

# Technická univerzita v Liberci

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií



## Počítačová analýza obrazu úzkých textilií z hlediska jakosti zpracování a vad

Autoreferát disertační práce

březen 2006

Lukáš MATELA

# Technická univerzita v Liberci

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

## Počítačová analýza obrazu úzkých textilií z hlediska jakosti zpracování a vad

## Digital Image Analysis of Narrow Textiles from the View of Quality and Faults

Ing. Lukáš MATELA

Studijní program: P 2612 Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612V045 Technická kybernetika

Pracoviště: Katedra měření

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Technická univerzita v Liberci

Hálkova 6, 461 17 LIBEREC 1

Školitel: Doc. Ing. Ivan JAKSCH, CSc.

### Rozsah disertační práce

Počet stran: 104

Počet příloh: 6 + CD

Počet obrázků: 51

Počet tabulek: 5

## Abstrakt

Výroba úzkých textilií je jedním z průmyslových odvětví, ve kterém se dosud nepodařilo nasadit systém počítačového vidění pro automatickou inspekci výrobků z hlediska jakosti. Z hlediska požadavků na zvyšující se produktivitu práce je však nasazení takových systémů v rámci automatizace v budoucnu nezbytně nutná.

Práce je řešena jako jeden z úkolů Výzkumného centra TEXTIL a specializuje se na nalezení algoritmů schopných identifikovat některé vady splétaných šňůr. Základním požadavkem je schopnost provádět inspekci v reálném čase při procesu převíjení, který je ze všech výrobních operací nejrychlejší. Tento požadavek vylučuje využití výpočetně náročných metod počítačové analýzy obrazu.

Pro identifikaci vad je použito příznakové rozpoznávání založené na metodě maximální pravděpodobnosti. Získávání příznaků předchází separace profilů jasových hodnot z původního šedotónového obrázku. Jednotlivé profily jsou podrobeny číslíkovému zpracování a z nich je získán histogram lokálních maxim.

Součástí práce je i navržení vhodných hardwarových prostředků pro samotné snímání obrázků, které zahrnuje osvětlovač, optiku a samotnou kameru s rozhraním vhodným pro připojení k vyhodnocovací jednotce. V úvahu přichází vyhodnocovací jednotka založená na počítači typu PC nebo specializované zařízení založené na signálovém procesoru.

Hlavním přínosem disertační práce je nalezení vhodných a z hlediska výpočetní náročnosti přijatelných rozpoznávacích algoritmů pro kontrolu jakosti textilií, jejichž automatická inspekce v navrženém rozsahu nebyla dosud použita. Vhodnost implementace algoritmů byla prověřena na základě rozsáhlé experimentální činnosti. Výstupem práce je obslužný program, který po úpravách směřujících ke snadné a uživatelsky přívětivé ovladatelnosti obsluhy může být nasazen v reálné průmyslové výrobě.

V práci prezentovaný způsob automatické inspekce úzkých textilií v reálném čase je připravován k zahájení patentového řízení.

Klíčová slova: úzké, textilie, splétané, šňůry, automatická, inspekce, detekce, vad

## Abstract

Narrow textile production is one of the industrial branch where was not applied machine vision system for automated inspection till this time. Requests for increasing productivity makes it necessary as a part of automation in the future time.

Thesis is solved as one of tasks of Research Centre TEXTIL and is specialised for proposal of algorithms able to detect some faults on braided cords. The basic request for algorithms is capability to work in real-time during the winding or finishing. Winding is the fastest of all manufacturing processes. Speed request forecloses using of time-consuming methods of digital image analysis.

Statistical recognition methods based on maximal probability are used for faults identification. Symptoms for recognition are obtained after digital signal processing of line-profiles from original grey-level images. Line profiles are filtered using convolution and after local maxima detection is computed histogram. Histogram is a source of final symptoms.

Thesis includes also proposal and specification of suitable hardware components, illumination, lenses and the camera. Interface of the camera has to be compatible with capable interface of evaluation unit. Two possible platforms for evaluation is possible to consider: PC based unit or specialized device based on digital signal processor.

The main contribution of Ph.D. thesis is finding of suitable, low time-consuming methods for fault detection. Proposed methods were tested and verified by many experiments. The result of thesis is a software, which could be applied in real manufacturing process.

Presented methods for automated inspection of narrow textiles in real-time is prepared to start patent procedure.

Keywords: Narrow, Textiles, Braided, Plaited, Automated, Inspection, Fault, Detection

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2 Současný stav</b>	<b>4</b>
2.1 Současné hardwarové prostředky . . . . .	4
2.2 Řešené problémy . . . . .	5
2.2.1 Automatická inspekce ozdobných krajk . . . . .	5
2.2.2 Automatická inspekce plošných textilií . . . . .	5
<b>3 Úzké textilie a jejich vady</b>	<b>7</b>
3.1 Vady splétaných šňůr . . . . .	7
3.2 Podmínky inspekce . . . . .	9
<b>4 Použité prostředky</b>	<b>10</b>
4.1 Hardwarové prostředky . . . . .	10
4.1.1 Kamery . . . . .	10
4.1.2 Zachytávací karty . . . . .	10
4.1.3 Optika . . . . .	11
4.1.4 Osvětlovače . . . . .	11
4.1.5 Krokový motor s řídicí deskou . . . . .	12
4.2 Softwarové prostředky . . . . .	13
4.2.1 Matlab . . . . .	13
4.2.2 LabWindows/CVI . . . . .	13
4.2.3 Další podpůrné aplikace . . . . .	13
<b>5 Použité metody</b>	<b>14</b>
5.1 Konvoluce jako nástroj filtrace . . . . .	14
5.2 Způsob získávání příznaků . . . . .	14
5.2.1 Profil jasových hodnot . . . . .	14
5.2.2 Získávání příznaků . . . . .	15
5.3 Rozpoznávací metoda maximální pravděpodobnosti . . . . .	16
5.3.1 Metoda maximální pravděpodobnosti . . . . .	16
5.4 Volba, výběr a redukce příznaků . . . . .	17
<b>6 Experimentální část</b>	<b>20</b>
6.1 Model převíjecího stroje . . . . .	20
6.2 Popis aplikace <b>Faults</b> . . . . .	20
6.3 Experimenty . . . . .	22
6.4 Zhodnocení z hlediska rychlosti . . . . .	25
6.5 Možnosti realizace . . . . .	26
<b>7 Závěr</b>	<b>27</b>

# 1 Úvod

Počítačové zpracování obrazu, jeho analýza a počítačové vidění je disciplína, jejíž výstupy se v poslední době stále častěji užívají v průmyslové výrobě. Největší rozmach nasazení aplikací počítačového zpracování obrazu zaznamenává automobilový průmysl, kde je dodržování nejvyšší kvality výroby nutnou podmínkou konkurenceschopnosti. Kromě automobilového průmyslu jsou aplikace počítačového vidění pro inspekci výrobků nasazovány také všude tam, kde byla kontrola sériové výroby doposud prováděna lidskou obsluhou a kde je zapotřebí se vyhnout chybám způsobeným lidským faktorem. Důvodem pro nasazení aplikací počítačového zpracování obrazu je často také potřeba provádět kontrolu bezdotykově. Z hlediska produktivity práce je nutné při postupně stále rostoucích mzdových nákladech výrobní procesy automatizovat a tedy i využívat aplikace počítačového vidění. Tento předpoklad se stává nezbytným pro zachování a další rozvoj průmyslové výroby ve středoevropském regionu.

Existuje však stále ještě řada průmyslových odvětví, která se dosud nedočkala nasazení aplikací počítačového vidění pro automatickou inspekci kvality výrobků. Mezi tuto skupinu můžeme zařadit také některá odvětví textilní výroby.

Výzkum v oblasti textilního průmyslu má na Technické univerzitě v Liberci dlouholetou tradici, na niž navazují novodobé projekty Výzkumného centra TEXTIL. V něm jsou sdružena pracoviště několika fakult liberecké Technické univerzity a Výzkumný ústav textilních strojů. *Laboratoř počítačového zpracování obrazu při Katedře měření* řeší jako jeden z úkolů Výzkumného centra TEXTIL právě úlohu detekce vad úzkých textilií. Řešení úlohy předchází aplikovaný výzkum, který zahrnuje tato disertační práce.

Jedním z cílů práce je zmapovat situaci v oblasti kontroly výroby tzv. úzkých textilií<sup>1</sup>. Mezi úzké textilie se řadí široká škála výrobků jako například splétané šňůry, šňůry pletené technologií osnovního i zátažného pletení, stuhy a prýmky vyrobené technologií tkaní, splétání nebo jehlového pletení atd. Všechny vyjmenované textilie mají tu vlastnost, že jejich struktura je pravidelná. Pravidelnost opakování do jisté míry předpokládá použití metod, které se o tuto pravidelnost budou opírat. Práce se zaměřuje nejvíce na úzké textilie ze skupiny splétaných šňůr.

Vzhledem k tomu, že výroba úzkých textilií nepatří mezi hlavní obory textilní výroby, nebylo doposud výzkumu v této oblasti z hlediska automatické inspekce věnováno velké úsilí. V praxi se běžně nasazují pro výstupní kontrolu jen zařízení hlídající příčné rozměry výrobků. Některé pokusy o nasazení systémů počítačového zpracování obrazu lze využít jen pro velice úzkou škálu výrobků a systém navíc pracuje relativně velmi pomalu.

---

<sup>1</sup>Pojem úzké textilie je převzat z anglicky běžně používaného termínu Narrow Textiles, který zahrnuje produkty vyrobené nejrůznějšími technologiemi, jejichž jeden rozměr výrazně převyšuje další dva.

Stěžejním cílem práce je vytvoření předpokladu pro možné nasazení automatizovaných inspekčních stanic právě v oblasti výroby úzkých textilií a to nalezením vhodných metod a způsobu jejich použití. Dále si práce klade za cíl vyspecifikovat na základě navržených algoritmů hardwarové požadavky, které budou použitelné pro realizaci zařízení pracující v reálném čase za běžně používaných výrobních podmínek.

## 2 Současný stav

Problematika použití optických metod pro inspekci textilií je podmíněna snahou výrobců o dosažení maximální kvality výrobků. Úzké textilie nalézají využití v mnoha různých oblastech zpracovatelského průmyslu. Ne vždy je zapotřebí, aby daný výrobek dosahoval ve všech směrech vynikajících parametrů. Často je totiž hlavním kritériem výrobku jeho cena.

Na druhé straně existuje řada oblastí, které vyžadují, aby úzké textilie použité ať už jako vstupní materiál nebo přímo jako finální výrobky dosahovaly nejlepších možných parametrů. Právě v takových případech je důležitá kontrola jakosti v co největším rozsahu.

### 2.1 Současné hardwarové prostředky

V posledních několika letech prožívá trh s kamerovými systémy a systémy počítačového vidění obrovský rozmach. Celá řada firem se zaměřila na prodej takových systémů. Je však zapotřebí rozdělit tyto systémy do příslušných kategorií.

První kategorii tvoří ta nejjednodušší zařízení, která jsou stavěna pro jednoúčelové úkoly bez možnosti programování. Tato zařízení jsou v anglickém jazyce označována pojmem *Checker* a jejich typické nasazení představuje například čtení čárových nebo maticových kódů.

Další kategorií jsou systémy obsahující CCD nebo CMOS snímač. Úloha zpracování obrazu však spočívá v porovnávání tvarů prahovaných obrázků. Takové systémy slouží pro kontrolu hrubých rozdílů součástek, případně jejich přítomnosti na kontrastním podkladu, například v protisvětle. Dodávají je například firmy Omron nebo Siemens.

Jinou kategorii tvoří kamerové systémy, které jsou schopny zpracovávat již náročnější úkoly. Typickým příkladem je kontrola přítomnosti součástky, měření rozměru a současně například čtení čárových nebo maticových kódů, případně čtení textu. Velký rozsah nasazení této kategorie systémů, zejména v automobilovém průmyslu, umožnilo snadné ovládání a konfigurace úloh a to i pro osoby, které nejsou podrobně obeznámeny s algoritmy počítačového zpracování obrazu. Mezi dodavatele takových systémů patří firmy Siemens, National Instruments, Cognex nebo DVT.

Kategorii systémů s největšími možnostmi tvoří uspořádání založené na jedné nebo více kamerách a počítači typu PC, který může být případně vybaven také zachytávací (grabovací) kartou. Takové systémy zpravidla dovolují v programovacím jazyce realizovat algoritmy „šité na míru“ dané aplikaci.



## 2.2 Řešené problémy

### 2.2.1 Automatická inspekce ozdobných krajek

Problém automatické inspekce ozdobných krajek řeší [18]. Autoři z De Montfortské Univerzity v Leicesteru popisují, že proces inspekce probíhá přímo na výrobním stroji. Značnou výhodou při řešení tohoto problému je nízká rychlost výběhu krajek, která je 6 mm/sec. Díky tomu bylo možné realizovat poměrně náročné operace na tehdejších hardwaru, který představoval SUN Sparc work-station s výkonem ekvivalentním PC 486 pracujícím na frekvenci 50 MHz. Pro inspekci je nejprve použito prahování a následně se na vzniklý binární obraz aplikuje neuronová síť, která má odhalit vady v textilií.

Vzhledem k tomu, že článek [18] byl publikován v roce 1995, lze předpokládat, že realizace celého úkolu byla experimentálně provedena ještě dříve a v dané době se jednalo o poměrně převratný postup. Jedná se o jediný případ, kdy je v uznávaných vědeckých periodikách popsána automatická inspekce úzkých textilií.

### 2.2.2 Automatická inspekce plošných textilií

Výchozím přístupem pro mnohé přínosné práce v této oblasti je článek [20], který popisuje přístup k tkanině jako k pravidelné ortogonální struktuře. Aplikace dvourozměrné Fourierovy transformace na obraz tkaniny poskytne spektrum prostorových frekvencí. Podle spektra lze usuzovat, jak je tkanina pravidelná a zda v její pravidelnosti není porucha - vada textilie. Vzhledem k datu tohoto příspěvku (1993) nebylo možné na tehdejší běžně dostupné výpočetní technice realizovat dvourozměrnou Fourierovu transformaci pro práci v reálném čase. Transformace byla realizována optickou soustavou a světlo dopadající na maticový detektor záření tudíž odpovídal spektru. Významné hodnoty bodů z maticového detektoru pak byly vyhodnocovány analogovým obvodem.

O rok později se v práci [19] problematikou automatické inspekce pletených plošných textilií užitím strojového vidění zabývá pracoviště již zmíněné Leicesterské Univerzity. Zde se jedná převážně o vyhodnocení výskytu skvrn, které reprezentují na jednobarevných pleteninách chybná oka. Vyhodnocení probíhá převážně na základě statistických údajů. V této práci se hledání vad nezakládá na periodicitě textilních struktur a tudíž nepřináší do námi řešené problematiky žádnou inspiraci.

Na práci [20] dále navazují po několika letech například příspěvky [25] a [23]. Společným jmenovatelem obou prací je to, že spektrum pořízeného obrazu tkaniny slouží jako vstupní údaje pro klasifikaci užitím neuronových sítí. Vzhledem k tomu, že užitím výpočetní techniky pro zpracování obrazu lze rozšířit možnosti detekce i jiných vad, než jen těch, které se projevují poruchou periody, byl inspekční systém popsáný v [25] obohacen o další možnosti popsáné v [24].

Práce [21] a [22] využívají pro klasifikaci obrazů ve spektrální oblasti neuronové sítě. Pro získání spektrální oblasti je použita vlnková (wavelet) transformace. Vlnková transformace je použita také v [31], zde je však pro klasifikaci použito genetických algoritmů.

Rovněž v příspěvku [33] je pro detekci vad plošných tkanin použita vlnková transformace. Jde však o přístup, v němž vlnková transformace zajistí v případě vady její významné zdůraznění a vyhodnocována je homogenita celého transformovaného obrázku. Přítomnost vady se potom projeví v transformovaných obrázcích významným kontrastem ve srovnání s pozadím.

V práci [28] je popsána aplikace Gaborovy filtrace na tkaných plošných textilích poškozených praním. Zde se však jedná, na rozdíl od ostatních jmenovaných publikací, o zpracování obrazu v zařízení, které nenárokuje provoz v reálném čase.

Pravděpodobně nejdále z pohledu dostupných informací zatím pokročili výzkumníci z Íránských pracovišť v práci [29]. Zaměřili se na inspekci plošných textilií vyráběných na okrouhlých pletacích strojích, takže tak jako v příspěvku [19] se jedná o inspekci plošných pletenin. Dále srovnávali výsledky Fourierovy transformace, vlnkové transformace a Gaborovy transformace. Pro klasifikaci výsledků spektrální oblasti pak používali neuronové sítě.

Práce [34] vytvořená na Hong-Kongském pracovišti v podstatě nepřináší ve srovnání s prací [20] a na ni navazujícími příspěvky [25] a [23] žádný výrazný posun. Nutno však zmínit, že práce byly řešeny z časového hlediska paralelně. V práci [34] je přehledně rozebrán hlavně postup získání FFT obrazu a z něj dále 7 základních příznaků odpovídajících nejvýznamnějším harmonickým složkám spektra. Těchto sedm příznaků pak bylo vyhodnocováno pouhým prahováním. Výsledkem popsané metody je detekce následujících vad tkanin: dvojitě vlákno, chybějící vlákno, přerušená (potrhaná) vlákna a změna hustoty dostavy.

V práci [26] je popsáno a kriticky zhodnoceno několik nevýhod neuronových sítí typu back-propagation<sup>2</sup>. Tyto nevýhody jsou v příspěvku eliminovány použitím metod pro rozpoznávání na základě statistických údajů.

Další práce ([27], [30] a [32]) se týkají spíše rozpoznávání jednotlivých typů tkanin nebo jejich vzorů, nikoli tedy detekce vad. Používá se opět již několikrát zmíněné spektrum a jeho zpracování pomocí neuronové sítě v případě příspěvku [27] nebo statistických informací v případě příspěvků [30] a [32].

Ze získaných poznatků lze usuzovat, že se (přes několik ambicí s užitím neuronových sítí pro klasifikaci příznaků) v poslední době autoři spíše přiklání k užití statistických rozpoznávacích metod. Tímto směrem se ubírá také tato disertační práce.

---

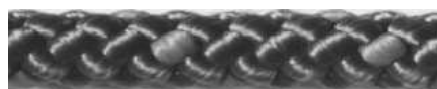
<sup>2</sup>Neuronová síť typu back-propagation je někdy nazývána jako síť se zpětnou propagací nebo zpětnou vazbou

### 3 Úzké textilie a jejich vady

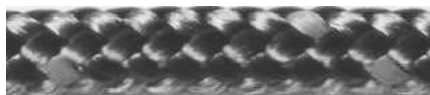
Vzhledem ke specializaci práce rozebereme ze škály úzkých textilií zejména splétané šňůry.

Struktura je tvořena soustavou nití (pramenů), které jsou vzájemně provázány tzv. vaznými body. Pojem *pramen* vychází z celosvětově užívaného anglického pojmu *strand* či *stream*. Na rozdíl od tkaných výrobků, kde je soustava nití podélná a příčná, je soustava pramenů splétaných výrobků vždy podélná s úhlopříčným kladením. Jednotlivé prameny v případě splétaných šňůr tvoří spirálu buď s pravotočivým nebo levotočivým závitem. U bezvadných výrobků je počet pramenů tvořící oba směry závitu shodný. Celkový počet pramenů u bezvadného výrobku je tedy vždy sudé číslo.

Splétané šňůry, které se vyrábějí ve velkých objemech lze dále rozdělit podle konfigurace splétacích stroje na dvě základní skupiny: šňůry s hrubým vzorem (viz. obr. 1(a)) a šňůry s jemným vzorem (viz. obr. 1(b)).



(a) Splétaná 8-mi pramenná šňůra - hrubý vzor splétání



(b) Splétaná 16-ti pramenná šňůra - jemný vzor splétání

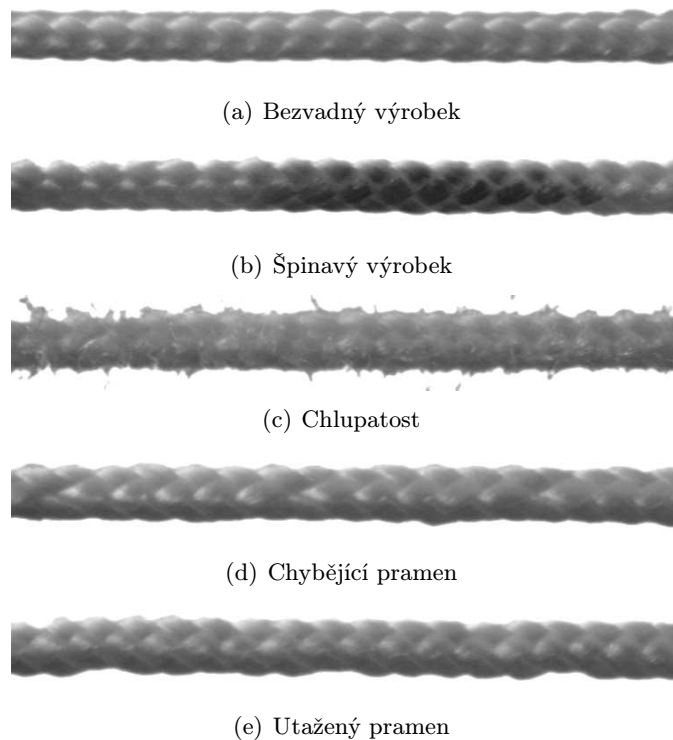
Obrázek 1: Hrubý a jemný vzor splétaných šňůr v závislosti na konfiguraci stroje

Šňůry s hrubým vzorem strukturně odpovídají tkanině s plátňovou vazbou, pokud bychom povrch splétané šňůry rozvinuli do plochy. Šňůry s jemným vzorem po rozvinutí do plochy odpovídají dvojvaznému kepru se střídou 4x4. Existují i výrobní stroje, které dovolují vyrobit splétané šňůry po rozvinutí odpovídající složitějším tkaným vazbám s větší střídou. Tvoří však jen minoritní skupinu na okraji výrobních programů firem.

#### 3.1 Vady splétaných šňůr

Splétané šňůry mohou být tvořeny kromě opletu také tzv. jádrem nebo výplní. Vzhledem k tomu, že absence jádra se často navenek vůbec neprojeví, nelze tuto vadu ani inspekcí založenou na zpracování obrazové informace zjišťovat. Existují však vady, které se navenek projevují a je žádoucí tyto identifikovat. Jedná se o následující vady:

- Špinavý výrobek - viz. obr. 2(b)
- Chlupatý výrobek - viz. obr. 2(c)
- Chybějící pramen - viz. obr. 2(d)
- Utažený pramen - viz. obr. 2(e)
- Změna hustoty vazných bodů

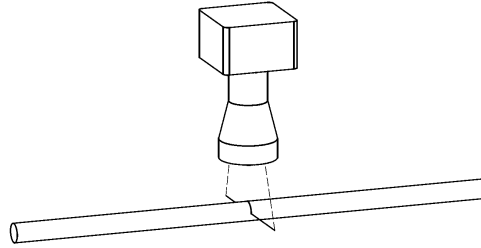


Obrázek 2: Vady splétaných šňůr

Vada chybějícího pramene a vada utaženého pramene se vizuálně velmi podobně projevují a proto se bude k oběma vadám přistupovat stejnými metodami.

Pro vysvětlení zákonitostí, kterým je podřízena struktura a projevení vad chybějícího a utaženého pramene navenek, je zapotřebí vzít v úvahu fakt, že jednotlivé prameny tvoří pravotočivé a levotočivé spirály. To znamená, že daný pramen po určité délce obkrouží povrch válce splétané šňůry. Tato délka je závislá na dvou faktorech. Prvním z nich je rychlost otáčení odvíjecích válců ve stroji. Druhým faktorem je počet pramenů tvořících textilií. Důležitým faktem je to, že pokud pramen chybí nebo je utažen, projeví se tato vada na celém obvodu textilie. Z toho důvodu vyplývá fakt, že pro obě jmenované vady je dostatečné, aby textilii snímala pouze jedna kamera. Základní uspořádání snímací části zařízení je na obrázku č. 3.

Pro detekci nečistot je ale zapotřebí sledovat celý povrch textilie (válce). Nečistoty se totiž již projevovat po celém obvodu válce nemusí. Obdobná situace nastává také u chlupatosti. Z toho důvodu je pro detekci zapotřebí umístit minimálně 2, lépe však 3 kamery. Zařízení pro detekci nečistot pracujících na principu jednoduchého prahování existují pro kontrolu tkaných stuh. Po vhodné modifikaci by pak takové inspekční přístroje mohly fungo-



Obrázek 3: Základní uspořádání snímací části

vat i pro splétané šňůry.

S úspěchem se dosud nepodařilo najít způsob jak nalézt vady chybějícího a utaženého pramene a vadu způsobenou změnou hustoty vazných bodů. Z toho důvodu se další práce zaměřuje právě na tento typ vad.

### 3.2 Podmínky inspekce

Běžný rozsah počtu vazných bodů splétaných šňůr na jednotku délky je od 1 do 15 na jeden centimetr. Rychlost výběhu splétaných šňůr z výrobních strojů se v závislosti na vyráběném sortimentu a na parametrech strojů běžně pohybuje v rozmezí od  $15\text{ cm/min}$  do  $1,5\text{ m/min}$ , což je poměrně nízká rychlost. Umístění inspekčního zařízení přímo na produkční zařízení (splétací stroj) by přineslo poměrně velké zvýšení jeho ceny, zvláště v případech, kdy produkční stroje mají více než jednu hlavu. V takové situaci je výhodnější umístit inspekční zařízení spíše na převíjecí stroj, který je schopen zpracovat podle konkrétní situace výrobky z 30 - 100 výrobních strojů. Navíjecí stroje pracují v rozmezí rychlostí  $1 - 5\text{ m/s}$ . V takovém případě jedno sofistikované zařízení s výkonným inspekčním systémem může mít z hlediska kvality výrobků naději na úspěch při nasazení. V krajním případě (převíjecí rychlost  $5\text{ m/s}$  a 15 vazných bodů na centimetr) je frekvence posuvu vazných bodů 7500 za sekundu.

## 4 Použité prostředky

### 4.1 Hardwarové prostředky

#### 4.1.1 Kamery

V *Laboratoři počítačového zpracování obrazu* byly pro řešení práce k dispozici dvě řádkové kamery - analogová a digitální.

**LC3021-PGN** je analogová kamera firmy Perkin Elmer. Z hlediska svých parametrů je k našemu účelu nejvhodnější. Disponuje totiž parametry, které lze pro naši aplikaci vhodně využít. Maximální řádková frekvence je  $36,2\text{ kHz}$ . Počet pixelů (fotoelementů) na CCD snímači kamery je 512. Podle specifikace je aktivní délka CCD snímače kamery  $7,17\text{ mm}$ , čemuž při 512 pixelech odpovídá rozměr fotoelementu  $14\ \mu\text{m}$ . Kameru lze provozovat ve dvou základních režimech: Master a Slave.

Režim Master nechává veškeré řízení přenosu dat na kameře LC3021-PGN. V režimu Slave je zapotřebí dodávat kameře potřebné řídicí signály. Navíc se ještě rozlišují další dvě alternativy režimu Slave, které zjednodušují požadavky zachytávacího hardwaru na řízení kamery.

**L101k-1k** je řádková kamera se standardizovaným digitálním rozhraním *Camera Link*. Výrobce je firma Basler. Kamera má ve srovnání s předchozím typem stejnou pixelovou frekvenci  $20\text{ MHz}$ . Vzhledem k tomu, že disponuje snímačem s rozlišením 1024 pixelů, dosahuje poloviční hodnoty maximální řádkové frekvence a to přesně  $18,8\text{ kHz}$ . Kamera disponuje snímačem, jehož fotoelementy mají rozměr  $10 \times 10\ \mu\text{m}$ , celková aktivní délka snímače je  $10,24\text{ mm}$ .

Výhodou použití této kamery je možnost nastavovat její parametry přímo pomocí softwaru **CCT+**, kde lze nastavit například dobu expozice, řádkovou frekvenci, řízení zisku a další parametry. Program také automaticky kontroluje, zda jsou jednotlivé parametry v souladu (není-li např. expoziční čas delší než perioda snímání řádků apod.).

#### 4.1.2 Zachytávací karty

Zachytávací karty neboli tzv. *framegrabbery* jsou nezbytnou komponentou pro přenos obrazové informace do počítače. Často se používá pojmu digitalizační karta, což vystihuje název pouze v případě, že se jedná o analogový přenos signálu z kamery. Obě dále popsané zachytávací karty byly vyrobeny firmou *National Instruments*.

**NI PCI-1409** je zachytávací karta se čtyřmi kanály pro vstup analogového signálu. Umožňuje připojit kamery se standardním rozhraním PAL (CCIR) a NTSC (RS-170), převádí ovšem pouze černobílou složku. Na rozdíl od své

předchůdkyně s označením NI PCI-1408, dovoluje připojit navíc také kamery s nestandardním analogovým rozhraním. Jedná se například o kamery s neprokládaným snímáním a přenosem signálu nebo právě o řádkové analogové kamery. Oproti mnohým ostatním zachytávacím kartám dovoluje navíc kvantovat vstupní analogový signál také desetibitově.

**NI PCI-1428** slouží pro přenos obrázků z kamery do počítače prostřednictvím digitálního rozhraní *Camera Link*. Karta disponuje zvnějšku přístupným jedním konektorem pro samotné rozhraní *Camera Link* a jedním konektorem pro připojení externích řídicích signálů. Tak, jako v případě karty PCI-1409 lze připojit sběrnici RTSI pro synchronizaci s dalšími zařízeními. Jednotlivá nastavení karty se provádějí v prostředí *MAX*. Karta disponuje pamětí 16 MB pro uložení pořízených snímků.

U obou zachytávacích karet lze při použití řádkových kamer v obslužném programu *MAX* volit, kolik řádků má obsahovat pořízený obrázek. Jednotlivé řádky přijaté z kamery jsou ukládány v paměti karty za sebe a teprve po dosažení stanoveného počtu řádků je obrázek přenášen do operační paměti počítače. Do procesu zpracování pak vstupuje celý obrázek.

### 4.1.3 Optika

Výhodou obou řádkových kamer, které byly pro řešení experimentální části práce využívány, je jejich slučitelnost s objektivy se závitem C/CS. *Laboratoř počítačového zpracování obrazu* disponovala v době realizace experimentální části práce objektivy s C závitem o ohniskových délkách 3,5 mm (F1,4), 6 mm (F1,4), 12 mm, 16 mm, přestavitelným objektivem 6-15mm a jedním telecentrickým objektivem firmy *Computar* s označením TEC-M55. Při použití telecentrického objektivu nevzniká díky jeho konstrukci perspektivní zkreslení a dosahuje se velké hloubky ostrosti.

Daná úloha sice nevyžaduje použití telecentrického objektivu, ale tento objektiv (dovolující spolu s extendérem UPC TEC-M55 2.0X navíc dvojnásobné zvětšení) jako jediný z výše vyjmenovaných zajistil dostatečné zvětšení snímané scény. Zkoumané textilie o šířích 1,5 - 2,0 mm tak byly přeneseny na cca 150 - 200 fotocitlivých elementů CCD snímače.

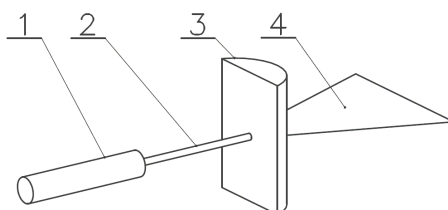
### 4.1.4 Osvětlovače

Osvětlovači byla při jeho výběru věnována velká pozornost. Je všeobecně známo, že dobrá volba osvětlovače (spolu s jeho optimálním nastavením a uspořádáním) je klíčovým faktorem pro pořízení vhodného obrázku. Při výběru osvětlovače bylo zapotřebí zohlednit některé faktory.

Jedním z požadavků, který byl na osvětlovač kladen je monochromaticnost nebo alespoň velmi úzké spektrum vyzařovaného světla. Díky této

vlastnosti se předejde možným problémům s *chromatickou aberací* optiky.

V práci byly použity dva osvětlovače. Jeden vyrobený z LED diod, pracující v pulsním režimu a druhý s laserovou diodou. Na obrázku č. 4 je principiální schéma použitého laserového osvětlovače tvořeného z laserové diody a speciální optické čočky rozšiřující paprsek do čáry. Obrázek č. 4 naznačuje tvar čočky a směr rozšíření paprsku. Jedná se o zdroj světla vlnové délky  $570\text{ nm}$  s vyzařovaným výkonem  $3\text{ mW}$ .



Obrázek 4: Tvar čočky způsobí roztažení paprsku do tvaru „čáry“. 1 - generátor laserového paprsku, 2 - laserový paprsek, 3 - válcová čočka, 4 - roztažený paprsek

Důležitou vlastností, která způsobila jisté pochybnosti s vhodností nasazení laserového osvětlovače pro naše použití, je přílišná koherenční délka použité laserové diody. V našem případě způsobuje poměrně velká koherenční délka nežádoucí jev, kterému se říká *koherenční zrnitost* (z angl. speckle pattern). V případě použití laserového osvětlovače tak vznikaly obrázky, které se jevíly jako zašuměné.

Pro účely testování byl vyroben synchronizovaný osvětlovač, který dovoluje díky krátkým a přesně časovaným okamžikům osvětit scénu tak, že výsledný obraz je v podobě vhodné pro další zpracování.

Vliv použitých osvětlovačů byl experimentálně prověřen a zdokumentován (viz. experiment 1).

#### 4.1.5 Krokový motor s řídicí deskou

Krokový motor s označením **SX23-1412** dodala spolu s řídicí jednotkou **CD30X** firma Microcon. Obojí je použito pro řízení modelu převíjecího stroje. Nejdůležitějším parametrem krokového motoru pro řízení rychlosti za daných podmínek je počet kroků na otáčku, který je v našem případě 200 (jeden krok odpovídá  $1,8$  stupně). Deska CD30x je navíc schopna motor provozovat zejména při nízkých otáčkách v režimu tzv. mikrokrokování, kdy jsou celé kroky dále děleny na mikrokroky. Pro naše účely je zapotřebí provozovat motor spíše ve vyšších otáčkách pro přiblížení se reálným převíjecím rychlostem.



## 4.2 Softwarové prostředky

### 4.2.1 Matlab

Matlab je vynikajícím nástrojem pro rychlé a snadné navržení algoritmů pracujících s matematickými operacemi. Výhodou je velmi snadná implementace maticových operací a množství rozšiřujících toolboxů. V našem případě byl využit zejména *Image Processing Toolbox* a *Signal Processing Toolbox*. Matlab byl využit především v počátcích experimentální činnosti při hledání vhodného způsobu získávání příznaků.

### 4.2.2 LabWindows/CVI

LabWindows/CVI je vývojové prostředí podporované firmou National Instruments založené na práci s programovacím jazykem ANSI C. Jde o plnohodnotný programový balík, který umožňuje vytvářet aplikace s veškerým uživatelským komfortem. Výhodou je dobrá podpora hardwarového vybavení dodávaného firmou National Instruments.

Možné bylo také využít velký soubor vyšších funkcí IMAQ-VISION, který rovněž usnadňuje práci vývojářům aplikací zpracovávajících obrazové informace.

### 4.2.3 Další podpůrné aplikace

**MAX** - *Measurement and Automation eXplorer*. Firma National Instruments dodává standardně ke všem svým hardwarovým prostředkům ovladače pro operační systém Windows. Spolu s těmito ovladači je implicitně nainstalován také program *Measurement and Automation Explorer* (zkráceně též MAX). Tento program slouží pro rychlé a snadné ověření funkčnosti specifického hardwaru a pro jeho konfiguraci. Jde vlastně o konfiguraci meziřstvy mezi zachytávací kartou a samotnou aplikací.

**CCT+** - *Camera Configuration Tool* je program vyvinutý v Javě, který slouží pro konfiguraci kamer Basler. Program je vytvořen obecně pro komunikaci s kamerami disponujícími nejen rozhraním *Camera Link*, ale také pro kamery konfigurované pomocí sériové linky RS-232. V nabídce komunikačních rozhraní lze zvolit buď dostupné sériové porty (COM1, COM2) nebo rozhraní označené *National Instruments, img1*, kde **img1** je identifikátor shodný s identifikátorem v podpůrném programu *Measurement and Automation Explorer*.

Dále byly využity programy **INMOTION PC Utilities** pro komunikaci s řídicí deskou krokového motoru a nástroj **VariCAD** pro 3D modelování objektů. V programu **VariCAD** byl vytvořen návrh a dokumentace pro výrobu modelu převíjecího stroje.

## 5 Použité metody

Pro detekci vad byla v práci využita rozpoznávací metoda založená na příznakovém popisu. Postup získávání příznaků vychází ze striktního požadavku na rychlost zpracovávání v reálném čase. Při navrhování metod byla zohledněna jejich případná implementace do signálových procesorů.

### 5.1 Konvoluce jako nástroj filtrace

Konvoluce je matematický operátor, který lze využít při zkoumání přenosových jevů, při řešení inverzních úloh nebo třeba při filtraci signálů. Konvoluci v diskrétní podobě lze interpretovat na představě odezvy signálu  $x[n]$  na impulsní odezvu systému  $h[n]$ . Na tomto principu pracují filtry s konečnou impulsní odezvou (filtry typu FIR). Výstup z filtrace je pak dán sumou

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x[k]h[n-k] \quad (1)$$

Ve výše uvedeném předpise je pak  $h[n]$  impulsní odezvou filtru. V našem případě byl v práci užit filtr, jehož impulsní odezvou je invertovaná perioda kosinusovky o délce  $N$  a prakticky tak odpovídá Hanningovu okénku, jehož předpis je

$$F(n) = 0,5 - 0,5 \cos \frac{2\pi n}{N} \quad (2)$$

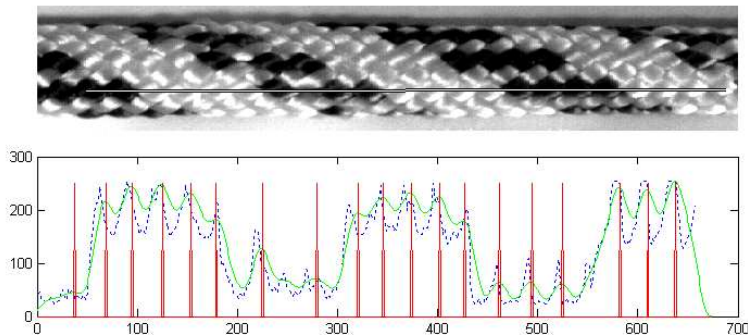
Užívání pojmu Hanningovo okénko pro námi aplikovaný filtr může být zavádějící, protože okénkových funkcí se využívá zpravidla k jinému účelu a délka okénka pak odpovídá délce zpracovávaného signálu. Způsob zvýraznění nízkých nebo naopak vysokých frekvencí pomocí konvoluce v akustických signálech je běžně implementován ve zvukových kartách (čipech) počítačů, kde jsou pro výpočet využity zpravidla signálové procesory.

### 5.2 Způsob získávání příznaků

#### 5.2.1 Profil jasových hodnot

Základním požadavkem, ze kterého je zapotřebí vycházet, je nutnost zpracovávání snímků v reálném čase při vysokých rychlostech. V odstavci 3.2 je vyčíslena krajní frekvence posuvu vazných bodů na 7500 za sekundu. Pro dodržení Nyquistova teorému je potom zapotřebí snímat obrázky s řádkovou frekvencí alespoň 15 kHz. To vylučuje výpočetně náročné algoritmy. Jednou z možností, jak se vyhnout zpracování velkého objemu dat je redukce plošné obrazové informace na informace jednorozměrné. Cestou k tomu je například užití tzv. *profilů jasových hodnot*. Ukázka profilu jasových hodnot

extrahovaného ze staticky pořízeného snímku je na obrázku č. 5. Z původního jasového profilu (modrý čárkovaný graf), který koresponduje s čarou nataženou v horní části obrázku č. 5, byla po filtraci (zelený plný graf) provedena detekce lokálních maxim na signálu (červené špičky).



Obrázek 5: Profil jasových hodnot podél úsečky natažené podél staticky pořízeného obrázku úzké textilie. Modrý čárkovaný graf - profil jasových hodnot, zelený plný graf - filtrovaný signál, červené špičky - lokální maxima

Při snímání obrázků řádkovou kamerou v reálných experimentech pak není nutné využívat celý řádek pixelů, které kamera posílá na svůj výstup, ale jen několik pixelů vytvářejících stopu - jasový profil.

### 5.2.2 Získávání příznaků

Rozpoznávacím metodám budou předkládány obrazy objektů jakožto redukované, ale dostatečně reprezentativní příznaky. Nalézt vhodný přístup k získávání těchto příznaků patří často k nejnáročnější fázi celého procesu rozpoznávání. Již od počátku hledání nejvhodnějších příznaků pro rozpoznávání bylo zřejmé, že se jejich volba bude opírat o pravidelnost struktury textilních útvarů. Pro rozpoznávání vad byly v práci vzaty v úvahu tři způsoby získávání příznaků. U prvních dvou způsobů se vycházelo ze separace profilů jasových hodnot z obrázků. Ze tří zvažovaných způsobů, které jsou v samotné práci více rozebrány se nejlépe osvědčila metoda popsaná v následujícím textu.

Jako nejvhodnější metoda se jeví hledání lokálních maxim na jasových profilech. Z profilu jasových hodnot získáme signál, který z našeho pohledu obsahuje velký podíl šumu. Nejedná se vždy přímo o šum. Jednotlivé prameny jsou složeny z mnoha vláken, z nichž každé je (v případě syntetického původu) kruhového průřezu. Odraz svazku takových vláken pak pochopitelně netvoří homogenní plochu. Pro odstranění tohoto nepříznivého jevu je použito filtrování užitím konvoluce s kosinovkou vhodné periody. Úkolem konvoluce je zvýraznění dominantní frekvence v signálu a naopak po-

tlačení odlišných přítomných frekvencí. Detekce lokálních maxim na níž je algoritmus získávání příznaků založen, je v případě nefiltrovaného signálu samozřejmě problémem. Lokální maxima by v případě zašuměného signálu neodpovídala skutečným maximům, jež je zapotřebí detekovat.

V aplikaci **Faults** byl implementován algoritmus, který optimální periodu navrhne sám. Více je tento algoritmus rozebrán v disertační práci.

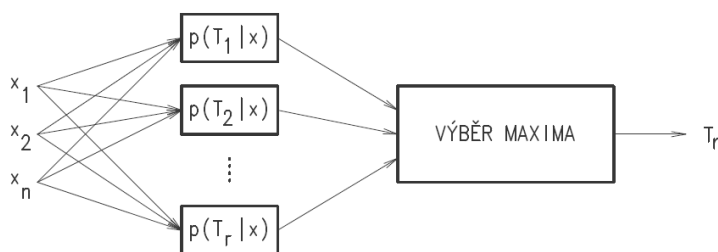
Po aplikaci konvoluce kosinuskou na původní signál jasového profilu získáme již poměrně hladký graf, na němž lze snadno detekovat lokální maxima. Jako příklad může sloužit zelený graf na obrázku číslo 5 a jemu příslušející (červenými špičkami zvýrazněná) lokální maxima. Do histogramu se ukládají informace o množství výskytu jednotlivých vzdáleností lokálních maxim. Jednotlivé složky histogramu představují získané příznaky.

## 5.3 Rozpoznávací metoda maximální pravděpodobnosti

### 5.3.1 Metoda maximální pravděpodobnosti

Tato metoda se nazývá také metodou maximální chyby.

Schéma klasifikátoru s výpočtem maximální pravděpodobnosti je na obrázku č. 6.



Obrázek 6: Schéma klasifikátoru s výpočtem maximální pravděpodobnosti

Pro normální rozložení jednorozměrné veličiny lze vyjádřit vztah:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

Tento vztah lze pro výpočet pravděpodobnosti z vícerozměrných veličin rozšířit následovně:

$$p(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^p \det \Sigma}} e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{x}-\bar{\mathbf{x}})^T \Sigma^{-1}(\mathbf{x}-\bar{\mathbf{x}})} \quad (4)$$

Namísto rozptylu označeného ve vztahu (3) symbolem  $\sigma$  je v předpise (4) použit symbol  $\Sigma$ , který reprezentuje tzv. *kovarianční matici*, jež je zobecněním rozptylu u vícerozměrných veličin. Prvky matice na hlavní diagonále

se skládají z rozptylů (druhých centrálních momentů) jednotlivých veličin. Prvky mimo hlavní diagonálu definují míru intenzity vztahu mezi jednotlivými proměnnými - kovariance . Jde o druhý smíšený centrální moment. Oba typy prvků (diagonální i mimodiagonální) lze obecně definovat jedním předpisem (6).

Kovarianční matice je obecně definovaná následovně:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12}^2 & \cdots & \sigma_{1n}^2 \\ \sigma_{21}^2 & \sigma_{22}^2 & \cdots & \sigma_{2n}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{n1}^2 & \sigma_{n2}^2 & \cdots & \sigma_{nn}^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

a platí, že

$$\sigma_{ij}^2 = E[(x_i - \bar{x}_j)(x_i - \bar{x}_j)] \quad (6)$$

Jednou z vlastností kovariance (jak lze snadno odvodit z definičního vztahu druhých centrálních momentů (6)) je to, že je symetrickou funkcí svých argumentů. Z toho vyplývá, že i kovarianční matice bude symetrická.

Kovarianční matice  $\Sigma$  definovaná výrazem (5) bude mít všechny významné prvky ležící na hlavní diagonále za předpokladu, že vektory příznaků nejsou korelované. Pokud je dopředu známo, že jednotlivé prvky vícerozměrné veličiny jsou nekorelované, lze kovarianční matici sestavit dosazením jednotlivých rozptylů na hlavní diagonálu a položením zbývajících prvků rovno nule.

## 5.4 Volba, výběr a redukce příznaků

Na základě obecně platných informací založených na praktických zkušenostech se ukazuje, že kvalita příznaků významně ovlivňuje úspěšnost rozpoznávání. Za určitých podmínek lze s větším množstvím příznaků dosáhnout lepších výsledků rozpoznávání. Na druhé straně větší počet příznaků přináší více výpočtů a tedy delší časy rozpoznávání. Často se raději volí větší počet příznaků a z nich se pak případně analyticky vybírají ty nejdůležitější.

Na příznaky klademe následující požadavky: praktičnost, reprezentativnost, diskriminativnost a nekorelovanost. Cílem každé metody redukce počtu příznaků je vybrat pouze takové příznaky, které jsou významné z hlediska rozpoznávání. Přínosem redukce počtu příznaků je současně snížení výkonné a tedy i časové zátěže rozpoznávače.

Metody založené na transformaci obrazového prostoru vycházejí z *Loève-Karhuenova rozvoje*.

Původní  $n$ -rozměrné příznakové vektory  $\mathbf{x}$  lze převést na  $m$ -rozměrné vektory  $\mathbf{y}$  pomocí vhodné lineární transformace  $\mathbf{T}$ .

$$\mathbf{y} = \mathbf{T}\mathbf{x} \quad (7)$$

kde  $\mathbf{T}$  je matice rozměru  $n \times m$

V přijatelnější formě lze transformační vztah (7) zapsat jako

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1n} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{m1} & T_{m2} & \dots & T_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

Aby transformace přinesla očekávaný užitek, hledá se takové  $\mathbf{T}$ , aby vzdálenost vektorů příznaků  $|\mathbf{y} - \mathbf{x}|$  (měřená na všech obrazech trénovací množiny) byla minimální - *Loève-Karhuenův rozvoj*.

Určení transformační matice  $\mathbf{T}$  je zapotřebí aplikovat následující postup:

1. Pro trénovací množinu se určí matice  $\mathbf{A}$  o rozměrech  $n \times n$ , kde  $n$  je počet příznaků. Existují dvě metody výpočtu matice  $\mathbf{A}$ :

a) **autokorelační matice**

$$a_{ij} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x_i x_j \quad (9)$$

$K$  ... počet obrazů trénovací množiny

$x$  ... příznaky pro konkrétní obraz

b) **kovarianční (disperzní) matice**<sup>3</sup>

$$a_{ij}^2 = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (x_i - \bar{x}_j)(x_i - \bar{x}_j) \quad (10)$$

$\bar{x}$  ... vektor středních hodnot určený na trénovací množině

2. Naleznou se vlastní čísla a vlastní vektory matice  $\mathbf{A}$ . Řešením jsou:  
vlastní čísla:  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$   
vlastní vektory:  $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n$
3. Vlastní čísla se uspořádají podle velikosti  
 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n \geq 0$
4. Transformační matice  $\mathbf{T}$  se vytvoří z  $m$  vlastních vektorů odpovídajících prvním  $m$  vlastním číslům

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{v}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1n} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{m1} & T_{m2} & \dots & T_{mn} \end{bmatrix}$$

---

<sup>3</sup>kovarianční matice již byla vyjádřena výrazem 5 v odstavci 5.3.1

5. Při rozpoznávání se obrazy klasifikovaných objektů transformují podle vztahu  $\mathbf{x}' = \mathbf{T}\mathbf{x}$

Obecně není zajištěno, že vlastní čísla a vlastní vektory mají reálné prvky. V matematické teorii však existuje věta, která říká, že je-li matice, z níž se vlastní čísla a vlastní vektory počítají reálná a symetrická, potom jsou také vlastní čísla a vlastní vektory reálné. V případě kovarianční matice je předpoklad symetričnosti a reálnosti splněn. Díky tomu lze pracovat pouze s reálnými složkami čísel, které nám poskytnou obecné matematické knihovny funkcí, jež bývají v programovacích jazycích implementovány.

Příznaky, které jsou transformovány a zobrazeny v jiném prostoru, jsou po transformaci obtížně interpretovatelné z hlediska jejich významu, což může způsobit problémy spojené se změnou používaných vstupů.

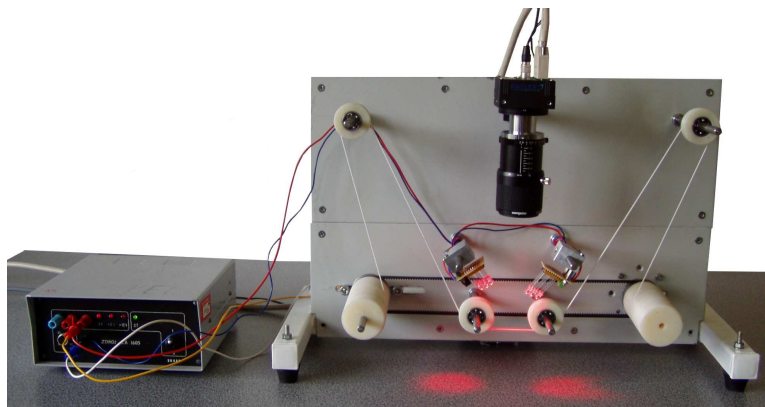
## 6 Experimentální část

Pro experimentální část práce byl vyvinut program **Faults**, dále podpůrné programy pro ukládání souborů snímaných kamerou na disk - **snap\_button** a **snap\_sequence**. Pro pořízení snímků za podmínek blízkých realitě byl zhotoven model převíjecího stroje poháněný krokovým motorem. V neposlední řadě byl vybrán vhodný optický řetězec pro snímání obrázků.

Výsledky práce jsou shrnuty v devíti experimentech, které zahrnují možná specifika zkoumaných textilií a měnící se parametry konfigurace hardwaru.

### 6.1 Model převíjecího stroje

Pro přiblížení se reálné situaci byl zhotoven model převíjecího stroje. K němu je připevněn osvětlovač a řádková kamera. Pohon modelu je realizován krokovým motorem s řídicí deskou. Dva válce hnané krokovým motorem střídavě navíjí a odvíjí textilií přes kladky. Fotografie modelu je na obrázku č. 7.



Obrázek 7: Model převíjecího stroje

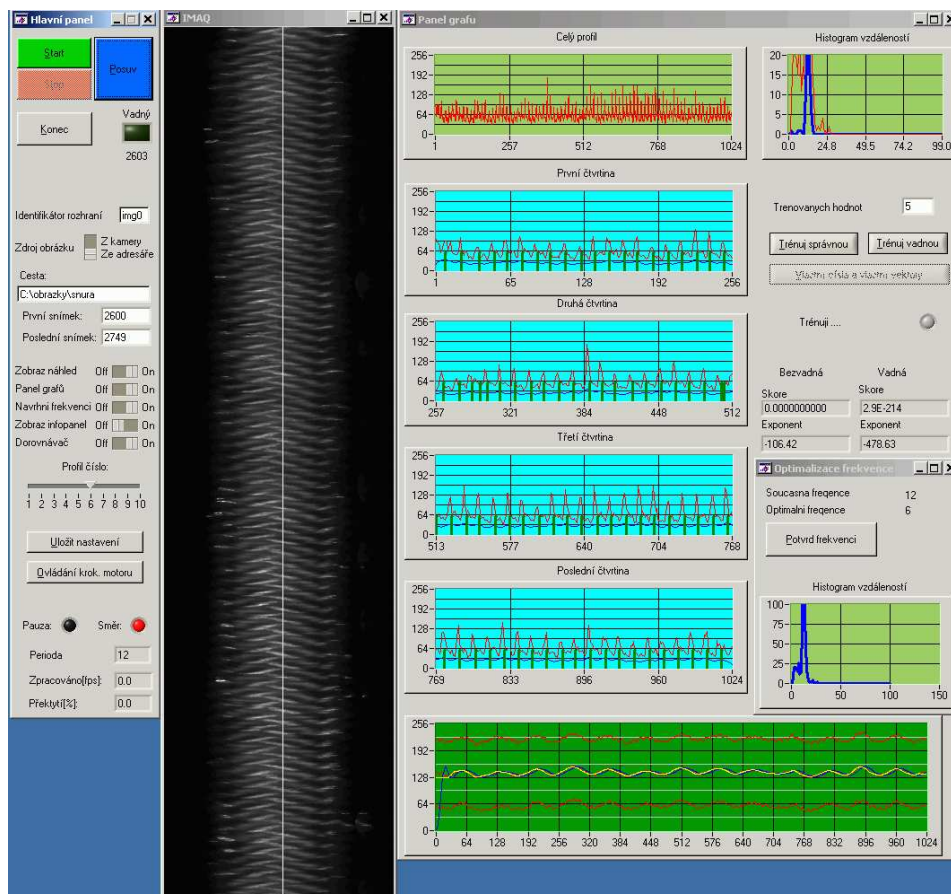
Model převíjecího stroje byl provozován při rychlostech 2800 a 4400 kroků za sekundu, čemuž při počtu 200 kroků na otáčku a při obvodu válce 47 mm odpovídají převíjecí rychlosti 2,1 a 3,3  $m/s$ .

### 6.2 Popis aplikace Faults

Aplikace **Faults** vyvinutá v prostředí LabWindows/CVI je praktickým výstupem celé práce. V průběhu experimentální činnosti byla vylepšována a podle potřeb obohacována přídatnými funkcemi. Z nejzajímavějších jmenujme algoritmus hledání optimální délky kosinusovky pro filtraci jasových



profilů užitím konvoluce, algoritmus dorovnávání „hrbatosti“ nebo redukcí počtu příznaků.



Obrázek 8: Ukázka uživatelského rozhraní aplikace

Aplikace je navržena tak, aby bylo možné v případě potřeby zapnout nebo vypnout vizualizaci určitých datových výstupů, což bylo uplatňováno jak při ladění, tak při experimentální činnosti. Základním oknem programu je **Hlavní panel**, který je ovládací centrálou celého programu. Otevírá a zavírá všechna ostatní okna, zapíná nebo vypíná podpůrné algoritmy a umožňuje nastavit potřebné vstupní hodnoty. Sada přepínačů umístěných v prostřední části panelu dovoluje zapnout vizualizaci:

- zobrazení samotné, aktuálně zpracovávané textilie - přepínač *Zobraz náhled*
- panelu s grafy (grafy znázorňující průběh jasového profilu a následně získané hodnoty) - přepínač *Panel grafů*

- panel s možností automatické volby frekvence periodického průběhu textury textilie - přepínač *Navrhni frekvenci*
- informační panel s výpisem středních hodnot příznaků a jejich rozptylů - přepínač *Zobraz infopanel*

Pátý přepínač s označením *Dorovnávač* zapíná či vypíná algoritmus dorovnávaní „hrbatých“ obrázků textilií.

**Algoritmus hledání optimální délky filtru** dovoluje bez apriorní znalosti o základní periodě výskytu vazných bodů v obrázku nalézt periodu kosinusovky (délku filtru), která se konvoluce účastní. Vzhledem k tomu, že algoritmus prohledává všechny přípustné periody, je poměrně výpočetně náročný. Vzhledem k tomu, že algoritmus má smysl provádět jen při změně sortimentu kontrolovaných textilií, není výpočetní náročnost důležitá.

**Algoritmus dorovnávaní** se podílí na předzpracování pořízených snímků. Algoritmus využívá operace matematické morfologie a manipuluje s pixely obrázku pro dosažení vhodného obrázku. Díky výpočetně náročným operacím snižuje dosahovanou rychlost celého rozpoznávacího procesu.

Další podrobnější popis aplikace a způsob použití jednotlivých funkcí je rozebrán v disertační práci.

## 6.3 Experimenty

Následující odstavce shrnují výsledky a závěry experimentů podrobně zdokumentovaných v disertační práci.

### Experiment 1 - vliv osvětlení

Experiment prokázal, že typ použitého osvětlení a jeho nastavení neovlivňuje dosaženou úspěšnost a tudíž je způsob získávání příznaků na určité změně podmínek osvětlení nezávislý. Získaný poznatek je v případě praktické realizace velmi příznivý. Při řešení aplikací počítačového zpracování obrazu je často zajištění konstantních světelných podmínek rozhodujícím faktorem ovlivňujícím její použitelnost. V našem případě je samozřejmě rovněž žádoucí zajištění stabilních světelných podmínek, ale lze usuzovat, že z dlouhodobého hlediska by realizovaná aplikace neměla mít problémy například se zmenšením vyzařovaného množství světla polovodičových osvětlovačů vlivem jejich stáří (opotřebovanosti).

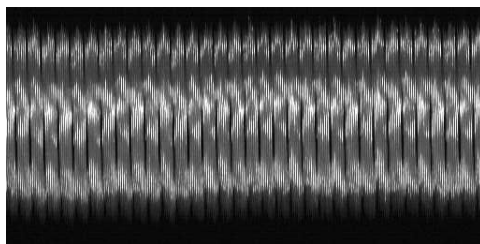
### Experiment 2 - vliv zkroucení textilie

Z experimentu lze vyvodit obecný závěr, který bylo možné již zpočátku očekávat. Pokud má být správně klasifikována bezvadnost také u zkroucených

textilií, je zapotřebí v procesu trénování toto zohlednit. Experiment prokázal, že chyba může být přehlédnuta, pokud je obsažena ve zkrouceném úseku textilie. Výskyt chyby klasifikace byl 72%. Vzhledem k tomu, že vada chybějícího pramene se objevuje zpravidla na délce větší než na jednom snímku a že zkroucení textilie je ve výrobním procesu ojedinělým jevem, je možné akceptovat i sedmdesátiprocentní úspěšnost. Navíc se zkroucení textilie dle technologických informací vyskytuje současně s výrazným zvýšením hustoty vazných bodů, což je detekováno jako vada s velkou úspěšností.

### Experiment 3 - limitní hodnota řádkové frekvence

Sada experimentů prokázala schopnost algoritmu pracovat s obrázky, které jsou pořízeny na hranici Nyquistova teorému, kdy nejmenší zajímavý detail snímané scény zaujímá velikost právě jednoho pixelu. Na obrázku č. 9 je znázorněna jedna realizace scény pořízené na hranici Nyquistova teorému, v našem případě pořízeno při řádkové frekvenci 1  $kHz$ .



Obrázek 9: Snímek pořízený na hranici Nyquistova teorému

### Experiment 4 - vliv počtu barevných pramenů

V experimentu, který je z hlediska obecnosti možné považovat za nejvýznamnější, byla prověřena skutečnost, že algoritmus je schopen vhodným natrénováním pokrýt poměrně velkou škálu vyráběného barevného sortimentu z hlediska vzoru. To je velmi pozitivní v případě reálného nasazení inspekčního systému v praxi. Absence častých zásahů obsluhy, která by algoritmus trénovala je důležitá z hlediska efektivnosti použití inspekčního systému. Velmi slibně se z hlediska spolehlivosti jeví také dosažená stoprocentní úspěšnost na testovací množině.

### Experiment 5 - vliv barvy pramene

Již v předchozím experimentu bylo pomocí natrénovaného konfiguračního souboru možné spolehlivě detekovat vady na obrázcích, které zahrnovaly také sady vytvořené pro tento experiment. Tím byl experiment 5 zahrnut

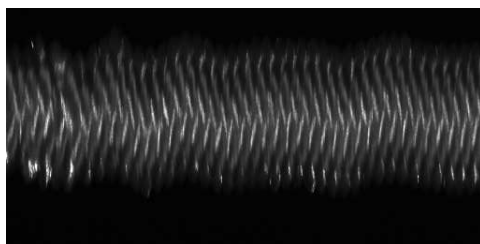
do experimentu 4 a lze prohlásit, že při vhodném natrénování nemá barva barevných pramenů na úspěšnost rozpoznávání vliv.

### **Experiment 6 - vliv umístění chybějícího pramene**

Experiment prokázal, že umístění chybějícího pramene vůči barevnému prameni nemá vliv na dosaženou úspěšnost algoritmu. Dále se ukázalo, že pro detekci vad lze použít natrénovaná data z konfiguračního souboru v experimentu 4 bez jakékoli další úpravy

### **Experiment 7 - délka vady**

Ze statistických důvodů byla v předchozích experimentech snaha o snímání obrázků, na nichž se objevuje co největší počet vazných bodů. Hodnoty v histogramech jsou pak ustálenější a dochází k menšímu rozptylu příznaků. Experiment však prokázal, že mají-li být detekovány spolehlivě i krátké poruchy, nelze používat příliš dlouhé obrázky. Tyto dva požadavky jsou protichůdné. Je proto vhodné hledat dobrý kompromis. Ukázalo se, že počet cca 41 vazných bodů na obrázcích o délce 512 pixelů ve druhé sérii je vhodný pro spolehlivou detekci krátkých vad. Jako příklad detekované krátké vady je na obrázku č. 10 snímek s vadou délky přibližně 6 vazných bodů.



Obrázek 10: Velmi krátká vada o délce cca 6 vazných bodů

### **Experiment 8 - redukce příznaků - srovnání**

Experiment prokázal, že po transformaci prostoru původních čtyř příznaků do prostoru získaného z *Loève-Karhuenova rozvoje* a zanedbáním nejméně významného z transformovaných příznaků je možné detekovat vady s obdobnou spolehlivostí jako před samotnou transformací a redukcí. Implementace algoritmů do signálového procesoru v případě realizace inspekčního zařízení pak může být velmi efektivní.

## Experiment 9 - vliv změny hustoty vazných bodů

Používaný způsob získávání příznaků dovoluje při rozpoznávání vad odhalit změnu hustoty vazných bodů s určitou tolerancí. Dosažená tolerance v řádu jednotek procent je pro dobrou funkčnost automatické inspekce důležitá a příznivá. Při převíjecím procesu totiž vlivem kolísání obvodových rychlostí na straně odvíjení a na straně navíjení dochází k působení osových sil v textilií. Díky elasticitě textilních materiálů i samotné struktury spletaných šňůr vyvolávají působící síly vratné deformace, které se na snímcích mohou projevit změnou hustoty počtu vazných bodů. Zařazení snímků pořízených za této situace mezi vadné by tak bylo nežádoucí.

V praxi je zajímavý zvláště případ odhalení vady, kdy je hustota vazných bodů vyšší od normálu. Taková vada při výrobním procesu příležitostně nastává.

### 6.4 Zhodnocení z hlediska rychlosti

Při realizaci experimentální části byla ověřována dosažená rychlost algoritmů. Testování proběhlo na dvou počítačích PC s následující specifikací:

- Procesor: AMD Athlon 64 3000+ s taktovací frekvencí 1.800 MHz
- Dual RAM: 2x512 MB DDR
- Základní deska: A8V Deluxe firmy Asus, chipset K8T800 Pro
  
- Procesor: Intel Pentium 4 CPU 3,0 GHz
- Dual RAM: 2x1024 MB DDR
- Základní deska: Springdale-G, chipset Intel i865 P/PE/G/i848P

Dosažené výsledky za různých podmínek jsou uvedeny v tabulce č. 1. V prvním sloupci tabulky je uvedena délka kosinusovky (filtru) podílející se na konvoluci signálu a délka samotného obrázku resp. délka signálu.

Nastavení programu	Rychlost zpracování na počítači s proc. AMD	Rychlost zpracování na počítači s proc. Intel
28 <i>px</i> , 1024 řádků	177 <i>fps</i> , překrytí 80%	141 <i>fps</i> , překrytí 75%
6 <i>px</i> , 1024 řádků	193 <i>fps</i> , překrytí 82%	153 <i>fps</i> , překrytí 77%
4 <i>px</i> , 512 řádků	224 <i>fps</i> , překrytí 69%	169 <i>fps</i> , překrytí 59%

Tabulka 1: Srovnání rychlostí zpracování snímků

Údaj o překrytí informuje, jak velká část obrázku je zpracována násobně. Ve třetím řádku tabulky sice došlo k výraznému nárůstu rychlosti zpracování obrázků, ale vzhledem k jeho poloviční délce došlo k současnému snížení údaje o překrytí. Poměr je vyčíslen na základě maximální možné řádkové frekvence, kterou bylo možné s dostupnými prostředky použít (36,2 *kHz*)

u kamery LC3021-PGN). Při zapnutí algoritmu odstraňování „hrbatosti“ způsobené vibracemi však došlo k výraznému snížení rychlosti zpracovaných snímků. Rychlost je v tomto případě 35,8 *fps*, což odpovídá překrytí přibližně 3%.

Experimenty prokázaly, že použití současně dostupných počítačů je pro danou implementaci algoritmů dostatečné. Zajímavý je fakt, že proti očekávání aplikace **Faults** pracuje rychleji na počítači s procesorem AMD.

Z uvedených údajů dále vyplývá, že dimenzování řádkové frekvence kamery tak, aby docházelo k vysokému rozlišení ve směru pohybu textilie, způsobuje negativní dopad v podobě zvýšení výpočetních nároků. Při používání delších period kosinusovky výrazně narůstá čas potřebný pro výpočet konvoluce. Řešením by bylo realizování konvoluce jako prostého součinu signálu a filtru ve spektrální oblasti a zpětné převedení do oblasti časové, tím se ale nárůst výpočetního času zpomalí. Proto je výhodné konfigurovat úlohu tak, aby byla docílena přiměřeně krátká délka periody. Důsledkem je také zvýšení počtu vazných bodů na jednom snímku, což má z hlediska statistiky příznivý dopad na dosaženou úspěšnost algoritmů s výjimkou nalezení krátkých vad (viz. experiment 7).

## 6.5 Možnosti realizace

Pro případnou realizaci inspekčního zařízení založeného na navržených algoritmech byly zvažovány tři platformy. První platforma založená na využití programovatelných hradlových polí (FPGA) se vzhledem k rozsáhlosti algoritmů nejeví jako perspektivní. Vývoj by v takovém případě byl neúměrně náročný, konstrukce v jazyce VHDL velmi složitá.

Druhou variantou je využití signálových procesorů (DSP). Vývojová prostředí umožňují programování aplikací pro DSP v jazyku C, v jazyku symbolických adres nebo v jejich kombinaci. To umožňuje na jedné straně rychlý vývoj softwaru a na druhé straně efektivní práci výpočetně náročných úseků. Současně je však zapotřebí realizovat hardwarovou část, zajistit způsob připojení kamery resp. CCD nebo CMOS snímače. Vzhledem k nákladům na vývoj samotného hardwaru by bylo ekonomické uvažovat o tomto řešení až v případě výroby desítek kusů inspekčních zařízení.

Jako třetí možná hardwarová platforma pro realizaci inspekčního systému je počítač typu PC s operačním systémem. Vzhledem k nutnosti zajištění kontroly v reálném čase je však zapotřebí program vhodně upravit tak, aby využil výhod technologie hyperthreading nebo dokonce dvouprocesorových systémů. Tento způsob dovolí zaručit zpracování všech pořízených snímků. Výhodou použití této varianty je z velké části připravený základ softwarové výbavy v podobě programu **Faults**. Nevýhodou této varianty je naopak poměrně velký zástavní prostor, který si počítač s perifériemi vyžadá.

## 7 Závěr

Předmětem disertační práce bylo zhodnocení možnosti nasazení aplikací počítačového zpracování obrazu pro automatickou kontrolu jakosti výrobků v oblasti výroby úzkých textilií z pohledu aktuálního dostupného technického vybavení. Součástí práce byl dále návrh algoritmů, způsobů jejich použití a nalezení vhodných hardwarových prostředků tak, aby celý navržený systém byl schopen pracovat při běžných podmínkách v reálném čase. Před započítím samotné práce byla provedena důkladná rešeršní fáze. Práce byla řešena ve dvou etapách, podle dostupných možností. V první etapě byly testovány navržené metody na staticky pořízených snímcích a byla studována problematika rozpoznávacích metod. Ve druhé etapě, po výrobě experimentálního modelu a po vybavení *Laboratoře počítačového zpracování obrazu* vhodnými komponentami kamerových systémů bylo možné provádět výzkum na obrázcích, které byly pořízeny v situaci blízké realitě.

Mezi nejdůležitější dílčí úkol práce patřilo nalezení vhodného příznakového popisu vypovídajícího o jakosti z hlediska vnějšího vzhledu textilií. Na příznakový popis byl kladen požadavek dostatečné, avšak zároveň pouze nezbytně nutné reprezentovatelnosti. Nezbytně nutná míra popisu znamená minimum popisných veličin a tedy malé výpočetní nároky. V souvislosti s potřebou zpracování dat v reálném čase je požadavek na minimální výpočetní nároky pochopitelný. Dalším úkolem byla volba vhodné rozpoznávací metody.

Rozsáhlá experimentální činnost postupně zpřesňovala požadavky na způsoby získávání příznaků, použité metody a jejich modifikaci. Výstupem práce je nejenom studie realizovatelnosti inspekčních zařízení, ale také funkční aplikace, která po úpravách směřujících k snadnějšímu způsobu ovládní laickou obsluhou může sloužit spolu s navrženým hardwarem v reálném provozu.

Přínosem práce je použití nového a z výpočetního hlediska velmi efektivního přístupu k hledání vad úzkých textilií s ohledem na požadavky vysoké rychlosti zpracování dat v reálném čase. V práci se podařilo na základě experimentů zohledňujících množství faktorů ukázat, jakým způsobem lze řešit automatickou inspekci výrobních a případně dokončovacích operací v některých úzce specializovaných odvětvích textilní výroby.

Zájem o systém automatické inspekce se předpokládá ze strany renomovaných společností vyrábějících sofistikované převíjecí stroje, případně ze strany firem zabývajících se automatizací v textilní výrobě. V Evropě jsou firmy tohoto zaměření situovány zejména ve Švýcarsku, Velké Británii nebo v Německu.

Rozšíření inspekčních systémů je samozřejmě podmíněno jejich cenou. Při implementaci výsledného systému se lze ubírat dvěma směry. Zařízení založené na platformě počítače typu PC je první možností, která nevyžaduje další vývoj hardwarových prostředků. Výhodou je využití softwarového zá-

kladu v podobě programu **Faults**, který byl při řešení disertační práce vyvinut. Druhým směrem je využití signálových procesorů. Promítnutí nákladů na další vývoj takového zařízení však může při výrobě malé série výslednou cenu navýšit. Takové zařízení by však velmi dobře vyhovělo požadavkům na malý zástavní prostor.

Případné nasazení inspekčního systému navrženého typu do reálného výrobního procesu přispěje bezesporu ke zvýšení produktivity práce v daném oboru.



## Literatura

- [1] ŠONKA M., HLAVÁČ V., BOYLE R.: *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*. P.W.S. Publishing, Boston 1999. ISBN 0-534-95393-X
- [2] ŠONKA M., HLAVÁČ V.: *Počítačové vidění*. Praha, Grada, 1992. ISBN 80-85424-67-3
- [3] FISCHER J.: *Optoelektronické senzory a videometrie*. Vydavatelství ČVUT, 2002. 143 s. ISBN 80-01-02525-X
- [4] HLAVÁČ V., SEDLÁČEK M.: *Zpracování signálů a obrazů*. Vydavatelství ČVUT, 2005. 255 s. ISBN 80-01-03110-1
- [5] NOUZA J.: *Metody rozpoznávání*. (Soubor přednášek). Liberec: TUL, říjen-prosinec 2003.
- [6] TAYLOR C. C., MICHIE D., SPIEGELHALTER D.J.: *Machine Learning, Neural and Statistical Classification*. Citováno září 2005. Dostupné z <http://www.maths.leeds.ac.uk/~charles/statlog/whole.pdf>
- [7] MATOUŠEK V.: *Rozpoznávání*. Skriptum. Citováno září 2005. Dostupné z <http://www.kiv.zcu.cz/studies/predmety/kro/Skriptum/K5.ps>
- [8] ČASTOVÁ N., KOZUBEK T.: *Integrální transformace*. Skriptum. Citováno leden 2006. Dostupné z [http://www.am.vsb.cz/studium/integralni\\_transformace/](http://www.am.vsb.cz/studium/integralni_transformace/)
- [9] USING A GRAY-LEVEL CO-OCCURRENCE MATRIX (GLCM): Citováno: 27.11.2005. Dostupné z <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/images/enhanc15.html>
- [10] DANĚK V.: *Speciální technologie a programování výroby: Speciální pleťářské technologie*. Ediční středisko VŠST Liberec, 1991. 53 s. ISBN 80-7083-063-8
- [11] DRUŽBÍK T., VLČEK K., NEUMANN P.: *Digitální signálové procesory v průmyslu*. *Automatizace* **47** (10), pp. 622-625. (2004). ISSN 0005-125X
- [12] HLAVIČKA J., SCHMIDT J.: *Programovatelné logické obvody*. *Sdělovací technika* **48** (1), pp. 3-6. (2000). ISSN 0036-9942
- [13] PAT. EP 0 115 573 A2: *Verfahren und Vorrichtung zur automatischen Erkennung von Fehlern in Geweben und ähnlichen textilen Flachengebilden*. Zellweger Uster AG, 15.08.1984.
- [14] INT. PAT. WO 98/08080: *Process and Device for Error Recognition in Textile Surface Formations*. Zellweger Luwa AG, 14.04.1997.

- [15] INT. PAT. WO 99/14580: *Process for Evaluating Data from Textile Fabrics*. Zellweger Luwa AG, 14.04.1998.
- [16] INT. PAT. WO 00/06823: *Method and Device for Evaluating Defects in Flat Textile Structures*. Zellweger Luwa AG, 19.07.1999.
- [17] INT. PAT. WO 92/08967: *Methods and Apparatus for Fabric Inspection*. Norton-Wayne, L., 13.11.1991.
- [18] SANBY C., NORTON-WAYNE L., HARWOOD R.: *The Automated Inspection Of Lace Using Machine Vision*. Mechatronics Vol. 5 (2/3), pp. 215-231, 1995
- [19] BRADSHAW, M.: *The Application of Machine Vision to the Automated Inspection of Knitted Fabrics*. Mechatronics Vol. 5 (2/3), pp. 233-243, 1995
- [20] RIBOLZI S., MERCKLÉ J., GRESSER J.: *Real-Time Fault Detection on Textiles Using Opto-electronic Processing*. Textile Research Journal **63** (2), pp. 61-71 (1993).
- [21] BARRET G. R., CLAPP T. G., TITUS K. J.: *An On-Line Fabric Classification Technique Using a Wavelet-Based Neural Network Approach*. Textile Research Journal **66** (8), pp. 521-528 (1996).
- [22] RAJASEKARAN S.: *Training-Free Counter Propagation Neural Network for Pattern Recognition of Fabric Defects*. Textile Research Journal **67** (6), pp. 401-405 (1997).
- [23] CHEN P. W., LIANG T. C., YAU H. F., SUN W. L., WANG N. C., LIN H. C., LIEN R. C.: *Classifying Textile Faults with Back-Propagation Neural Network Using Power Spectra*. Textile Research Journal **68** (2), pp. 121-126 (1998).
- [24] JEFFREY KUO C. F., LEE C. J.: *A Back-Propagation Neural Network for Recognizing Fabric Defects*. Textile Research Journal **73** (2), pp. 147-151 (2003).
- [25] JEFFREY KUO C. F., LEE C. J., TSAI C. C.: *Using a Neural Network to Identify Fabric Defects in Dynamic Cloth Inspection*. Textile Research Journal **73** (3), pp. 238-244 (2003).
- [26] JEFFREY KUO C. F., SU T. L.: *Gray Relational Analysis for Recognizing Fabric Defects*. Textile Research Journal **73** (5), pp. 461-465 (2003).
- [27] JEON B. S., BAE J. H., SUH M. W.: *Automatic Recognition of Woven Fabric Patterns by an Artificial Neural Network*. Textile Research Journal **73** (7), pp. 645-650 (2003).

- [28] KIM S. C., KANG T. J., HONG K. H., XU B.: *Image Analysis for Quantifying Marquissette Damage in Home Laundering*. Textile Research Journal **75** (6), pp. 474-479 (2005).
- [29] SAEIDI R. G., LATIFI M., NAJAR S. S., SAEIDI A. G.: *Computer Vision-Aided Fabric Inspection System for On-Circular Knitting Machine*. Textile Research Journal **75** (7), pp. 492-497 (2005).
- [30] LACHKAR A., GADI T., BENSLIMANE R., D’ORAZIO L., MARTUSCELLI E.: *Textile Woven-fabric Recognition by Using Fourier Image-analysis Techniques Part I: A Fully Automatic Approach for Crossed-points Detection*. Journal of Textile Institute **94** (1), pp. 194-201 (2003).
- [31] JASPER W., JOINES J., BREZOVICH J.: *Fabric Defect Detection Using a Genetic Algorithm Tuned Wavelet Filter*. Journal of Textile Institute **96** (1), pp. 43-54 (2005).
- [32] LACHKAR A., BENSLIMANE R., D’ORAZIO L., MARTUSCELLI E.: *Textile Woven-fabric Recognition by Using Fourier Image-analysis Techniques Part II: Texture Analysis for Crossed-states Detection*. Journal of Textile Institute **96** (3), pp. 179-183 (2005).
- [33] SARI-SARRAF H., GODDARD J. S.: *Vision System for On-Loom Fabric Inspection*. IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 35, No. 6, pp. 1252-1259 (1999).
- [34] CHAN C. H., PANG G. K. H.: *Fabric Defect Detection by Fourier Analysis*. IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 36, No. 5, pp. 1267-1276 (2000).
- [35] KUMAR A., PANG G. K. H.: *Defect Detection in Textured Materials Using Gabor Filters*. IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 38, No. 2, pp. 425-440 (2002).
- [36] MATELA, L.: *Real-time fault detection of braiding ropes using recognition methods*. In: Proc. SPIE Vol. 5603, Machine Vision and its Optomechatronic Applications, Philadelphia 2004, pp. 253-261, ISBN 0-8194-5556-3
- [37] MATELA L.: *Rozpoznávání druhů stromů podle tvarů jejich listů*. In: K7 vědecko populární časopis, Liberec 2004, č. 3, str. 5-11, ISSN 1214-7370
- [38] MANUÁL KE KAMERÁM ŘADY LC3000: Dostupné z <[http://ldip.kam.tul.cz/vybaveni/manualy/lc3000\\_um.pdf](http://ldip.kam.tul.cz/vybaveni/manualy/lc3000_um.pdf)>

## Přehled publikací

- [1] MATELA L.: *Fault Detection in Narrow Textiles*. In: 6th International Workshop on Electronics, Control, Measurement and Signals ECMS 2003. Liberec 2003, pp. 384 - 388, TU Liberec, ISBN 80-7083-708-X.
- [2] MATELA L., KMOCH P.: *Comparison of Special Methods with Commercial Products for Optical-Based Measurement of Dimensions*. In: XXIXth Seminary ASR'04, Instruments and Control'04. Ostrava 2004, pp. 193-197, ISBN 80-248-0590-1.
- [3] MATELA L.: *Rozpoznávání druhů stromů podle tvarů jejich listů*. In: K7 vědecko populární časopis, Liberec 2004, č. 3, str. 5-11, ISSN 1214-7370
- [4] MATELA L.: *Real-time fault detection of braiding ropes using recognition methods*. In: Proc. SPIE Vol. 5603, Machine Vision and its Optomechatronic Applications, Philadelphia 2004, pp. 253-261, ISBN 0-8194-5556-3.
- [5] MATELA L.: *Optical-based Inspection of 3-D Nonwoven Corrugated Textiles in the Production Line in Real Time*. In: 14th Annual International TANDEC Nonwovens Conference TANCON 2004. Knoxville 2004, pp. 1.3-1-6.
- [6] MATELA L.: *Počítačové zpracování digitálních obrázků pro neprogramátory - I. díl*. In: K7 vědecko populární časopis, Liberec 2005, č. 1, str. 2-8, ISSN 1214-7370
- [7] MATELA L.: *Počítačové zpracování digitálních obrázků pro neprogramátory - II. díl*. In: K7 vědecko populární časopis, Liberec 2005, č. 2, str. 21-26, ISSN 1214-7370

Ing. Lukáš MATELA

**Počítačová analýza obrazu úzkých textilií  
z hlediska jakosti zpracování a vad**

*Autoreferát disertační práce*

Technická univerzita v Liberci

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

32 stran

Náklad: 20 výtisků

březen 2006