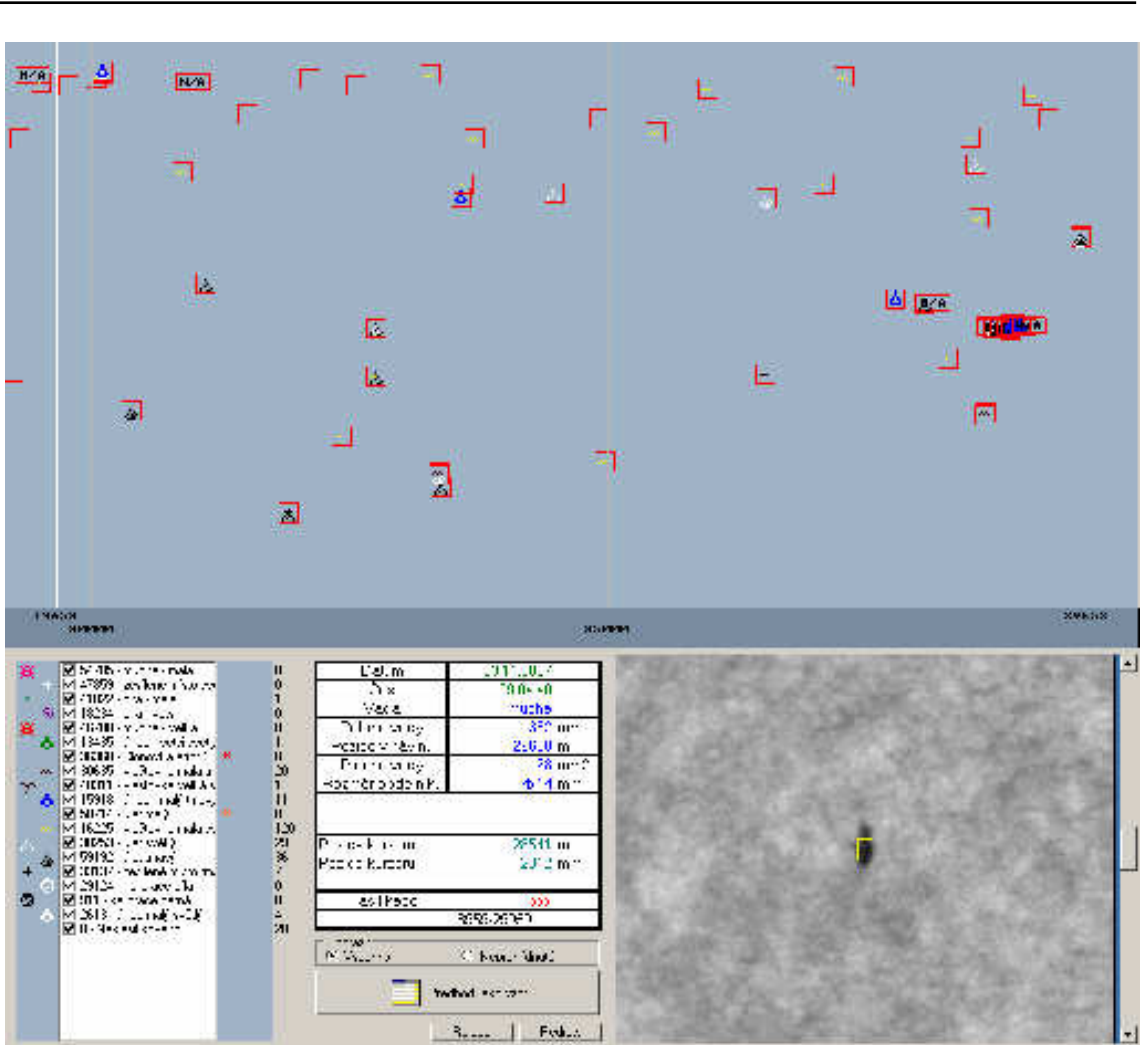
Implementace neuronové sítě byla realizována s využitím FANN (Fast Artificial Neural Network) [12]. Jako učící metoda se osvědčila metoda back-propagation, která vykazovala dostatečnou rychlost učení.

Klasifikace vad je využívána při prohlížení již nalezených vad, kdy není rychlost zpracování kritická. Díky tomu nejsou na klasifikaci (na rozdíl od algoritmů pro detekci vad) kladeny tak přísné požadavky na optimalizaci kódu vzhledem k rychlosti zpracování, nevadí tedy mírně vyšší výpočetní náročnost neuronových sítí ve srovnání s některými jednoduššími klasifikátory. Naučená neuronová síť je schopna klasifikovat řádově desítky tisíc předložených vstupních vektorů za sekundu – vzhledem k velikosti neuronové sítě (13-20-XX) je proces klasifikace již naučenou neuronovou sítí dostatečně rychlý. Doba nutná k naučení sítě se pohybuje řádově od zlomků sekund po maximálně jednotky sekund a závisí hlavně na velikosti trénovací množiny a na požadované přesnosti učení.

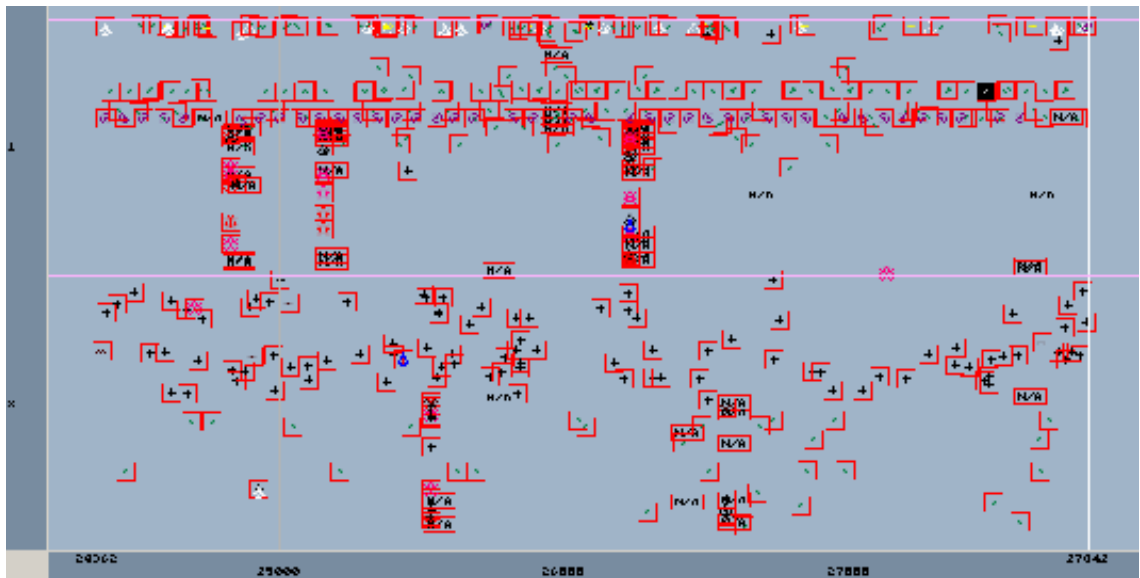
7.5 Reprezentace nalezených vad a jejich další zpracování

Při detekci vad jsou data archivována pro pozdější off-line zpracování a také on-line zobrazována několika způsoby. Při nalezení vady v materiálu je zobrazen snímek s vadou a doplňujícími informacemi. Vizuální systém tak poskytuje informace, na základě kterých může operátor nastavovat parametry výrobní linky jako je teplota taveného materiálu, změna tlaků na kalandrech, změna rychlosti pásu, tlaku tažného vzduchu a tím ovlivňovat kvalitu produkovaného materiálu. Tím může být omezen výskyt vad a zvýšena výtěžnost výroby.

Další možností, jak kontrolovat aktuální výrobu, je grafické zobrazení rozložení vad na výrobním páse. Na základě zjištěné příčné a podélné pozice každé nalezené vady je tato vada zobrazena uživatelem definovanou barvou a grafickou značkou odpovídající třídě, do které byla vada zařazena klasifikátorem popsaným v předchozí kapitole. Takovéto přehledné grafické znázornění může odhalit například opakující se vady nebo jiné souvislosti.



Obr. 7.6 Stránka s grafickým zobrazením nalezených vad klasifikovaných do tříd



Obr. 7.7 Příklad grafického rozložení opakujících se vad (horní třetina grafu). Vodorovné linky symbolizují rozložení nožů (v tomto případě 3 nože = 2 role)

Vyrobený materiál je po průchodu avivážovací jednotkou, sušárnou a kamerovým systémem rozřezán na jednotlivé role a navíjen v požadované metráži pro expedici. Šířky a počet vyráběných rolí jsou přímo závislé na pozicích řezacích nožů. Nebývá výjimkou celkovou vyráběnou šířku ($3500 \div 4200$ mm) rozdělit až na 32 jednotlivých rolí s návinem o délce až 20 000 metrů.

Pro výstupní kontrolu je stěžejní přiřadit nalezené vady do konkrétně nařezaných rolí, aby bylo možné posoudit, kterou roli expedovat nebo kterou dát na recyklaci. K prohlížení nalezených vad je vytvořena jednoúčelová aplikace, která umožňuje práci s databází nalezených vad. Na základě znalosti návinu a šířky jednotlivých rolí a pozice změřených vad systém určí rozložení vad v jednotlivých rolích. Symbolické znázornění takového rozložení je na Obr. 7.8. Každý řádek tabulky odpovídá jednomu návinu, každý sloupec tabulky jedné roli. Číslo v buňce odpovídá počtu vad detekovaných v dané roli. Uživatel má možnost zobrazit detailní seznam vad pro vybranou roli.

rola	šířka	délka	počet vad
1	3500	20000	1
2	3500	20000	1
3	3500	20000	1
4	3500	20000	1
5	3500	20000	1
6	3500	20000	1
7	3500	20000	1
8	3500	20000	1
9	3500	20000	1
10	3500	20000	1
11	3500	20000	1
12	3500	20000	1
13	3500	20000	1
14	3500	20000	1
15	3500	20000	1
16	3500	20000	1
17	3500	20000	1
18	3500	20000	1
19	3500	20000	1
20	3500	20000	1
21	3500	20000	1
22	3500	20000	1
23	3500	20000	1
24	3500	20000	1
25	3500	20000	1
26	3500	20000	1
27	3500	20000	1
28	3500	20000	1
29	3500	20000	1
30	3500	20000	1
31	3500	20000	1
32	3500	20000	1

Obr. 7.8 Symbolické znázornění rozložení vad do jednotlivých rolí, příklad zobrazuje rozdělení výroby do 13-ti rolí, 2 a čtrnáctá jsou ořezy (označeno šedou barvou)

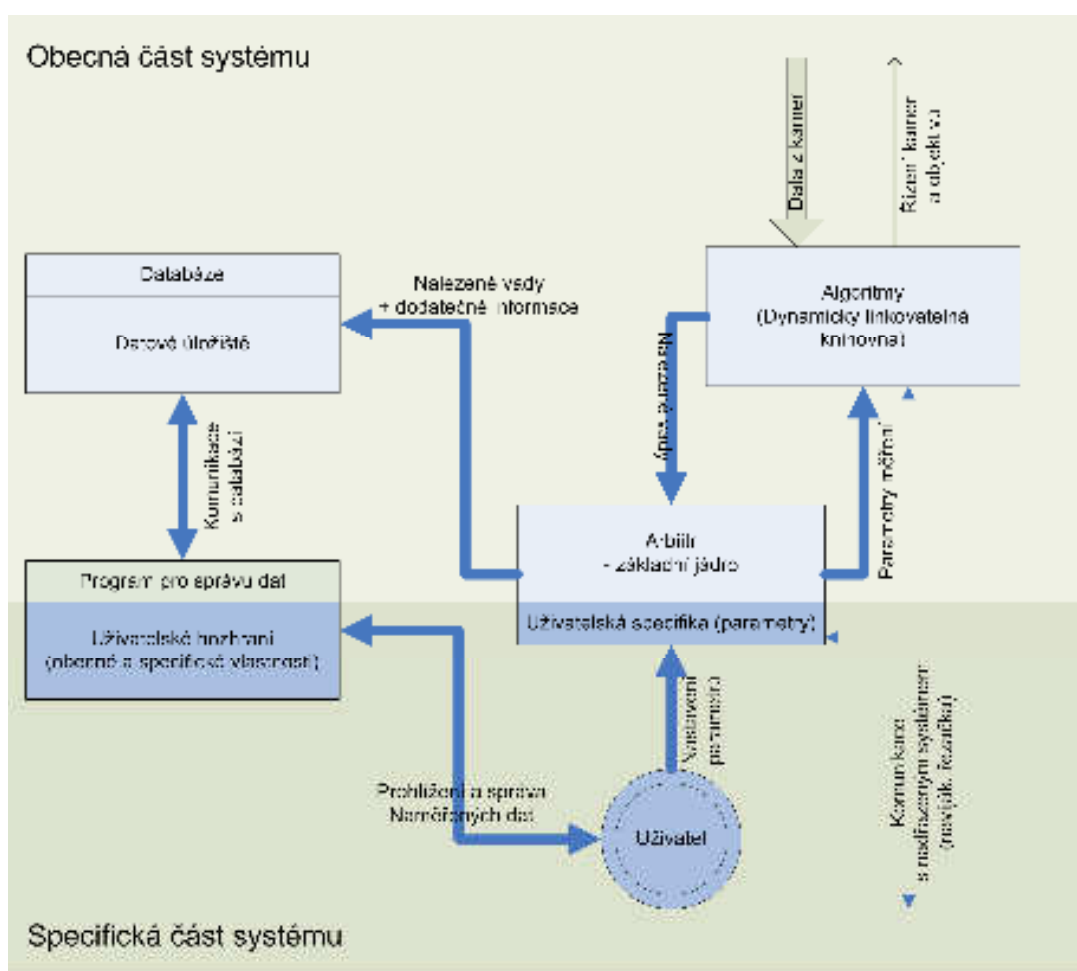
Typické snímky nalezených a klasifikovaných vad jsou uvedeny v přílohách této práce.

7.6 Obecná koncepce systému

Při vývoji a volbě použitého hardwaru (kamery, digitalizační karty, clonová automatika), softwarového jádra systému, hlavních částí algoritmů, systému distribuce a uchování vad byl kladen důraz na velkou míru obecnosti. Žádoucí je navrhnout takové

řešení, které je možno zobecnit na skupinu více či méně podobných úkolů zpracování obrazu.

Požadavkem zákazníka je na druhou stranu takový systém, který splňuje konkrétní technické parametry a zároveň je navázán na zákaznický specifické technologie, postupy a zvyklosti. Celý systém musí tedy být komplexním řešením na klíč pro konkrétního zadavatele. Nejlepším způsobem, jak docílit specifického řešení a zároveň se nevzdát tolik žádané obecnosti, je veškerá zákaznická specifika zahrnout do uživatelského rozhraní a snažit se toto uživatelské rozhraní striktně oddělovat od algoritmů zpracování obrazu a samotného jádra aplikace. Proto byl navržen následující koncept vizuálního systému.



Obr. 7.9 Navržená a realizovaná koncepce systému z pohledu obecnosti řešení

Tato koncepce se snaží v co největší míře zachovat obecnost systému. Největší díl zákaznického řešení je obsažen v programu pro správu dat – databázová prohlížečka. Uživatel ještě spolupracuje s arbitrem měření (server), kde se zapíná a vypíná měření a nastavují se parametry algoritmů. Ač algoritmy většinou bývají velmi specifické, v tomto případě se podařilo je implementovat maximálně obecně. Prakticky jen samotné pojmenování nalezených vad („díra“, „výkapek“, „špína“) představuje vazbu algoritmů na konkrétní zpracovávaný materiál.

Kontrola netkaných textilií byl pilotní projekt tohoto typu. Teprve na základě dalších instalací systému pro jiný typ kontrolovaného materiálu je možné zhodnotit, jak se podařilo udržet koncept obecnosti. V závěru této práce bude popsána další implementace navrženého systému pro kontrolu paropropustných fólií pro výrobní závod Fatra a.s. v Napajedlích.

7.7 Optimalizace algoritmů

Digitalizace obrazu probíhá na PCI kartách, obrazová data je proto nutné efektivním způsobem přenést do paměti počítače. Nejlepší způsob je využití bus-master přenosu PCI sběrnice. Při rychlosti sběrnice 33 MHz a šířce slova 32 bitů je maximální přenosová rychlost 133 MB/s. To je ale jen teoretická rychlost, je nutné ponechat jistou propustnost sběrnice pro režii nad přenosem a hlavně pro jiná zařízení, která jsou ke sběrnici připojena (VGA, řadič disku...). Tím pádem je dáno omezení – maximálně 4 kamery (digitizéry) na jednu výpočetní jednotku ($4 \times 28 \text{ MB/s} = 112 \text{ MB/s}$).

Ovšem i takové datové toky není jednoduché obsloužit řídicí stranou. Na každé digitalizační kartě je osazen modul statických pamětí (SRAM), který tvoří cyklický zásobník pro dočasné ukládání digitalizovaných dat. Jejich následný přenos je realizován prostřednictvím bus-master DMA přenosu přímo do vyhrazené fyzické paměti. V operačním systému Windows nelze počítat s příliš vhodně fungujícím jádrem pro aplikace pracující v reálném čase. Jako efektivní se ukázala modifikace obslužné aplikace již na bázi samotného driveru obsluhujícího digitalizační karty a spuštění vždy tří samostatných vláken jen pro režii nad přenosem dat z každé digitalizační karty. Tato tři vlákna zajišťují :

1. kontrolu nad stavem zásobníků a v případě nutnosti zahájení bus-master DMA přenosu, povolení přerušení vyvolávaného digitalizační kartou při dokončení přenosu,
2. dokončení přenosu dat do vyhrazené fyzické paměti pro DMA vyvolané přerušením a spuštění třetího obslužného vlákna,
3. uvolnění vyhrazené fyzické paměti přesunutím digitalizovaných dat do předem alokované oblasti určené pro zpracování algoritmem. Toto poslední vlákno plní jednotlivými bloky dat FIFO paměť, z které jsou teprve přebírány snímky pro algoritmické vyhodnocení.

Jako výpočetní jednotka bylo zvoleno PC s procesorem Intel® Pentium™ 4 (běžně dostupné v době návrhu systému).

Cílem optimalizací algoritmu je dosáhnout stavu, kdy je výpočetní jednotka schopna s rezervou zpracovávat předložená data v reálném čase.

Při zpracování obrazu se standardně dodržuje osvědčený obecný postup :

- předzpracování obrazu (šum, ekvalizace...),
- detekce relevantních příznaků obrazu,
- klasifikace (shluková analýza, popis objektu...).

Zpravidla se tyto kroky postupně provádí vždy nad celým obrazem. V našem případě by striktní se držení tohoto postupu znamenalo uchovávání mnoha mezivýsledků ve formě obrazových dat (původní obraz, kompenzace modulace osvětlení, kompenzace nerovnoměrného osvětlení, tříúrovňové prahování, shluková analýza...). Při takto velkém datovém toku je jisté, že jen samotný přístup do paměti počítače k těmto mezivýpočtům zabere nemalou režii. Při prvních testech takto postaveného algoritmu byla podle očekávání zjištěna propustnost algoritmu jen přibližně 30 MB/s. Řešením by bylo použití více výpočetních jednotek (zpravidla maximálně jedna až dvě kamery na jednu jednotku, jak je to běžné v tomto oboru) nebo efektivní optimalizace funkčního algoritmu.

V rámci následné optimalizace byl algoritmus navržen tak, že ke každému obrazovému bodu se přistupuje jen jednou. Zmiňovaný postup „předzpracování, detekce, klasifikace“ nad celým obrazem byl upraven na postup „předzpracování, detekce, klasifikace“ pouze nad každým bodem obrazu. V tomto případě se výrazně zkrátí čas pro výpočet, ke každému obrazovému bodu (původní obraz z kamer) se přistupuje jen jednou. Není tak nutné uchovávat a přistupovat k velkému množství mezivýpočtů ve formě obrazových dat a sníží se vysoké vytížení procesoru způsobené častými přístupy do paměti.

Cílem optimalizací (časových) bývá zpravidla co nejvíce zjednodušit ty nejnuitnější smyčky algoritmu. Tyto smyčky jsou vykonávány nejčastěji (většinou nad každým pixelem), proto je optimalizace tohoto kódu nejefektivnější.

Hlavní smyčka provádí ekvalizaci každého pixelu podle vzorce 6.5 již vyčíslenými maticemi koeficientů $\frac{1}{g(x,y)}$ a $\frac{1}{h(y)}$ a následné porovnání této hodnoty s hodnotami prahů thr_D a thr_U . Obraz se prochází po jednotlivých řádcích (*line[]*). Hodnota $\frac{1}{h(y)}$ je konstantní pro všechny body na jednom řádku, proto je výhodné upravit hodnoty thr_D a thr_U a ušetřit tak násobení každého pixelu tímto koeficientem. Pro větší rychlost výpočtu jsem nahradil některá násobení s pohyblivou desetinnou čárkou (*float*) celočíselnými (*int*) s následným bitovým posuvem a pole koeficientů $g(x,y)$ jsem nahradil polem $\frac{1}{\gamma(x,y)}$.

```
// line[] - pole původních obrazových dat v řádku (unsigned char*)
// gamma[] - upravené pole koeficientů pro kompenzaci nerovnoměrnosti osvitu
//          - 0x100 odpovídá koeficientu 1.000 (1.0 * 2^8)
// thrD    - hodnota dolního prahu pro detekci vady
// thrU    - hodnota horního prahu pro detekci vady
// h       - korekční koeficient modulace osvětlení h(y)
// val     - ekvalizovaná hodnota bodu

new_thrD = thrD*h;           // výpočet upravených limitů
new_thrU = thrU*h;
for (x=0;x<SIZE_X;x++)      // hlavní smyčka
{
    val = (line[x]*gamma[x])>>8;
    // následuje porovnání dat s new_thrD a new_thrU
    // ....
}
```

Obr. 7.10 Ukázka nejvnitřnější smyčky algoritmů

V této podobě jsou algoritmy schopny zpracovávat na procesoru Intel® Pentium™ 4 2.4 GHz data ze čtyř řádkových kamer LINE531 (112 MB/s) s vytížením procesoru na 40%, takže jeden procesor by mohl zpracovávat data až z osmi kamer. S příchodem nových procesorů Intel® Core™ 2 Duo byly provedeny další testy vytížení procesoru s jasným výsledkem – optimalizace algoritmů je více než dostatečná, kritickým místem je propustnost PCI sběrnice.

CPU	Datový tok	Vytížení procesoru
Intel® Core™2 Duo E6400 @ 2,13GHz	4*28 MB/s	12% (každé jádro)
Intel® Pentium™ 4 2,4 GHz 800MHz FSB	4*28 MB/s	40%

Tab. 7.11 Vytížení procesoru s běžícími algoritmy

7.8 Implementace algoritmů

Systém zpracování snímků od digitalizace dat z kamer až po vyhodnocení obrazu, nalezení vad a jejich online i offline reprezentaci byl řešen ve vývojovém prostředí Borland C++ Builder. Výjimku tvoří jádro algoritmů a modul klasifikace vad, které jsou z projektu vyčleněny jako separátní dynamicky linkovatelné knihovny (DLL) přeložené v překladači Intel CPP Compiler 6.0. Toto oddělení algoritmů a modulu klasifikace od hostitelského programu je výhodné hlavně v době vývoje, kdy se předpokládají časté změny algoritmu (ladění).

8 Závěr

8.1 Přínos práce a splnění cílů

Do automatizace výrobních procesů neodmyslitelně patří optická měření jako součást výstupní kontroly. Ne vždy se daří dosáhnout 100% úspěšnosti této kontroly, ale i přes tyto vlastnosti je poptávka po optické kontrole vysoká. Ve srovnání s lidskou vizuální kontrolou nebo jednoduchými senzory představuje použití kamer další krok, kterým se kvalita, rychlost a spolehlivost výstupní kontroly nebo zpětnovazební smyčky zvýší často i o několik řádů.

Obsahově je tato práce pojata jako komplexní problém kontroly kvality na nekonečných páslech výroby s použitím řádkových kamer s následným ověřením a praktickým nasazením pro sledování netkané textilie. Pro vyřešení takového problému však bylo zapotřebí zvládnout mnoho dílčích úloh, které na sebe navzájem navazují (návrh kamery s vhodným CCD, návrh osvětlení a uspořádání scény, řízení objektivů, pořízení dat a jejich transport, algoritmy předzpracování obrazu, detekce vad, klasifikace vad a jejich reprezentace, časová optimalizace algoritmů). Podstatným dílčím problémem byla i realizace tak velkého datového přenosu a driveru pro PCI digitalizační karty při použití běžného operačního systému (ne real-time operačního systému). Každá takováto úloha tvoří nedílnou součást systému jako celku a přispívá svojí měrou ke komplexnosti práce. Neúplnost popisu jakékoliv z dílčích úloh by měla za následek diskontinuitu této práce a její nižší informativní hodnotu.

Výše popsané algoritmy (detekce příznaků, průběžná shluková analýza a klasifikace vad do jednotlivých tříd pomocí neuronové sítě) jsou univerzálním nástrojem pro detekci vad v ideálním obraze. Spolu s předzpracováním obrazu (kompenzace modulace osvětlení, nerovnoměrnosti osvětlení a ekvalizace na konstantní charakter obrazu) tvoří univerzální a zároveň velmi robustní základ systému pro použití v aplikacích sledování kontinuální výroby různých materiálů. Ve spojení se specificky vyvinutým nebo modifikovaným hardwarem systém jako celek úspěšně konkuruje (cenou, technickými parametry i softwarovým vybavením) evropským výrobcům inspekčních systémů a má mnoho nesporných výhod jako je např. rychlost zpracování, spolehlivost detekce nebo modularita. Díky distribuovanému způsobu zpracování dat a jejich on-line i off-line přístupu je systém lehce konfigurovatelný.

Takto vytvořený systém zvítězil ve všech interních výběrových řízeních ve firmě Pegas Nonwovens, a.s. na modernizaci stávajících i nově budovaných linek na výrobu netkané textilie (L2, L5 – 2003, L3, L7 – 2004, L8 – 2005, L9 - 2007) – celkem 6 systémů, 46 kamer.

Kvalitu a efektivitu řešení není vždy jednoduché objektivně posoudit. U čistě teoretických prací je situace ještě obtížnější. U praktických prací je možné o efektivitě

zvoleného řešení rozhodovat s přihlédnutím k dosaženým výsledkům při experimentálních testech. Ale u řešení později nasazených do reálného provozu je možné objektivně posuzovat podle mnoha aspektů – ověření funkce v reálných podmínkách, dlouhodobá poruchovost, servisovatelnost, užité vlastnosti systému a zkušenosti uživatele (uživatelé bývají největšími a tím pádem nejlepšími kritiky). Nejsilnějším měřítkem je však podle mého názoru v tržně fungující ekonomice a v silně konkurenčním prostředí prosazení konkrétního řešení. A v tomto případě budiž důkazem efektivnosti popisovaného řešení to, že po zkušenostech byl systém vybrán znovu pro další instalace.

V tomto oboru je velmi těžké posuzovat kvalitu různých vizuálních systémů. Producent materiálu stěží nainstaluje dva systémy na jednu výrobní linku pro jejich nezávislé porovnání. Porovnání dvou systémů na produkci ze dvou výrobních linek také není objektivní, protože každá výrobní linka (byť stejného typu) je unikát a materiál vyrobený na těchto linkách je vždy odlišný. Je také velmi obtížné vyrobený materiál „protáhnout“ na jiné lince a detekovat na něm vady instalovaným kamerovým systémem.

V roce 2007 byl proveden test úspěšnosti detekce vad v porovnání s nejnovějším vizuálním systémem firmy ELECTRONIC Systems, Italy instalovaným ve firmě 3M. Ve vyráběném materiálu byla úmyslně vytvořena reprezentativní množina vad různých typů. Tato skutečnost byla zatajena a materiál byl expedován a otestován v provozovně 3M při fázi laminace netkané textilie s paropropustnou fólií s nepříliš lichotivým výsledkem – nebyla nalezena žádná z úmyslně vytvořených kritických vad a materiál byl prohlášen vyhovujícím. Po zveřejnění detekovaných vad oběma systémy ELECTRONIC Systems odeslal oficiální omluvu s tím, že systém byl v danou dobu špatně nastaven. Další nezávislý test však nebyl proveden.

Při vývoji systémů (a to včetně systémů popisovaných v kapitole 2.2) jsem se držel zásady – robustnost systému jako celku v žádném případě není závislá jen na robustních algoritmech zpracování obrazu. Důležitá je samozřejmě kvalita všech komponent signálové trasy, vždy je nutné zaměřit se na samotnou podstatu kamerou snímané scény a snažit se pořizovat taková obrazová data, která algoritmům usnadní práci. K největším ztrátám relevantní informace dochází většinou již při samotném snímání obrazových dat. Nejlepším způsobem, jak se těmto ztrátám účelně vyhnout, je již při návrhu optické scény zajistit, aby měřená data a relevantní vlastnosti byly co nejlépe rozpoznatelné v sejmutém obraze a pokud tomu tak není, snažit se to napravit již ve fázi návrhu scény (volba vhodné metody pořízení obrazu) nebo předzpracování obrazu. Pokud potom i jednoduchým detekčním algoritmům budeme předkládat ideální data, můžeme tyto jednoduché algoritmy považovat za vysoce spolehlivé. V této práci bylo ukázáno, že přesunem stěžejních optimalizací již do fáze předzpracování obrazu a využitím relativně jednoduchých algoritmů detekce je systém vysoce robustní a zároveň není ubráno z jeho obecnosti použití. Po zkušenostech z několikaletého reálného provozu bylo zjištěno, že systém je necitlivý i proti tak fatálním změnám podmínek pořízení obrazu, jako je například výpadek poloviny osvětlovací soustavy, prach usazený přímo na CCD čipu kamery nebo pronikání slunečního světla oknem přímo na měřený materiál – se všemi těmito poruchami si poradí již algoritmy předzpracování obrazu a detekční algoritmy mají zajištěny ideální data.

V rámci řešení práce byly splněny všechny cíle stanovené ve třetí kapitole. Přínosem je také samotné zvládnutí detekce vad na nekonečných páslech, čímž byl vytvořen nový prostor pro řešení dalších úloh navazujících na tento projekt.

8.2 Použití systému

I když systém byl poprvé otestován pro kontrolu netkaných textilií, při vývoji vizuálního systému byl od počátku kladen důraz na co největší obecnost tohoto systému (kapitola 7.6). Nebylo však možné posoudit, do jaké míry se to podařilo.

V roce 2004 byla provedena studie realizovatelnosti systému pro kontrolu paropropustné fólie vyráběné ve firmě Fatra, a.s., poté byla tímto systémem osazena jedna výrobní linka v závodě v Napajedlích a po kladných ohlasech oddělení kvality, výroby a managementu byla osazena i druhá linka. Koncepce systému zůstala nezměněna, v samotných algoritmech se změnily jen názvy vad tak, aby odpovídaly skutečnosti. Jediných podstatných změn se dostalo programu pro prohlížení vad, který musel respektovat odlišný systém zařazování a počítání rolí. Vše podstatné zůstalo v původní podobě. Celkový čas na hlavní softwarové úpravy pro tuto instalaci systému byl kolem jednoho týdne práce, veškerý hardware zůstal nezměněn.

Na základě těchto skutečností lze tedy tvrdit, že se podařilo vytvořit univerzální systém detekce opticky kontrastních vad s pomocí řádkových kamer použitelný pro kontrolu výroby na nekonečných páslech.

Možné využití systému pro kontrolu :

- tkaných i netkaných textilií,
- paropropustných fólií a jiných fólií,
- papíru a papírových výrobků,
- válcovaného a taženého materiálu (plechy, plasty),
- obalových materiálů, atd.

8.3 Možnosti zdokonalení systému

Při realizaci bylo použito mnoho nestandardních avšak efektivních řešení (přetaktování CCD čipu kamer, optický výstup řádkových kamer, dálkové řízení Canon objektivů pomocí navrženého modulu CanEF, distribuované zpracování dat s využitím TCP/IP soketů).

Návrhy na další zlepšování systému :

- přidání výpočtu statistických momentů vyššího řádu každé porízené vady. Tyto dodatečné informace o vadě by mohly výrazně zlepšit spolehlivost klasifikace vad neuronovou sítí,

- nový model hardwaru kamer. Tyto kamery by měly již digitální výstup – gigabitový ethernet. Tím pádem by padlo omezení maximálně 4 kamer na jeden počítač. Data by byla přenášena do síťových karet na PCI-Express. Na rozdíl od teoretické propustnosti PCI sběrnice je datová propustnost 16x PCI-Express 4 GB/s obousměrně. Tímto zlepšením by stačilo využít jediný počítač na mnoho kamer,
- automatické ostření a kalibrace systému – díky použití vyvinutého modulu CanEF se nabízí aplikace některého z algoritmů automatického ostření,
- implementace algoritmů do digitalizačních karet GX6 rev.11. Pokud by se podařil tento krok, data by byla zpracovávána přímo v signálovém procesoru digitalizačních karet a do počítače by se přenášely jen nalezené vady. Propustnost PCI sběrnice by tedy nebyla omezením, v počítači by se jen klasifikovaly a archivovaly vady. Tímto zlepšením by opět stačilo využít jeden počítač na mnoho kamer,
- další optimalizace algoritmů s využitím assembleru a rozšířených instrukčních sad SSE2/SSE3/SSE4.

9 Literatura

9.1 Seznam použité literatury

- [1] HLAVÁČ, V., ŠONKA, M. *Počítačové vidění*. Grada, 1992. 272 stran. ISBN 80-85424-67-3.
- [2] ŠONKA, M., HLAVÁČ, V., BOYLE, R. *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*. PWS Publishing, 1999. ISBN 0-534-95393-X.
- [3] Wikipedia, Image sensor [online]. c2005, poslední revize prosinec 2007. <http://en.wikipedia.org/wiki/Image_sensor>.
- [4] Wikipedia, Active pixel sensor [online]. c2005, poslední revize prosinec 2007. <http://en.wikipedia.org/wiki/Active_pixel_sensor>.
- [5] Sony Corporation Web Site, Ultrahigh-Speed High Picture Quality CMOS Sensors Using Column-Parallel A/D Conversion [online]. c2006, poslední revize únor 2007. <http://www.sony.net/Products/SC-HP/cx_news/vol47/pdf/featuring47.pdf>.
- [6] Williamson, M., Network standards focus machine vision's picture. *Machine The Industrial Ethernet Book*, 2007, březen, s. 14–15.
- [7] Micron Technology, Inc., MT9M002 CMOS sensor, c2007, poslední revize únor 2008. <http://download.micron.com/pdf/flyers/mt9m002_flyer.pdf>.
- [8] Faugeras; O.: *Three-Dimensional Computer Vision*. MIT Press. 1993, ISBN 0-262-06158-9)
- [9] I.Kalová, *Kontrola kvality svaru automobilových disků*, diplomová práce VUT FEKT UAMT, 2003
- [10] T.Janírek, 3D rekonstrukce obrazu získaného pohledem na rotační součástku osvětlenou laserem, semestrální projekt ZVS, VUT FEKT UAMT, 2004
- [11] Sony Corporation Web Site, CCD image sensors. c2007. <http://www.sony.net/Products/SC-HP/pro/image_sensor/>.
- [12] FANN, Fast Artificial Neural Network Library [online]. c2004, poslední revize prosinec 2007. <<http://leenissen.dk/fann/>>.
- [13] Photo.net: A Community of Photographers, [online], Canon EF focusing, 2003 <http://photo.net/bboard/q-and-a-fetch-msg?msg_id=005nXu>.
- [14] Camera Hacker, [online]: Eyepiece to make telephoto lens into telescope, 2001 <http://www.camerahacker.com/Forums/DisplayComments.php?file=Lens/Canon/eyepiece_to_make_telephoto_lens_into_telescope>.
- [15] DLP Design, [online], DLP-2232PB-G USB Adapter, 2003 <http://www.dlpdesign.com/usb/2232pb.shtml>
- [16] Kohel L., Zeng, Liqing L., :Digital Image Analysis to Determine Pore Size Distribution of Nonwoven fabrics. IMACS Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications (CESA), 2006
- [17] Honec J., Richter M., Valenta P., Zemčík P.: 12th Conference Process Control, Tatranske Matliare, 1999, vol.1, 165 s. ISBN 80-227-1228-0

- [18] HORÁK, K. Aplikace metod rozpoznávání obrazu v defektoskopii. PhD Thesis. Brno, VUTUM. 2008. 31 p. ISBN 978-80-214-3667-1.
- [19] Wikipedia, Nonwovens [online], poslední revize prosinec 2007, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Nonwovens>>.
- [20] Pegas Nonwovens, a.s., [online], 2007, <http://www.pegas.cz>
- [21] Electronic SYSTEMS S.p.A., [online], 2007, <http://www.electronicssystem.it/index.html>
- [22] EDANA – Association of nonwovens and related industries, [online], 2008, <http://www.edana.org>

9.2 Seznam vlastních prací

- [23] HONEC, P., PETYOVSKEÝ, P., RICHTER, M., GREBENÍČEK, F., VALACH, S. 3D objects surface reconstruction. 13th International Conference of Process Control. Štrbské pleso, Slovakia, Slovak University of Technology, Bratislava. 2001. p. 94 - 94. ISBN 80-227-1542-5.
- [24] HONEC, J., HONEC, P., PETYOVSKEÝ, P., VALACH, S., BRAMBOR, J. Parallel 2-D FFT Implementation with DSPs. 13th Int. Conference on Process Control. Štrbské Pleso, Slovakia, Slovak University of Technology, Bratislava. 2001. p. 174 - 178. ISBN 80-227-1542-5.
- [25] HONEC, J., HONEC, P., PETYOVSKEÝ, P., VALACH, S., BRAMBOR, J. Transparent materials optical inspection methods. 13th International Conference on Process Control. Štrbské pleso, Slovakia, Slovak University of Technology, Bratislava. 2001. p. 203 - 203. ISBN 80-227-1542-5.
- [26] HONEC, P. Dva snímky v jednom okamžiku se standardním televizním CCD čipem. AUTOS 2002, Automatizace systémů. Praha. 2002. p. 133-136 (4 p.). ISBN 1213-8134.
- [27] HONEC, P. Small objects volume measuring using 3D. vydání sborníku 11/2004. Vídeň, TU - Vienna. 2004. p. 220 - 221. ISBN 3-901509-42-9.
- [28] Richter, Petyovský, Honec P. Reconstruction of 3D surface. Proceeding of International conference CEEPUS Summer School 2005 Intelligent Control Systems. Brno VUT. 2005. p. 1 - 7. ISBN 80-214-2976-3.
- [29] KALOVIÁ, I., HONEC, J., HONEC, P., HORÁK, K. Automatický sběr a vyhodnocení dopravních dat. Automatizácia a riadenie v teórii a praxi 2007. Košice, Technická univerzita v Košiciach. 2007. p. 26-1 (6 p.). ISBN 978-80-8073-758-0.
- [30] VALACH, S., HONEC, P. Implementace rozhraní XGMII v FPGA Virtex-II Pro. Elektorevue - Internetový časopis (<http://www.elektorevue.cz>). 2004. 2004. p. 1 - 7. ISSN 1213-1539.
- [31] HONEC, P., VALACH, S. Prostorová rekonstrukce. Elektorevue - Internetový časopis (<http://www.elektorevue.cz>). 2004. 2004(1). p. 1 - 6. ISSN 1213-1539.
- [32] VALACH, S., HONEC, P. Sběrnice PCI Express. Elektorevue - Internetový časopis (<http://www.elektorevue.cz>). 2004. 2004. p. 1 - 23. ISSN 1213-1539.
- [33] HONEC, P., HONEC, J., VALACH, S., PETYOVSKEÝ, P. Kamery odhalí 1200 přestupků. MF Dnes 20.9.2004. 2004. 2004(265). p. 5 - 5.
- [34] ILONA KALOVIÁ - JOZEF HONEC - PETR HONEC - KAREL HORÁK. Automatický sběr a vyhodnocení dopravních dat. Acta Mechanica Slovaca. 2007. 11(1-A). p. 189 - 194. ISSN 1335-2393.
- [35] HONEC, P. Kontinuální měření s využitím řádkových kamer. 2002. p. 1 - 1., výzkumná zpráva
- [36] KALOVIÁ, I., HONEC, P. Přístupy k řešení systémů počítačového vidění v průmyslu. Automatizace. 2005. 48(11). p. 680 - 683. ISSN 0005-125X.
- [37] KALOVIÁ, I., HONEC, P. Počítačové vidění v průmyslu a dopravě. Automatizace. 2005. 48(12). p. 756 - 761. ISSN 0005-125X.

10 Curriculum Vitae

Jméno: Ing. Peter Honec
Narozen: 23.9.1976 v Martině
E-mail: honecp@feec.vutbr.cz
Adresa: ÚAMT FEKT VUT v Brně, Kolejní 2906/4, Brno 612 00

Vzdělání

1991 – 1995 SPŠE Kounicova 16, Brno – obor automatizační technika.

1995 – 2000 FEKT VUT, Brno – magisterské studium oboru Kybernetika, automatizace a měření na Ústavu automatizace a měřicí techniky. Diplomová práce : HDTV kamera.

2000 – FEKT VUT, Brno – postgraduální studium oboru Kybernetika, automatizace a měření na Ústavu automatizace a měřicí techniky.

Praxe

1996-1998 Schenck-Habanec Vibroservis spol. s r.o.– diagnostika a servis přístrojů na měření vibrací.

1998-CAMEA, spol. s r.o. – technické vedení projektů, návrh algoritmů zpracování obrazu a vizuálních systémů

Další aktivity

2000 – Člen Skupiny počítačového vidění na Ústavu automatizace a měřicí techniky FEKT VUT Brno.

2003 – Výuka kurzů v oblasti počítačového vidění a zpracování obrazu na Ústavu automatizace a měřicí techniky FEKT VUT Brno.

Přílohy

Příloha 10.1: Typické vady a jejich rozdělení dle klasifikace neuronovou sítí

Příloha 10.2: Modul CanEF

Příloha 10.3: Reference Pegas

Příloha 10.4: Reference AVX – vizuální systém instalovaný v Číně

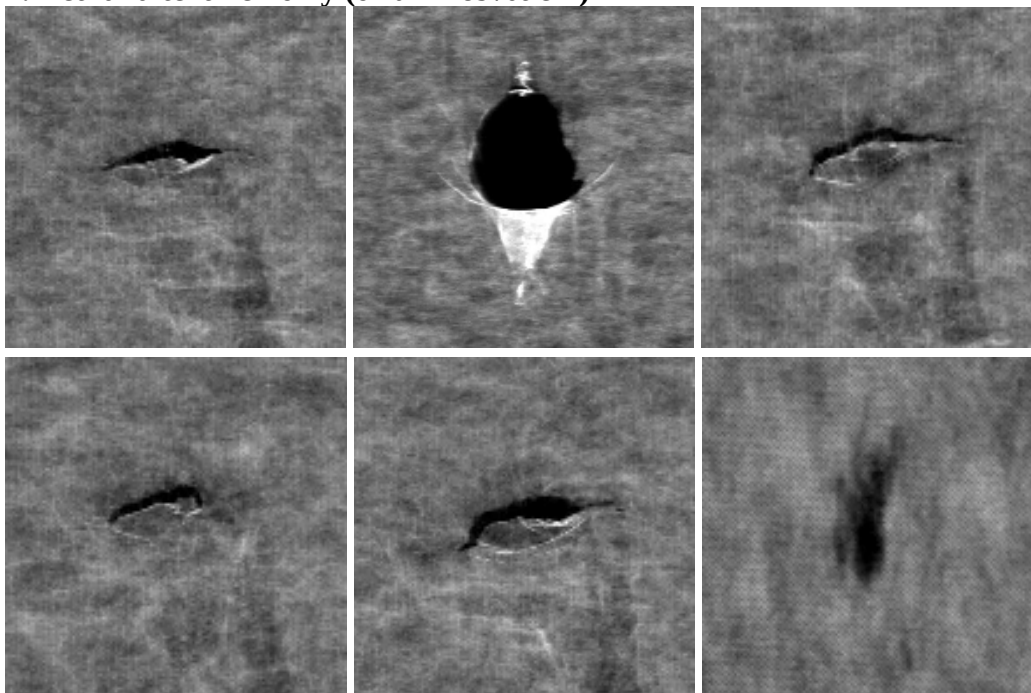
Příloha 10.5: Elektronická příloha

- \Dokument – disertační práce ve formátu .pdf
- \Galerie\Pegas – příklady vad na netkané textili
- \Galerie\Fatra – příklady vad na paropropustné fólii
- \Software\PegasView – Prohlížečka vad
- \Software\LINE531 – software kamery Modicam LINE531
- \CanEF – dokumentace k modulu CanEF

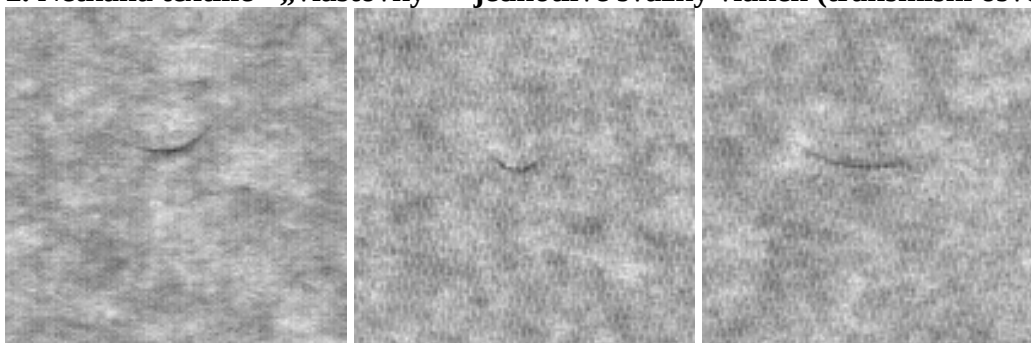
10.1 Typické vady a jejich rozdělení dle klasifikace neuronovou sítí

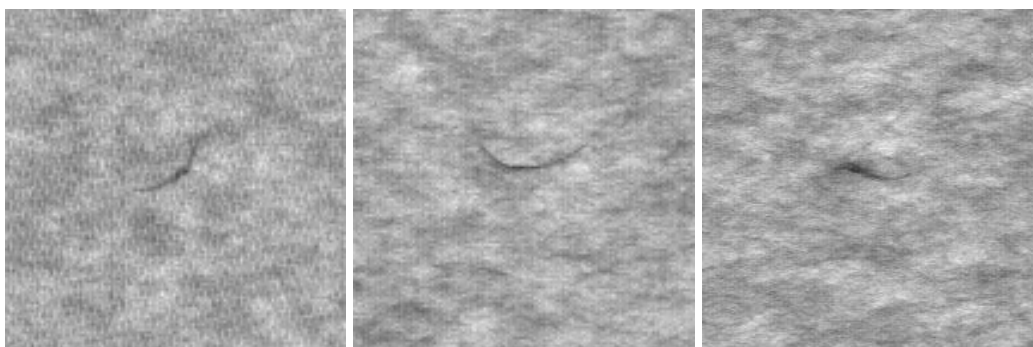
Tyto vady jsou řazeny do jednotlivých tříd podle výsledku klasifikátoru založeného na neuronové síti. Zobrazeny jsou jen vady s příslušností do nejčtetnějších tříd

1. Netkaná textilie - díry (difúzní osvětlení)

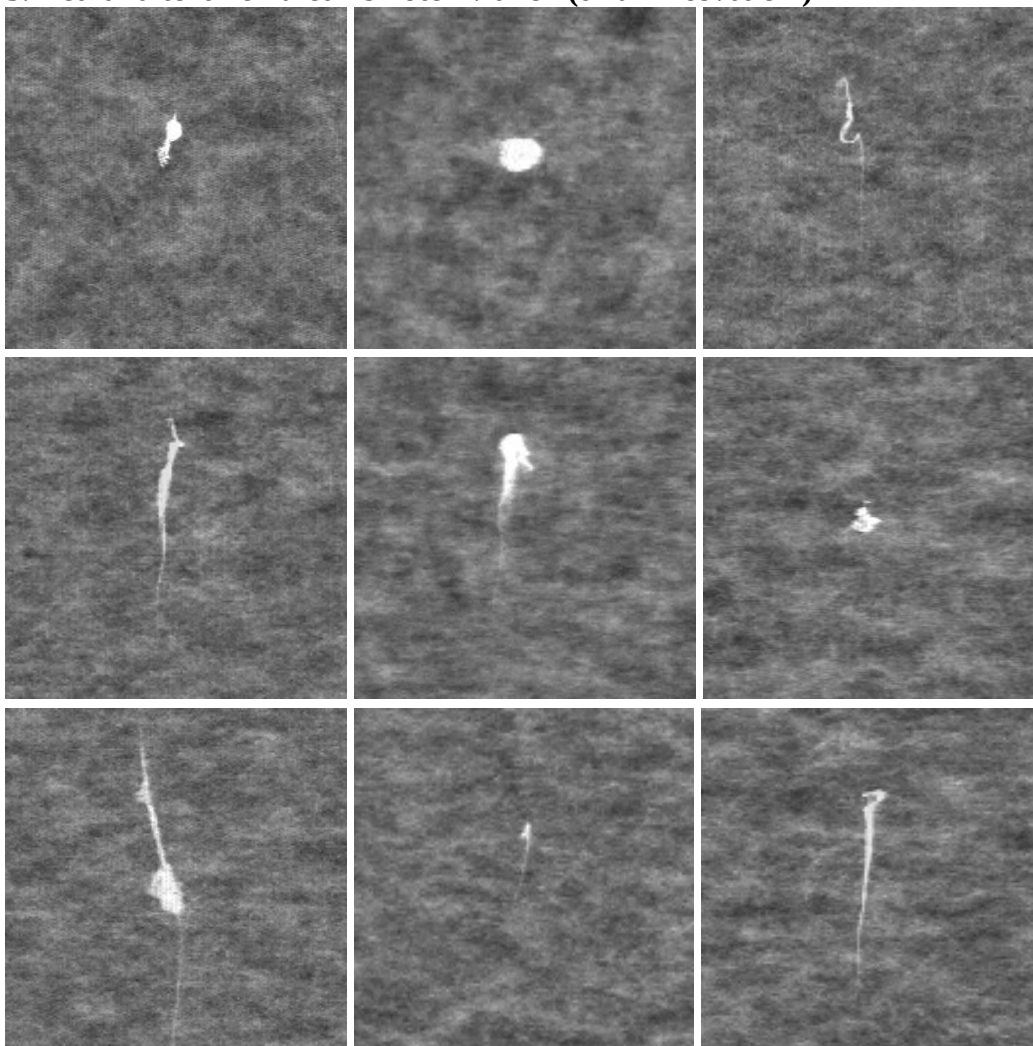


2. Netkaná textilie - „vlaštovky“ – jednotlivé svazky vláken (transmisní osvětlení)

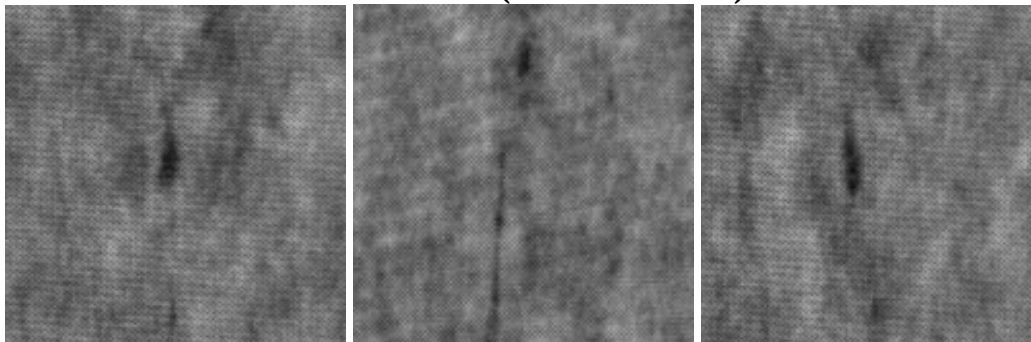




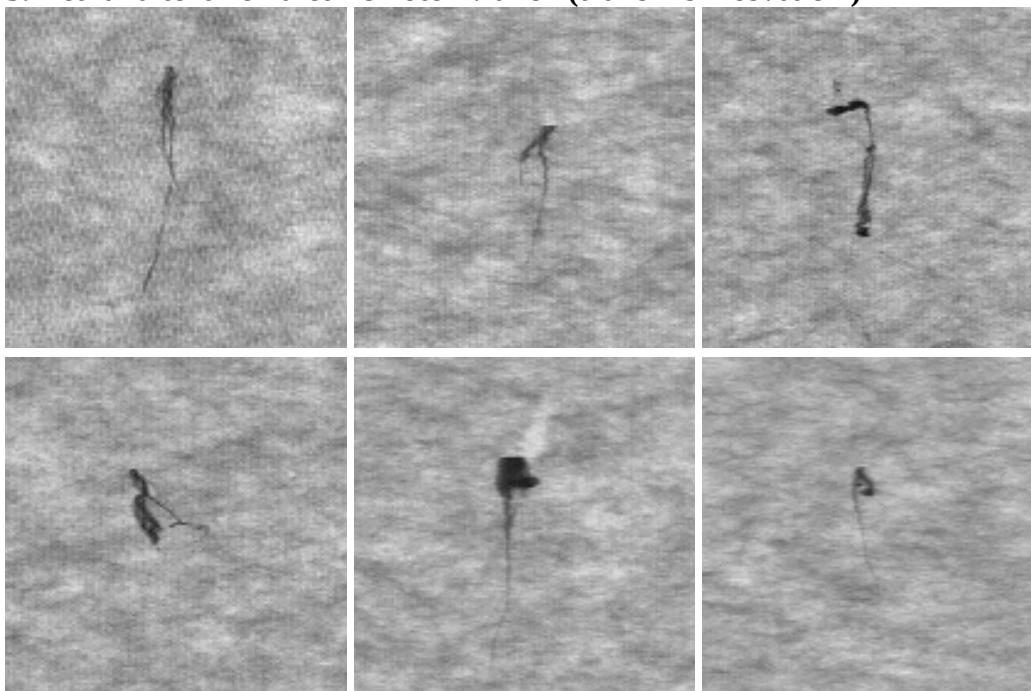
3. Netkaná textilie - úlet – smotek vláken (difúzní osvětlení)



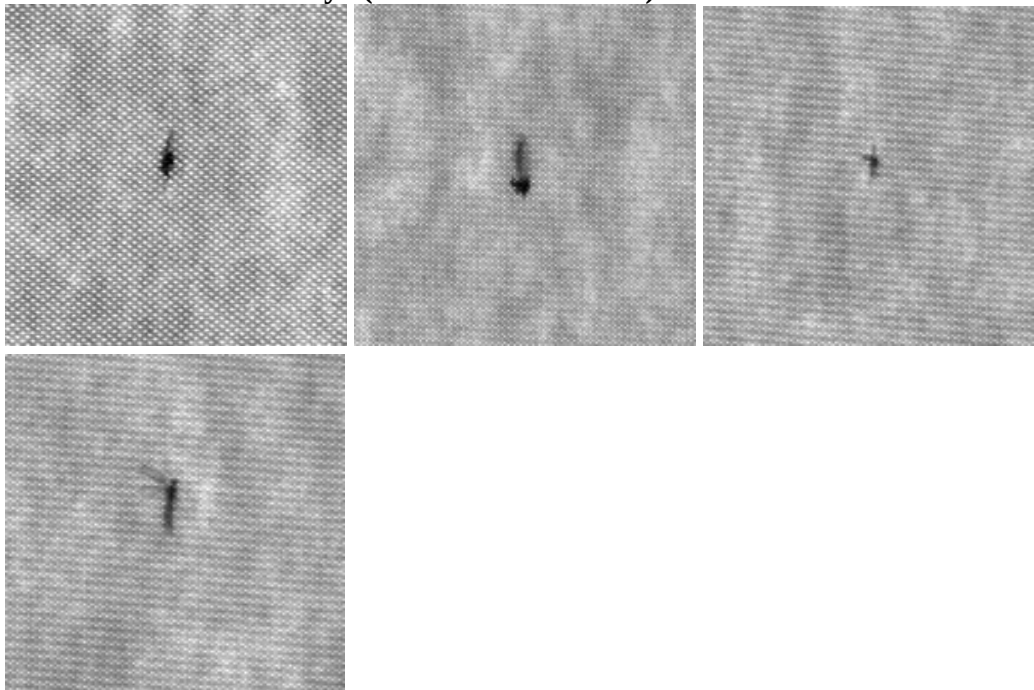
4. Netkaná textilie - zeslabené místo (difúzní osvětlení)



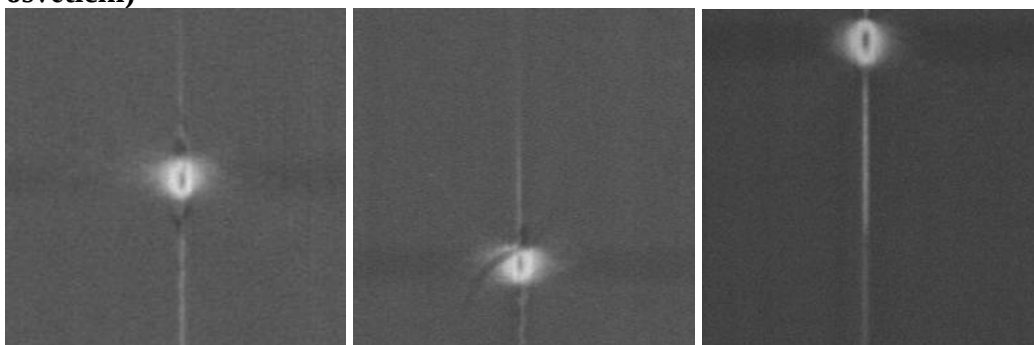
5. Netkaná textilie - úlet – smotek vláken (transmisní osvětlení)



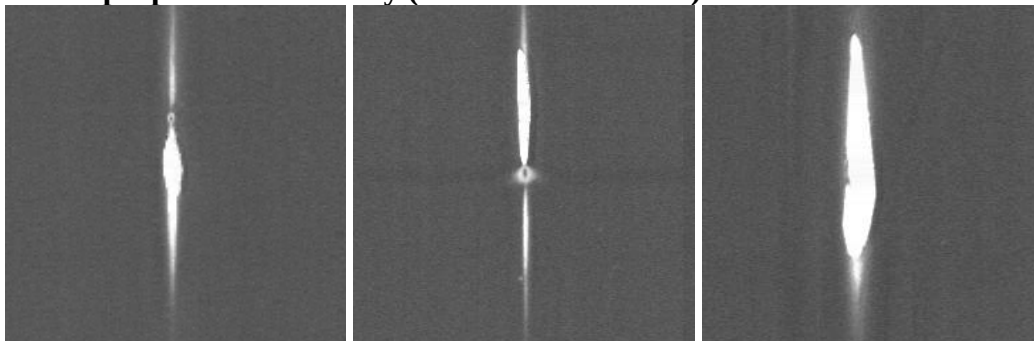
6. Netkaná textilie - hmyz (transmisní osvětlení)



7. Paropropustná fólie – „gely“ – místa bez mikromletého vápence (transmisní osvětlení)



8. Paropropustná fólie – díry (transmisní osvětlení)



10.2 Modul CanEF pro řízení objektivů

Komunikace po sériové lince mezi modulem CanEF a nadřazeným systémem probíhá v obou směrech stejně. Každý příkaz je ohraničen start znakem, samotným ID zařízení a stop znakem, následuje kontrolní součet. Veškeré hodnoty jsou v hexadecimálním formátu, záporné hodnoty jsou reprezentovány jednotkovým doplňkem.

$\langle START \rangle \langle ID \rangle \langle COMMAND \rangle \langle STOP \rangle \langle CRC \rangle$

<i>START</i>	Start znak, 0x02
<i>ID</i>	0x00-0x7f, ID zařízení
<i>COMMAND</i>	String (<i>c1,c2... cn</i>), nerozlišuje malá/velká písmena
<i>STOP</i>	Stop znak, 0x03
<i>CRC</i>	Kontrolní součet, $CRC = 0x7f \wedge START \wedge ID \wedge c1 \wedge c2 \wedge \dots \wedge cn \wedge STOP$

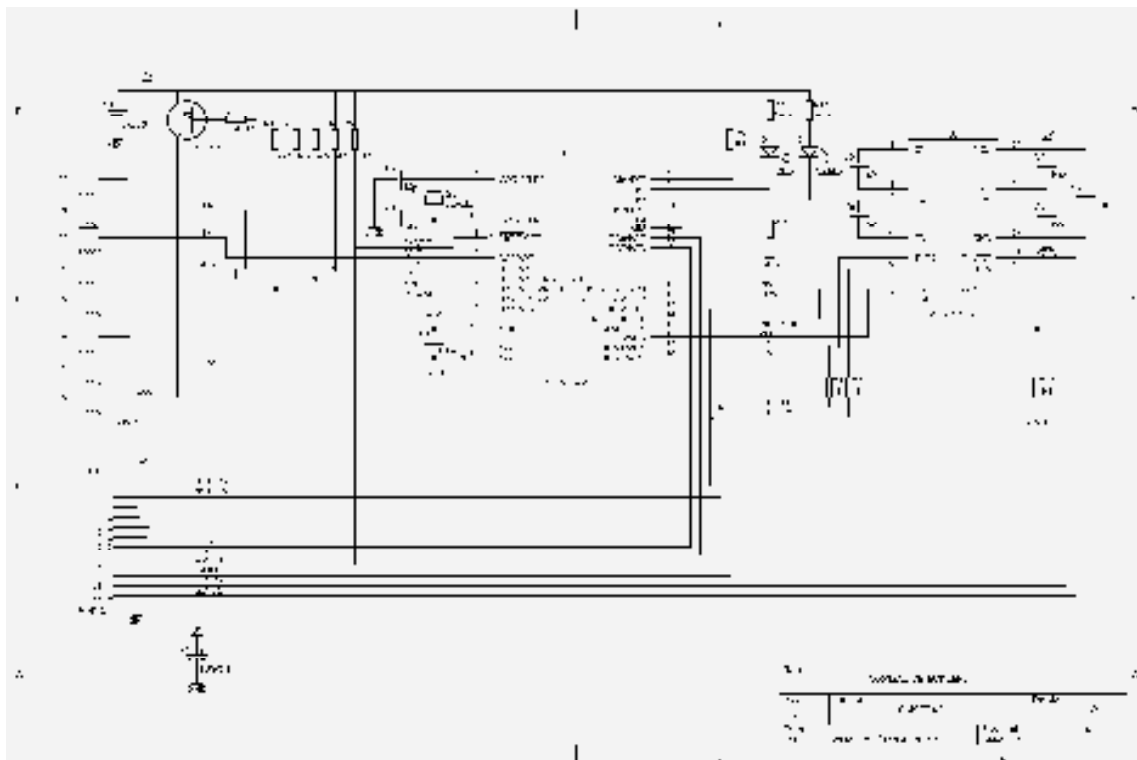
Do modulu CanEF bylo implementováno několik základních příkazů, kterými lze řídit clonu a ostření v mnoha režimech (absolutně, diferenciálně, relativně). V tabulce níže je uveden základní popis implementovaných příkazů. Po provedení většiny z těchto příkazů modul odpoví stavem provedení příkazu a vrátí relevantní hodnoty vztahující se k dané operaci. Těmito hodnotami mohou být :

- minimální, maximální a aktuální ohnisková vzdálenost v milimetrech (zoom),
- minimální, maximální a aktuální clonové číslo objektivu,
- aktuální pozice clony v krocích a maximální počet těchto kroků,
- rozsah kroků ostření objektivu, aktuální pozice ostření a počet kroků ostření provedený v minulé operaci,
- a jiné hodnoty.

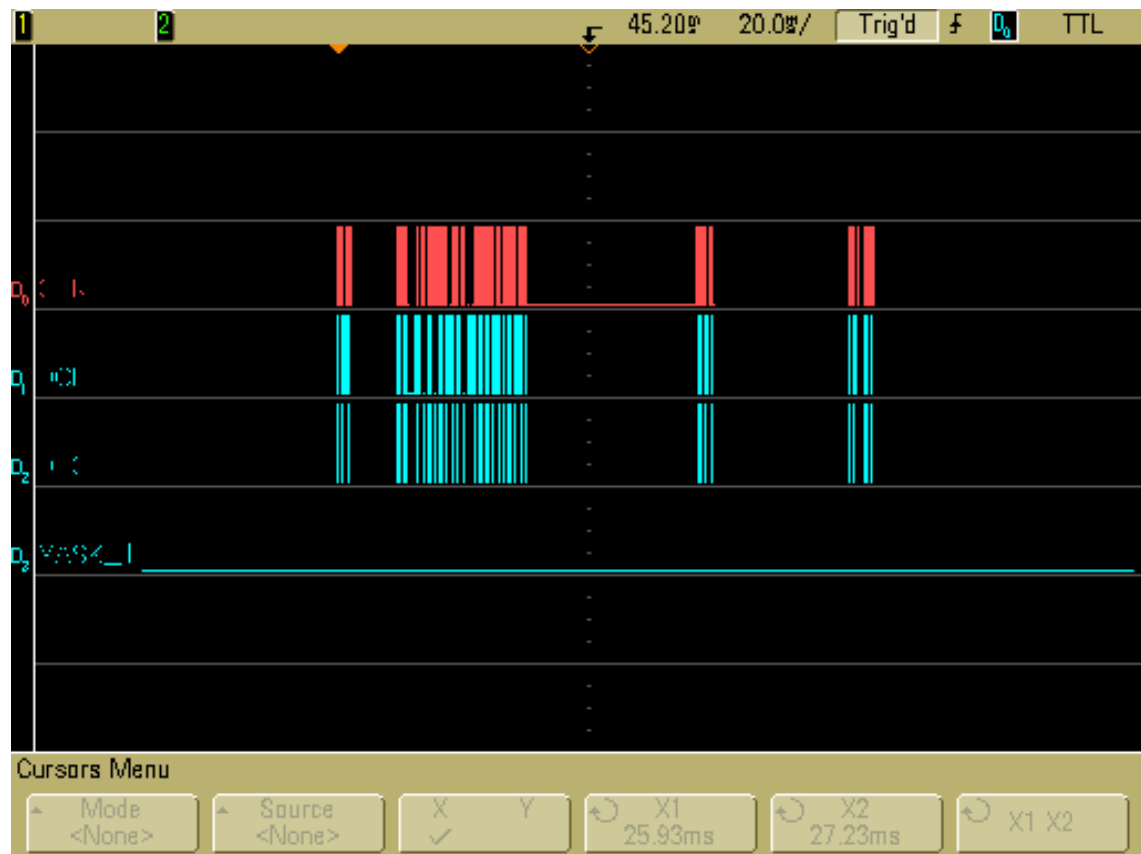
Detailní popis modulu komunikace s modulem CanEF je popsán v elektronické příloze „*manual_canonEF_1_2.pdf*“

příkaz	Popis
<i>SVM_{xx}</i>	Set Verbose Mode – zvolí režim odpovědi
<i>GVM</i>	Get Verbose Mode – vrátí nastavení odpovědi
<i>SLM_{xx}</i>	Set LED Mode – nastaví režim blikání LED
<i>GLM</i>	Get LED Mode – vrátí režim LED
<i>RST</i>	Reset – reset modulu
<i>VER</i>	Version – vrátí informace o verzi firmware
<i>SID</i>	Set ID – nastaví ID zařízení
<i>SCM_{xx}</i>	Set CRC Mode – zapne/vypne kontrolu CRC
<i>GEC</i>	Get Errors Counters – vrátí hodnotu chybových čítačů
<i>CEC</i>	Clear Errors Counters – vymaže chybové čítače
<i>NOP</i>	No Operation
<i>LID</i>	Lenses Identification – vrátí hodnotu aktuálně nastavené clony a zoomu
<i>LIA</i>	Lenses Identification Aperture - vrátí hodnotu aktuálně nastavené clony a zoomu
<i>LIZ</i>	Lenses Identification Zoom - vrátí hodnotu aktuálně nastaveného zoomu
<i>LFZ</i>	Lenses Focus Zero – zaostří na minimum
<i>LFI</i>	Lenses Focus Infinity – zaostří na nekonečno
<i>LFD_{xxxx}</i>	Lenses Focus Differential – zaostří o xxxx kroků (diferenciálně)
<i>LFA_{xxxx}</i>	Lenses Focus Absolute - zaostří na xxxx kroků od minima
<i>LFP_{xxxx}</i>	Lenses Focus Percentage - zaostří na xxxx promile z rozsahu od minima
<i>LGF</i>	Lenses Get Focus – vrátí aktuální pozici ostření
<i>LAO</i>	Lenses Aperture Open – otevře clonu na maximum
<i>LAA_{xx}</i>	Lenses Aperture Absolute – otevře clonu do pozice xx od maxima
<i>LAD_{xx}</i>	Lenses Aperture Differential – otevře clonu o xx kroků
<i>LAP_{xxxx}</i>	Lenses Aperture Percentage – otevře clonu na xxxx promile z rozsahu clony

Tab. 10.1 Seznam a stručný popis hlavních příkazů modulu CanEF



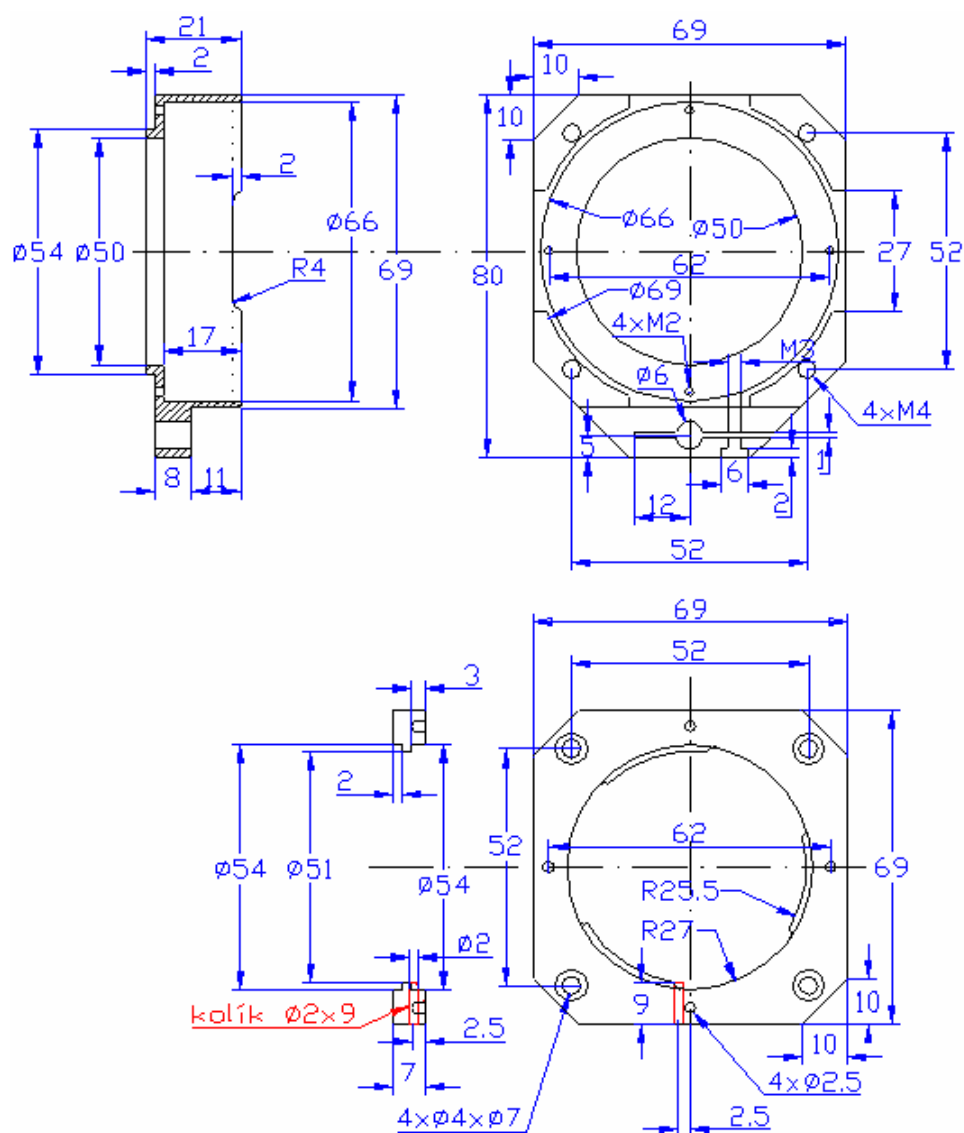
Obr. 10.2 Elektrické schéma navrhovaného modulu CanEF



Obr. 10.3 Komunikace mezi modulem CanEF a objektivem. Na snímku je kompletní komunikace při požadavku na vystavení mechanické clony



Obr. 10.4 Plošný spoj modulu CanEF



Obr. 10.5 Část technické dokumentace mechaniky modulu CanEF

10.3 Reference Pegas Nonwovens, a.s. – netkané textilie

10.4 Reference AVX – Systém pro měření objemu a plochy kapek stříbrné lepící pasty – kapitola 2.2.1