

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 563*

*ISSN 1213-4198*

*thesis* IS

*Ing. Michal Kohoutek*

**Metoda fyzikálního modelování  
přechodových hran v obraze  
pro určení skutečné pozice  
obrysu předmětu**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

**Ing. Michal Kohoutek**

**METODA FYZIKÁLNÍHO MODELOVÁNÍ PŘECHODOVÝCH  
HRAN V OBRAZE PRO URČENÍ SKUTEČNÉ POZICE OBRYSU  
PŘEDMĚTU**

IMAGE TRANSITION EDGE PHYSICAL MODELING METHOD  
FOR EXACT OBJECT SHAPE POSITION DETERMINATION

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Teleinformatika  
Školitel: doc. Ing. Vladislav Škorpil, CSc.  
Oponenti: prof. Ing. Zdeněk Diviš, CSc.  
doc. Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D.  
Datum obhajoby: 27. 10. 2009

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Optická měření, subpixelová měření, subpixelová detekce hran, zpracování obrazů, telecentrický optický systém, modelování hran, detekce obrysu.

## **KEYWORDS**

Optical measurements, subpixel measurements, subpixel edge detection, image processing, telecentric optic, edge modeling, shape detection.

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

# OBSAH

<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>5</b>
<b>2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY.....</b>	<b>7</b>
2.1 SOUDOBÉ KONSTRUKČNÍ PŘÍSTUPY V OBLASTI PŘESNÝCH METROLOGICKÝCH APLIKACÍ PRO MĚŘENÍ GEOMETRICKÝCH ROZMĚRŮ – 2D PROFILOMETRIE .....	7
2.2 METODY SUBPIXELOVÉ DETEKCE HRANY V OBRAZE .....	8
<b>3 CÍLE DISERTACE .....</b>	<b>11</b>
<b>4 KONCEPCE A KOMPLEXNÍ FYZIKÁLNÍ ANALÝZA POUŽITÉHO ZOBRAZOVACÍHO SYSTÉMU..</b>	<b>12</b>
4.1 TELECENTRICKÉ ZOBRAZENÍ V PŘEDMĚTOVÉM PROSTORU S TELECENTRICKÝM CHODEM SVĚTELNÝCH PAPRSKŮ – Z POHLEDU GEOMETRICKÉ OPTIKY .....	13
4.2 ODVOZENÍ FYZIKÁLNÍHO MODELU ZOBRAZENÍ PŘEDMĚTU ZÁJMU NA ZÁKLADĚ ZÁKONŮ FOURIEROVSKÉ OPTIKY .....	14
4.2.1 <i>Analýza zobrazovací soustavy dle pravidel Fourierovské optiky</i> .....	15
4.3 ODVOZENÍ VZTAHU PRO URČENÍ SKUTEČNÉ POZICE OBRYSU PŘEDMĚTU V RÁMCI MODELU ZOBRAZENÍ .....	17
4.3.1 <i>Teoretický vliv různé úrovně rozostření optické soustavy na určení pozice obrysu předmětu zájmu</i> .....	17
4.3.2 <i>Stanovení dostupné hloubky předmětového pole pro model zobrazení</i> .....	17
4.3.3 <i>Posouzení vlivu příčného zvětšení na odezvu fyzikálního modelu zobrazení</i> .....	19
4.4 ODVOZENÍ FYZIKÁLNÍHO MODELU PŘECHODOVÉ HRANY V OBRAZE .....	19
<b>5 NÁVRH METODY APROXIMACE PŘECHODOVÉ HRANY V OBRAZE ODVOZENÝM FYZIKÁLNÍM MODELEM.....</b>	<b>19</b>
5.1 MODELOVÁNÍ PŘECHODOVÉ HRANY POMOCÍ POLYNOMIÁLNÍ APROXIMACE FRESNELOVÝCH INTEGRÁLŮ ..	19
5.2 VLIV VZORKOVÁNÍ OBRAZU PŘECHODOVÉ HRANY CCD SNÍMAČEM .....	21
5.3 METODA OPTIMALIZOVANÉ APROXIMACE JASOVÝCH HODNOT PIXELŮ PŘECHODOVÉ HRANY MODELUJÍCÍ FUNKCÍ .....	21
5.3.1 <i>Souhrn doporučení pro realizaci metody optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů přechodové hrany modelující funkcí</i> .....	21
<b>6 OVĚŘENÍ PŘESNOSTI METODY MODELOVÁNÍ PŘECHODOVÉ HRANY S REÁLNÝMI DATY.....</b>	<b>24</b>
<b>7 ZÁVĚR .....</b>	<b>26</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>28</b>
<b>VLASTNÍ PUBLIKACE.....</b>	<b>29</b>
<b>CURRICULUM VITAE .....</b>	<b>31</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>33</b>



# 1 ÚVOD

Předkládaná disertační práce je tématicky zařaditelná do oblasti moderních specializovaných metod zpracování digitálních obrazů určených pro specifické průmyslové aplikace. V posledním desetiletí zažívá oblast digitálního zpracování obrazů velký rozmach základního i aplikovaného výzkumu. Tento rozmach vědecké a výzkumné činnosti je v přímé souvislosti s masovým rozšířením kamerových zobrazovacích systémů do nejrůznějších oblastí průmyslu a rovněž i do řady spotřebitelských aplikací. Společným znakem nově vznikajících metod zpracování obrazů je odklon od výzkumu všeobecně aplikovatelných teoretických metod zpracování obrazů, které jsou již do značné míry ustálené a poskytují pouze malý prostor k dalšímu bádání. Zřejmý je naopak příklon k metodám využívajícím stále více apriorních informací ze specifických oblastí jejich konkrétního nasazení. Tyto specializované metody zpracování digitálních obrazů umožňují dosahovat v dané oblasti výrazně kvalitnější výsledky právě díky hlubší a detailnější analýze zkoumané problematiky z různých úhlů pohledu.

Disertační práce vznikla v návaznosti na grantový projekt MPO ČR „Výzkum nových metod zpracování obrazu pro přesná měření rozměrů ve stavebnictví a jejich ověření na prototypu 2D testeru“. Autor práce se na řešení projektu podílel v průběhu svého magisterského a doktorského studia a je spoluautorem programového vybavení prototypu měřicího systému. Po ukončení projektu pokračoval ve výzkumu s cílem zvýšit přesnost prototypu měřicího systému a vyhovět tak akreditačním podmínkám norem ČSN ISO [23], [24], [25]. Na základě detailní fyzikální analýzy zobrazovacího systému a jeho reálných vlastností se ukázalo být nutné nahrazení použitých metod subpixelové detekce hrany a vytvoření nové fyzikálně podložené měřicí metody modelování přechodové hrany v podobě vhodné pro programovou implementaci.

Z hlediska struktury textu je disertační práce členěna do logicky navazujících kapitol. Úvodní část (kapitola 2) se věnuje přehledu současného stavu problematiky z pohledu metrologických aplikací a subpixelových metod zpracování obrazů. V kapitole 3 jsou detailně specifikovány cíle disertační práce. Kapitola 4 je věnována komplexní fyzikální analýze použitého zobrazovacího systému z pohledu geometrické a Fourierovské optiky. Je zde odvozen detailní fyzikální model zobrazení přechodové hrany a z něj vycházející modelující funkce přechodové hrany spolu s definicí pozice obrysového bodu. Fyzikální model byl za tímto účelem implementován v programovacím jazyce LabView a spolu s modelující funkcí podroben diskuzi vlivu různých parametrů optické soustavy na přesnost a stabilitu určení pozice obrysového bodu. V rámci kapitoly 5 je odvozena modelující funkce přechodové hrany v podobě vhodné pro vlastní programovou implementaci do měřicího systému. Na základě diskuze apriorních informací a podoby reálných obrazových dat produkovaných zobrazovacím systémem je navržena implementačně nezávislá metoda optimalizované aproximace jasových hodnot (pixelů) přechodové hrany odvozenou modelující funkcí. Tato metoda je specifikována ve formě implementačních doporučení z důvodu zachování její nezávislosti na použitém

programovacím jazyce a ponechání programátorské volnosti při její realizaci. V závěru kapitoly jsou prezentovány výsledky dosažené implementovanou metodou při použití syntetických vstupních dat.

Kapitola 6 je zaměřena na ověření funkčnosti navržené a implementované metody s reálnými obrazovými daty. Metoda byla za tímto účelem implementována v programovacím jazyce LabView 6.1 do měřicího systému. Ukázka způsobu ověření přesnosti vytvořené metody je provedena formou prezentace výsledků měření kalibrovaných etalonů délky.

V přílohách disertační práce jsou doloženy doklady o akreditaci měřicího systému příslušným akreditačním orgánem (ČIA – Český institut pro akreditaci) pro měření veličiny délky v rozmezí  $40\ \mu\text{m} - 20\ \text{mm}$ . Dále pak ukázka výpočtu nejistot měření měřicího systému provedená podle interního předpisu pracovníkem akreditované laboratoře a výsledky mezilaboratorního porovnávání měřicího systému pod záštitou ČMI (Český metrologický institut).

## **2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY**

Jak bylo uvedeno výše, disertační práce je zaměřena do oblasti metod zpracování obrazů používaných spolu s kamerovými zobrazovacími systémy v přesných metrologických aplikacích pro měření geometrických rozměrů. Vzhledem k tomu, že koncepce zobrazovacího systému (konstrukční řešení a jeho prvky) již byla pro vlastní disertační práci přesně určena, bude část věnovaná této problematice rozebrána pouze jako porovnání použité koncepce se současnými průmyslovými trendy, aby byla prokázána aktuálnost použité technologie. Oproti tomu větší pozornost je v práci věnována současným metodám zpracování obrazů souvisejícím s oblastí detekce hran předmětů.

### **2.1 SOUDOBÉ KONSTRUKČNÍ PŘÍSTUPY V OBLASTI PŘESNÝCH METROLOGICKÝCH APLIKACÍ PRO MĚŘENÍ GEOMETRICKÝCH ROZMĚRŮ – 2D PROFILOMETRIE**

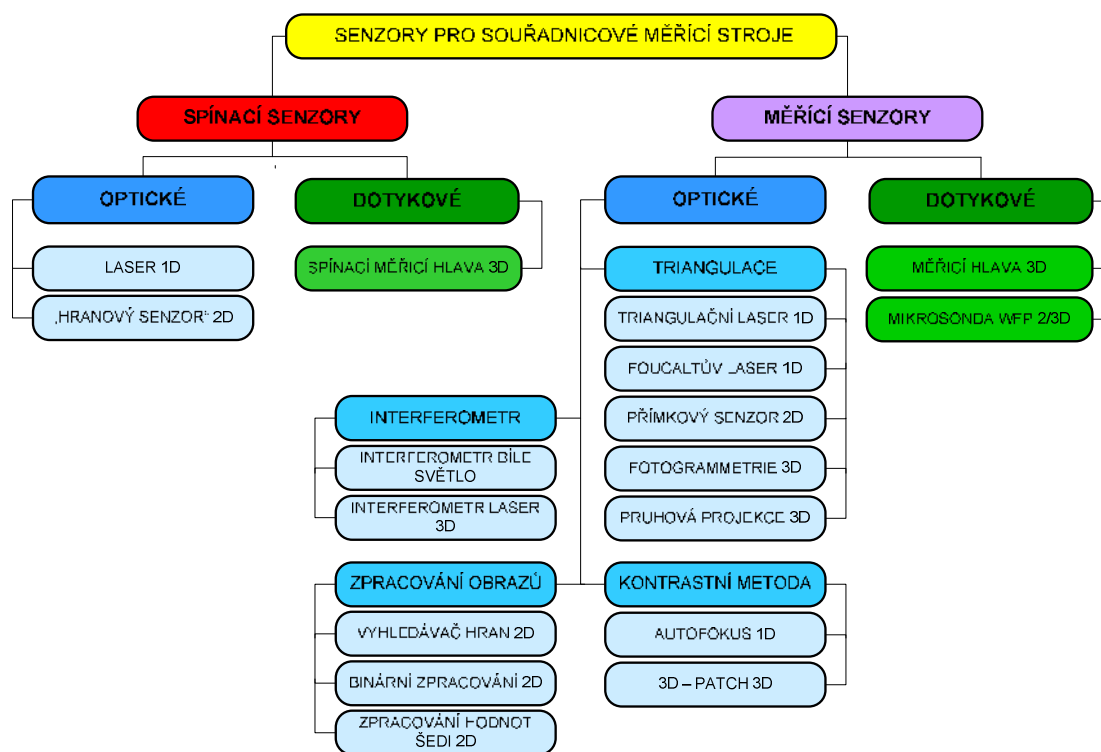
V oblasti přesných metrologických aplikací pro měření geometrických rozměrů došlo v posledních 10 letech k dynamickému rozvoji nových měřicích přístupů. Rozvoj byl umožněn zejména technologickým pokrokem v oblastech optiky, světlocitlivých snímacích prvků, tomografických technologií a výpočetní techniky. S tímto pokrokem a rozšířením možných aplikačních oblastí pro uvedené technologie přišlo i výrazné snížení jejich cenové náročnosti a tím došlo k další akceleraci jejich použití.

V publikaci věnované problematice soudobých měřicích a inspekčních systémů [16] vydané ve spolupráci autorů knihy s německou firmou Werth Messtechnik GmbH, která je celosvětovým lídrem v oblasti multisenzorových měřicích a inspekčních systémů, je mimo jiné uveden obecný přehled soudobých senzorů (přístupů) pro souřadnicové měřicí stroje, viz obr. 2.1. V konkrétních vyráběných měřicích systémech jsou v dnešní době tyto senzory často kombinovány. Jednotlivé typy senzorů jsou v rámci knihy stručně popsány, přičemž je patrný důraz na zachování firemního „know-how“ a to i v případě, kdy byly na semináři pořádaném k měřicímu systému zástupci firmy dotazováni na bližší specifikaci použitých metod. Toto chování je vzhledem k silně konkurenčnímu tržnímu prostředí naprosto pochopitelné. Z českého překladu knihy [16] (strana 18, 20) lze citovat následující věty: „Nejvyšší kvalitu dosahují telecentrické objektivy s pevným zvětšením.“ „Nejvyšší flexibilita se dosahuje použitím zoomovací optiky.“ „Vysoce kvalitní systémy interpolují ve druhém kroku v rámci pixelové mřížky a dovolují tak vyšší přesnosti.“

Na základě výše uvedeného lze říci, že realizovaný měřicí systém je z konstrukčního hlediska a technologického hlediska stále špičkovým zařízením v oblasti 2D profilometrie, v rámci které nadále probíhá špičkový výzkum a vývoj. Z tohoto důvodu je výzkum nové metody zpracování obrazu vedoucí ke zvýšení přesnosti měřicího systému stále aktuální. Přičemž metody použité v komerčně dodávaných zařízeních patří k utajovaným průmyslovým tajemstvím „know-how“



špičkových průmyslových firem působících v tomto oboru (Werth Messtechnik GmbH; Direct Industry; AMBIOS Technology; Micro Photonics Inc; ZYGO aj.). Koncepce vytvořeného měřicího systému včetně jeho konstrukčních detailů a její srovnání se stále aktuálními trendy je součástí řady konferenčních příspěvků členů řešitelského kolektivu a oponovaných průběžných zpráv o průběhu řešení projektu (viz například [35], [36], [42], [43], [44], [45], [46]).



Obr. 2.1 Typy současných senzorů/přístupů využívaných v průmyslových souřadnicových měřicích systémech

## 2.2 METODY SUBPIXELOVÉ DETEKCE HRANY V OBRAZE

Obecná definice hrany může znít: „Hrana je hranice mezi dvěma oblastmi s relativně rozdílnými vlastnostmi hodnot obrazových bodů“. V rámci této definice pohlíží na hranu i teorie zpracování obrazů [27], [28]. Základní přístupy k detekci hran v obrazech lze rozdělit na následující

- metody využívající gradientní operátory - skupina operátorů aproximujících derivaci obrazové funkce pomocí diferencí realizovaných diskrétní konvolucí,
- metody využívající operátory druhé derivace - operátory založené na hledání hran v místech, kde druhá derivace obrazové funkce prochází nulou,
- metody založené na principu prahování – je známa nebo výpočetně určena informace o jasu odpovídajícímu bodu hranice objektů,
- metody založené na porovnání hran s předlohou (řádková) – korelační metody.

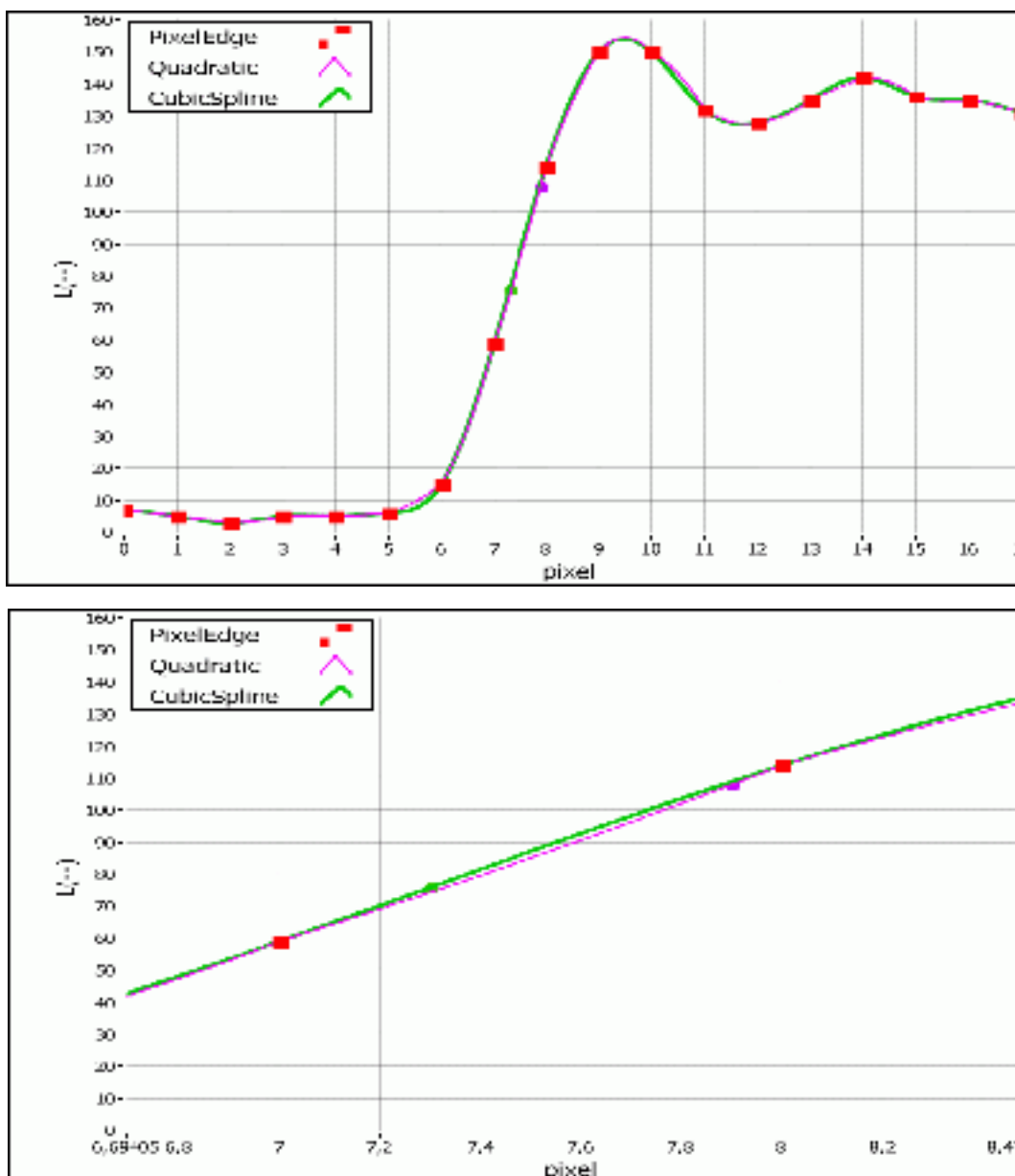
Uvedené metody v různých modifikacích slouží prvotně k určování pixelové pozice hrany. Způsoby jejich realizace a příslušný matematický aparát je možné najít v kterékoliv knize věnované problematice zpracování obrazů [27], [28]. Jejich uplatnění je zejména v algoritmech předzpracování obrazu určených k segmentaci obrazu a vyšetřování hranice objektů v obraze bez požadavku na vyšší přesnost její detekce. V této podobě jsou používány i v rámci základních metod zpracování obrazů v realizovaném měřicím systému, kde jsou součástí algoritmů rozčleňujících jednotlivé předměty zájmu (oka sít) do samostatných výřezů určených pro další zpracování měřicí metodou. Důležitým faktem je, že princip identifikace pozice hrany již na pixelové úrovni není žádným způsobem svázán s procesem tvorby obrazu a skutečná pozice původní hrany předmětu se může nacházet ve zcela jiné části jasového přechodu charakterizujícího hranu. Potvrzení neoddiskutovatelné závislosti skutečné pozice hrany předmětu (jeho obrysu) v obraze na použitém zobrazovacím systému lze teoreticky jasně deklarovat na podkladě teorie systémů, neboť z té je zřejmý vztah popisující odezvu systému na vstupní veličinu (veličiny). Pro jednoduchost předpokládejme, že zobrazovací soustava je lineárním systémem. Odezva tohoto systému na vstupní signál, tedy snímanou obrazovou scénu je dána konvolucí impulsní odezvy lineárního systému a vstupní obrazové scény. Z uvedeného je zřejmé, že v případě, kdy je stejná scéna snímána dvěma principiálně odlišnými zobrazovacími systémy, pak i hrany objektů v obraze budou mít zcela jiné parametry a průběhy a to včetně přesné pozice obrysu předmětu v rámci odpovídajícího jasového přechodu hrany.

Již z názvu Metody subpixelové detekce hrany v obraze vyplývá, že cílem těchto metod je odhadnout přesnou pozici hrany předmětu (obrysu předmětu) v obraze s přesností výrazně vyšší než jeden pixel. Poté, co je nalezena pixelová pozice hrany, lze metody subpixelové detekce rozdělit do dvou stěžejních kroků

- *interpolace nebo aproximace jasu pixelů přechodové hrany,*
- *aplikace předpisu pro určení subpixelové pozice hrany v interpolovaném nebo aproximovaném hranovém přechodu.*

Oba tyto kroky mají zásadní vliv na určení konečné subpixelové pozice hrany. Přesnější bude ta metoda, ve které budou oba uvedené kroky korespondovat s fyzikální realitou vytvoření měřeného obrazu. Jedny z prvních metod, které se v dnešní době ještě stále v různých modifikacích objevují, spočívaly v použití jednoduchých interpolačních technik či aproximačních algoritmů využívajících základní křivky (kvadratická křivka, kubická křivka) pro interpolaci / aproximaci hranového přechodu. V takto modelovaném hranovém přechodu byla následně provedena detekce subpixelové pozice hrany, na základě výše zmíněné teorie hran, do pozice, kde první derivace modelující funkce nabývá maximální hodnoty, respektive druhá derivace modelující funkce prochází nulou. Tedy v podstatě vyšetřením inflexního bodu modelující funkce. Je zřejmé, že při použití různých modelujících funkcí a detekčních předpisů získáme různé hodnoty subpixelové pozice hrany viz obr. 2.2. Na obrázku je reálná přechodová hrana (červeně označené jasy pixelů) interpolovaná pomocí standardních metod subpixelové

interpolace obrazů dodávaných firmou Nationale Instruments v rámci knihovny IMAQ programovacího jazyka LabView. První metodou je „quadratic interpolation“ [17] – fialový průběh, druhou je „cubic spline interpolation“ [17] - zelený průběh. V případě obou interpolací byla subpixelová pozice hrany určena dle metody vyšetření inflexního bodu. V obrázku jsou detekované subpixelové pozice hrany označeny bodem příslušné barvy. Pro „quadratic interpolation“ odpovídala detekovaná subpixelová pozice hrany pozici 7,9 pixelu, zatímco pro „cubic spline interpolation“ byla detekovaná subpixelová pozice hrany 7,3 pixelu. Nelze říci, která hodnota je přesnější, neboť ani jedna metoda nemá přímou souvislost s fyzikálním procesem vytváření přechodové hrany v obraze.



Obr. 2.2 Odezvy standardních subpixelových metod, které jsou součástí knihoven programovacího jazyka LabView [17] - a) kvadratická interpolace, b) kubická „spline“ interpolace

V poslední době se v oblasti teorie zpracování digitálních obrazů objevila řada nových metod a přístupů k subpixelové detekci pozice hrany v obraze. Jednotlivé metody se od sebe vzájemně odlišují použitými interpolačními, případně aproximačními funkcemi a způsoby optimalizace jejich proložení jasovými hodnotami přechodové hrany v obraze. Z hlediska následného určení subpixelové pozice hrany v obraze vychází většina čistě teoretických metod nadále z teorie hran a určuje subpixelovou pozici hrany do místa inflexního bodu modelující funkce. Oproti dřívějším metodám je možné pozorovat znatelný růst jejich výpočetní složitosti a zároveň snahy o výpočetní optimalizaci a snadnou algoritmizaci. Jsou například cíleny na potlačení vlivu různých typů šumů při subpixelové detekci hrany, jako je tomu v případě metody [30]. Objevují se i nové složitější a preciznější způsoby detekce subpixelové pozice hrany pomocí různých obdob geometrických momentů, jako je tomu u metod [31] a [32], či nelineárních metod interpolace přechodové hrany [33]. Většina těchto metod však nadále postrádá přímou souvislost mezi konkrétním procesem vytváření obrazových dat, tvarem použité modelující funkce hrany a vlastní metodou detekce subpixelové pozice hrany. Proto nejsou ve vysoce přesných metrologických aplikacích použitelné. Výjimečně se již publikují i metody vycházející ve svých principech z fyzikální reality tvorby obrazových dat, jako například metoda popsaná v [29], která se zabývá využitím řádkových snímačů pro detekci subpixelové pozice hrany. Eventuálně práce [34], která se zabývá možností zlepšení subpixelové přesnosti (rozlišení) zobrazování při použití osvětlení vzdálených scén intenzivním laserem.

Provedená analýza současného stavu problematiky související s tématem disertační práce ukázala, že téma je aktuální a poskytuje dostatečný prostor pro výzkum. Návrh nového originálního řešení subpixelové detekce hran, založeného na podkladě fyzikálního modelování, má potenciál přinést pokrok v dané oblasti optických měření geometrických rozměrů předmětu.

### 3 CÍLE DISERTACE

Cílem disertační práce je navrhnout metodu umožňující přesnou subpixelovou detekci obrysu předmětu v jeho obraze vytvořeném definovaným zobrazovacím systémem. Při návrhu metody je požadováno přísné respektování fyzikální podstaty vytváření obrazu předmětu ve snímací rovině kamery při použití specifického typu zobrazovací soustavy. Jak bylo odůvodněno v předchozí kapitole, respektování fyzikální podstaty tvorby obrazu má přinést výrazné zpřesnění subpixelové detekce obrysu oproti již existujícím obecným metodám a tím umožnit aplikační nasazení metody v již existujícím prototypu Tester2D určenému pro přesná měření průmyslových sít dle příslušných norem [23], [24], [25] a požadavků ČIA a ČMI. Bodově lze cíle disertační práce vyjádřit následovně

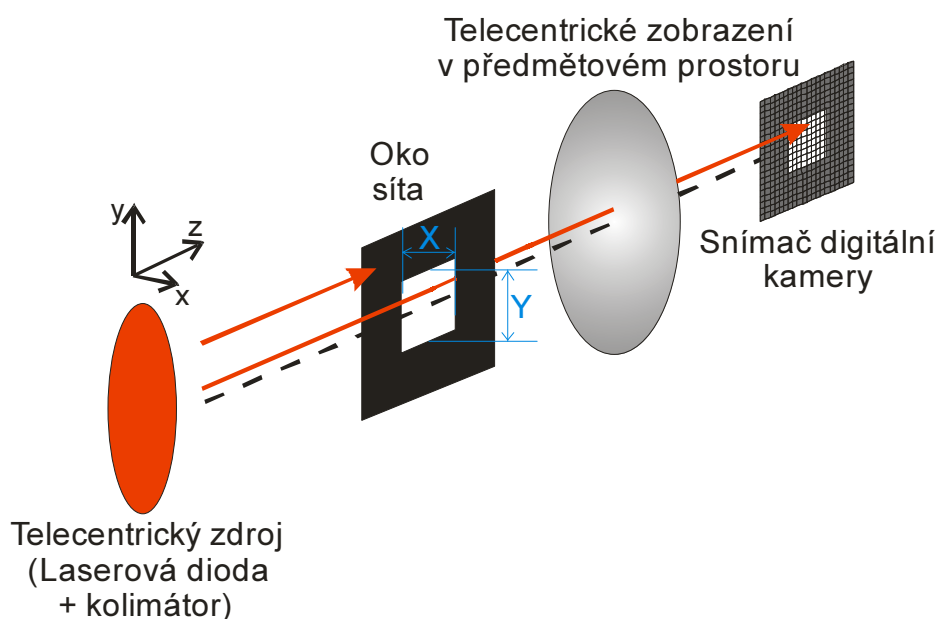
- **Návrh metody subpixelové detekce obrysu předmětu**
  - *respektování fyzikální podstaty tvorby obrazu hrany předmětu v rovině snímače – definice fyzikálního modelu přechodové hrany,*

- definice pozice obrysového bodu předmětu v rámci fyzikálního modelu přechodové hrany,
  - analýza vlivu parametrů zobrazovací soustavy na přesnost určení pozice obrysového bodu předmětu,
  - úprava modelu do podoby vhodné pro algoritmizaci metody pro použití v reálném měřicím systému.
- **Praktická realizace měřicí metody – ověření metody se syntetickými daty i v reálném měřicím systému.**
  - **Dosažení požadované přesnosti určení pozice obrysu předmětu dle norem pro dané metrologické aplikace.**
  - **Akreditace měřicího systému.**

Podrobněji jsou cíle disertační práce rozebírány v její úplné verzi.

#### 4 KONCEPCE A KOMPLEXNÍ FYZIKÁLNÍ ANALÝZA POUŽITÉHO ZOBRAZOVACÍHO SYSTÉMU

V rámci této kapitoly je v disertační práci představena základní koncepce zobrazovacího systému použitého v prototypu měřicího systému Tester2D a provedena detailní fyzikální analýza jednotlivých částí zobrazovací soustavy. Výstupem analýzy je fyzikální model zobrazení předmětu zájmu v místě snímáče digitální kamery. Z fyzikálního modelu zobrazení předmětu zájmu je odvozen fyzikální model zobrazení přechodové hrany spolu se vztahem definujícím způsob určení přesné pozice obrysu předmětu v rámci modelu. Analýza vlastností fyzikálního modelu přechodové hrany vede k vyšetření stability způsobu určení přesné pozice hrany v závislosti na změně parametrů zobrazovací soustavy. Měřicí systém byl koncepčně navržen pro měření průmyslových a potravinářských sít. Z tohoto cíleného zaměření vychází tedy i definice předmětu zájmu a cílené zaměření fyzikálních analýz na konkrétní typy komponent použitých v měřicím systému.

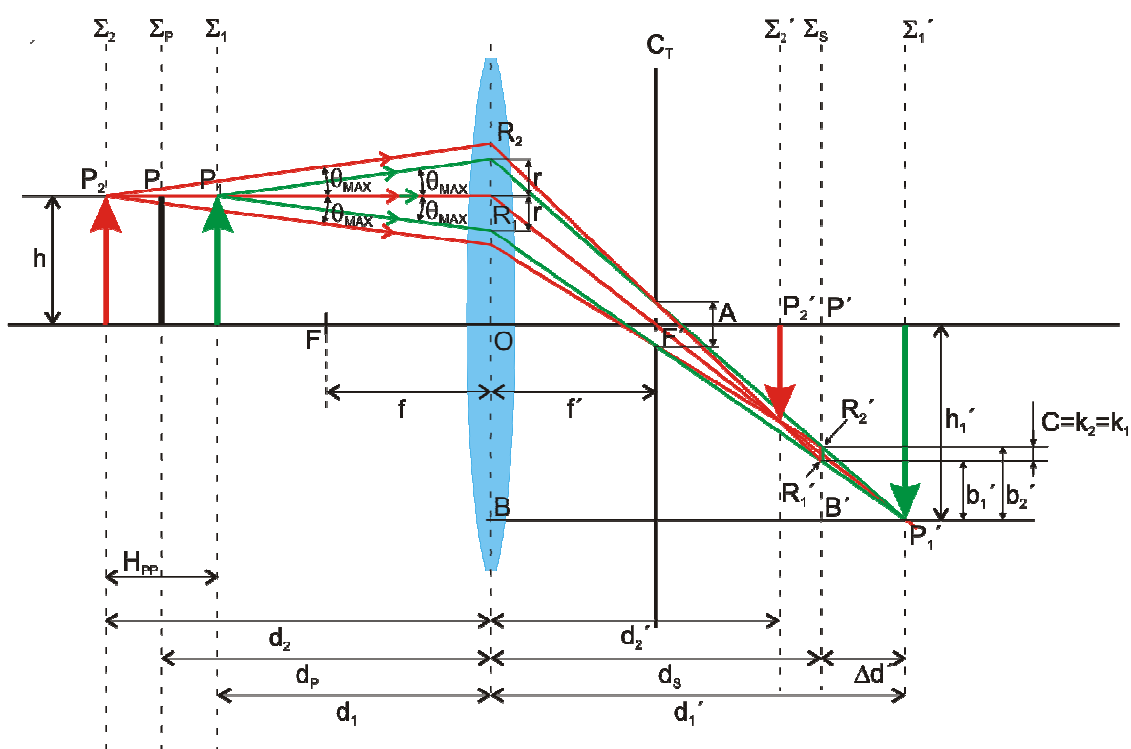


Obr. 4.1 Koncepce měřicího systému

Z obr. 4.1 je patrné, že bylo použito zadní telecentrické osvětlení předmětu, které je vhodné pro měření obrysů předmětu [2]. Detailnějšímu rozboru jednotlivých částí systému jsou věnovány následující kapitoly.

#### 4.1 TELECENTRICKÉ ZOBRAZENÍ V PŘEDMĚTOVÉM PROSTORU S TELECENTRICKÝM CHODEM SVĚTELNÝCH PAPRSKŮ – Z POHLEDU GEOMETRICKÉ OPTIKY

V rámci této kapitoly jsou v disertační práci detailně odvozeny a popsány výhodné vlastnosti telecentrického zobrazování v předmětovém prostoru viz obr. 4.2 vůči klasickému perspektivnímu zobrazování. Na základě diskuze odvozených parametrů byla odůvodněna vhodnost použití tohoto způsobu zobrazování pro přesné metrologické aplikace.



Obr. 4.2 Vliv změny předmětové vzdálenosti při telecentrickém zobrazování v předmětovém prostoru

Hlavní výhody telecentrického zobrazování v předmětovém prostoru lze shrnout do dvou stěžejních bodů:

- telecentrické zobrazování v předmětovém prostoru vytváří ve snímací rovině vždy stejně velký obraz předmětu nezávisle na předmětové vzdálenosti,
- hlavní (telecentrický) paprsek, rovnoběžný s optickou osou soustavy v předmětovém prostoru a procházející obrazovým ohniskem v obrazovém prostoru, prochází středem příslušné kruhové stopy obrysového bodu předmětu vytvořené ve snímací rovině nezávisle na předmětové vzdálenosti. Výsledná

*kruhová stopa odpovídající obrysovému bodu je tedy symetrická kolem bodu daného tímto paprskem.*

Z uvedených bodů je patrné potlačení vlivu perspektivy [1]. Je ovšem nutné zdůraznit skutečnost, že obraz nebude pro všechny vzdálenosti v předmětovém prostoru ostrý a průměr kruhové stopy C stejný, jako je tomu v případě uvedeném na obrázku. Tato vlastnost je způsobena konečnou velikostí *aperturní telecentrické clony* A. Jejím vlivem se na tvorbě výsledného obrazu ve snímací rovině podílejí i paprsky, které nejsou v předmětové rovině rovnoběžné s optickou osou. Z tohoto důvodu byl odvozen vztah (4-1) popisující velikost *rozptylového kroužku* C v závislosti na úrovni zaostření optické soustavy a na maximálním úhlu paprskového kužele schopného projít telecentrickou optickou soustavou.

$$C = 2 \frac{f(d_2 - d_p)}{d_p - f} \operatorname{tg} \theta_{MAX}, \quad (4-1)$$

kde jednotlivé parametry jsou definovány na obr. 4.2.

Dále byl odvozen vztah (4-2) definující *hloubku předmětového pole*  $H_{PP}$  pro definovanou úroveň velikosti *rozptylového kroužku* a *průměr aperturní telecentrické clony* A.

$$H_{PP} = \frac{2C(d_p - f)}{A}, \quad (4-2)$$

Pro odstranění závislosti *hloubky předmětového pole* na *průměru aperturní telecentrické clony* byly vyšetřeny a definovány dopady použití telecentrického zadního osvětlení. Z této analýzy vzešel vztah

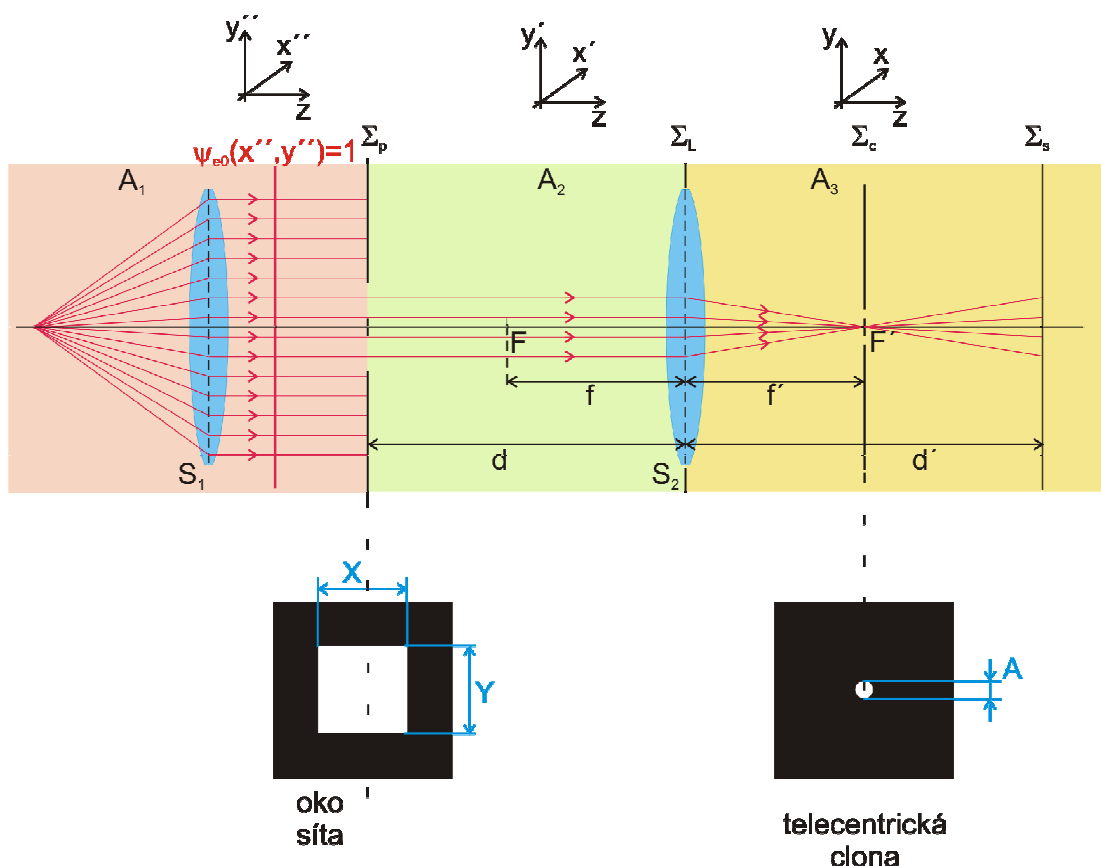
$$H_{PP} = \frac{C(d_p - f)}{f \operatorname{tg} \theta_S}, \quad (4-3)$$

udávající *hloubku předmětového pole* při použití telecentrického světelného zdroje s úhlem světelného kužele  $\theta_S < \theta_{MAX}$ . Použitím tohoto typu osvětlení dojde k odstranění závislosti *hloubky předmětového pole* na průměru *telecentrické aperturní clony* A. Ta bude dále sloužit jako prostředek pro zachycení netelecentrických paprsků vzniklých ohybovými jevy na telecentricky osvětlovaném měřeném předmětu. Vybrané vztahy odvozené na podkladě zákonů geometrické optiky byly použity i v následujících částech disertační práce, a proto bylo jejich odvození nezbytné.

## 4.2 ODVOZENÍ FYZIKÁLNÍHO MODELU ZOBRAZENÍ PŘEDMĚTU ZÁJMU NA ZÁKLADĚ ZÁKONŮ FOURIEROVSKÉ OPTIKY

Cílem následující analýzy je nalezení matematického popisu optického zobrazení předmětu se skokovou změnou optické propustnosti osvětleného telecentrickým světelným zdrojem a zobrazeného pomocí optické soustavy telecentrické v předmětovém prostoru. Detailní odvození je součástí úplné verze disertační práce. Následující obrázek představuje základní model analyzovaného zobrazovacího

systemu, přičemž popisy souřadných os v jednotlivých částech obrázku korespondují se symboly používanými v rámci vlastního odvození.



Obr. 4.3 Principiální detail zobrazovací soustavy měřicího systému

Pohled na optickou soustavu telecentrickou v předmětovém prostoru z hlediska geometrické optiky byl uveden v předchozí kapitole. Tento způsob analýzy však neumožňuje vyšetřit rozložení intenzity optického pole v místě snímače kamery po průchodu světelného paprsku předmětem zájmu (okem síta) a telecentrickou optickou soustavou. Znalost matematického modelu rozložení intenzity optického pole v obrazovém prostoru umožňuje odvodit matematický model zobrazení přechodové hrany předmětu zájmu a též teoretickou pozici obrysu předmětu zájmu ve vytvořeném modelu přechodové hrany. Pro odvození modelu popisujícího rozložení intenzity optického pole v místě snímače je nutné provést analýzu zobrazovací soustavy, uvedené na obr. 4.3, podle zákonitostí Fourierovské optiky. Z obrázku je patrné rozdělení problematiky odvození do tří hlavních oblastí, z nichž každá oblast je na obrázku odlišena barevným označením a označením souřadného systému. Popis jednotlivých oblastí je součástí úplného znění disertační práce.

#### 4.2.1 Analýza zobrazovací soustavy dle pravidel Fourierovské optiky

Detailní analýzou zobrazovací soustavy z pohledu Fourierovské (vlnové) optiky byl v disertační práci odvozen obecný komplexní model optického pole v obrazovém prostoru



$$\psi(x, y, z) = \frac{-f}{4(z-f)} e^{-j \frac{k_0 f (x^2 + y^2)}{2z(z-f)}} \cdot \left[ (1+j)(\mathcal{C}(d_{x+}) - \mathcal{C}(d_{x-}) + j\mathcal{S}(d_{x-}) - j\mathcal{S}(d_{x+})) \right] \cdot \left[ (1+j)(\mathcal{C}(d_{y+}) - \mathcal{C}(d_{y-}) + j\mathcal{S}(d_{y-}) - j\mathcal{S}(d_{y+})) \right], \quad (4-4)$$

kde  $d_{x+}$  a  $d_{x-}$  jsou definovány jako

$$d_{x+} = \frac{a_2(X/2) + b_2}{\sqrt{a_2}} = \sqrt{\frac{k_0((X/2)(z-f) + fx)^2}{2(z-f)(dz - df - fz)}}, \text{ pro } \frac{(X/2)(z-f) + fx}{(dz - df - fz)} \geq 0,$$

$$d_{x+} = \frac{a_2(X/2) + b_2}{\sqrt{a_2}} = -\sqrt{\frac{k_0((X/2)(z-f) + fx)^2}{2(z-f)(dz - df - fz)}}, \text{ pro } \frac{(X/2)(z-f) + fx}{(dz - df - fz)} < 0,$$
(4-5)

$$d_{x-} = \frac{-a_2(X/2) + b_2}{\sqrt{a_2}} = \sqrt{\frac{k_0((X/2)(f-z) + fx)^2}{2(z-f)(dz - df - fz)}}, \text{ pro } \frac{(X/2)(f-z) + fx}{(dz - df - fz)} \geq 0,$$

$$d_{x-} = \frac{-a_2(X/2) + b_2}{\sqrt{a_2}} = -\sqrt{\frac{k_0((X/2)(f-z) + fx)^2}{2(z-f)(dz - df - fz)}}, \text{ pro } \frac{(X/2)(f-z) + fx}{(dz - df - fz)} < 0$$
(4-6)

a  $d_{y+}$ ,  $d_{y-}$  jsou vzhledem k symetrii problému definovány analogicky k (4-5), (4-6). Zbylé veličiny jsou definovány v rámci odvození v úplné verzi disertační práce. Z komplexního modelu rozložení optického pole (4-4) lze na základě definice

$$I(x, y, z) = |\psi(x, y, z)|^2 \quad (4-7)$$

po provedení úprav odvodit

$$I(x, y, z) = \frac{f^2}{4(z-f)^2} \left[ (\mathcal{C}(d_{x+}) - \mathcal{C}(d_{x-}))^2 + (\mathcal{S}(d_{x+}) - \mathcal{S}(d_{x-}))^2 \right] \cdot \left[ (\mathcal{C}(d_{y+}) - \mathcal{C}(d_{y-}))^2 + (\mathcal{S}(d_{y+}) - \mathcal{S}(d_{y-}))^2 \right]. \quad (4-8)$$

Tento vztah lze považovat za fyzikální model zobrazení předmětu zájmu osvětleného telecentrickými paprsky a zobrazeného telecentrickou optickou soustavou v předmětovém prostoru. Model v sobě zahrnuje difrakční jevy vznikající na povrchu předmětu a jejich přenos telecentrickou optickou soustavou v předmětovém prostoru. V rámci modelu jsou tedy definovány i tvary hranových křivek předmětu. Pomocí (4-8) lze vypočítat intenzitní obraz předmětu zájmu v libovolném bodě na ose  $z$  při platnosti podmínky

$$z \geq \frac{df}{d-f}. \quad (4-9)$$

### 4.3 ODVOZENÍ VZTAHU PRO URČENÍ SKUTEČNÉ POZICE OBRYSU PŘEDMĚTU V RÁMCI MODELU ZOBRAZENÍ

Vzhledem ke zřejmé symetrii problému lze pro řádkový profil zobrazení psát

$$I(x, z) = (\mathcal{C}(d_{x+}) - \mathcal{C}(d_{x-}))^2 + (\mathcal{S}(d_{x+}) - \mathcal{S}(d_{x-}))^2. \quad (4-10)$$

Detailní analýzou a diskuzí tohoto vztahu a jeho parametrů (4-5), (4-6) byla odvozena definice určující přesnou pozici obrysu předmětu v jeho intenzitním obraze. Pozice obrysu odpovídá jasu

$$I_{\text{EdgePoint}}(x) = \frac{1}{4} \cdot I_{\text{STAB}}, \quad (4-11)$$

kde  $I_{\text{EdgePoint}}(x)$  - je intenzita optického pole v obrazové rovině odpovídající pozici obrysu předmětu v předmětové rovině a  $I_{\text{STAB}}$  - je průměrná ustálená hodnota intenzity optického pole v obrazové rovině odpovídající pozici opticky propustné části předmětu v předmětové rovině. Přesnost uvedeného vztahu pro určení pozice obrysu předmětu v obraze (4-11) byla podrobena názorné a detailní analýze. Za tímto účelem byl model (4-10) implementován v programovacím jazyce LabView.

#### 4.3.1 Teoretický vliv různé úrovně rozostření optické soustavy na určení pozice obrysu předmětu zájmu

Výsledky této analýzy ukázaly, že vztah (4-11) není z teoretického hlediska závislý na úrovni rozostření optické soustavy. Tuto skutečnost lze názorně deklarovat pomocí obr. 4.4. Na obrázku jsou zobrazeny detaily odezev modelu (4-10) pro náběžnou hranu předmětu zájmu při zobrazení s následujícími parametry. Velikost předmětu zájmu  $X = 200 \mu\text{m}$ ;  $d = 0,075 \text{ m}$ ; <sup>1</sup>  $f = 0,0375 \text{ m}$  a  $\lambda = 630 \text{ nm}$ . Různé úrovně zaostření lze simulovat formou změny pozice snímací roviny na ose  $z$  v obrazovém prostoru, např.  $z \in [1,001; 1,0005; 1,0001; 1,00001]^* \frac{df}{(d-f)}$ . Z obr. 4.4

je zřejmé, že přechodové hrany modelu pro různé úrovně rozostření optické soustavy se vzájemně protínají právě v bodě odpovídajícím definici obrysu předmětu dle (4-11).

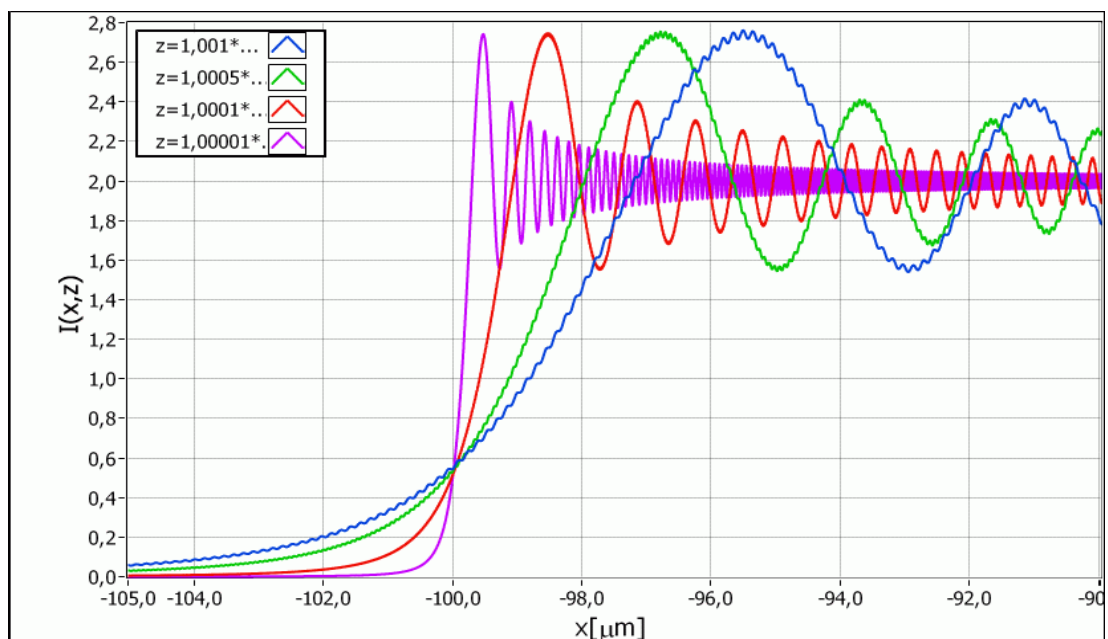
#### 4.3.2 Stanovení dostupné hloubky předmětového pole pro model zobrazení

Při popisu úrovně rozostření optické soustavy byly v rámci kapitoly věnované pohledu na telecentrickou optickou soustavu z hlediska geometrické optiky definovány dva parametry a sice parametr *průměru rozptylových kroužků*  $C$  a s ním související parametr *hloubky předmětového pole*  $H_{PP}$ . Diskuzí těchto parametrů

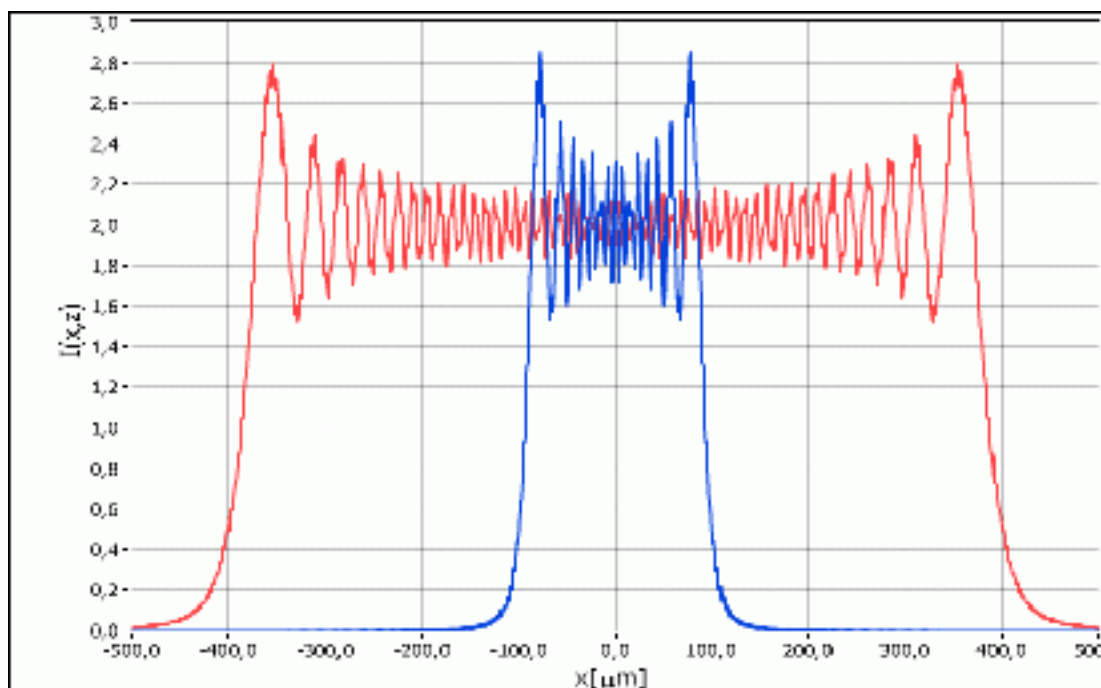
---

<sup>1</sup> Hodnota  $d=0,075 \text{ m}$  odpovídá pracovní vzdálenosti telecentrického objektivu použitého v prototypu měřicího systému.

z hlediska Fourierovské optiky byla stanovena přípustná úroveň rozostření optické soustavy formou mezního průměru rozptylového kroužku jako hodnota průměru kružnice vepsané jedné světlocitlivé buňce snímací kamery.



Obr. 4.4 Detail náběžných hran fyzikálního modelu pro různé úrovně zaostření obrazu (viz legenda, kde  $z = 1,001* \dots$  odpovídá zaostření  $z = 1,001 * \frac{df}{(d-f)}$ ). Náběžné hrany se pro různé úrovně zaostření obrazu protínají právě v bodě odpovídajícímu vztahu (4-11)



Obr. 4.5 Odezva fyzikálního modelu zobrazení (4-10) s následujícími parametry  $X = 200 \mu\text{m}$ ,  $C = 3,45 \mu\text{m}$ ,  $f = 0,0375 \text{ m}$ ,  $\theta = 1.10^{-3} \text{ rad}$ . a)  $M=1$  modrá křivka, b)  $M = 4$  červená křivka

### 4.3.3 Posouzení vlivu příčného zvětšení na odezvu fyzikálního modelu zobrazení

Model zobrazovacího systém byl též podroben fyzikální analýze vlivu příčného zvětšení na přesnost určení pozice obrysu předmětu. Z analýzy vyplynulo, že příčné zvětšení nemá negativní vliv na přesnost určení pozice hrany předmětu dle (4-11). Tato skutečnost je názorně deklarována na obr. 4.5.

## 4.4 ODVOZENÍ FYZIKÁLNÍHO MODELU PŘECHODOVÉ HRANY V OBRAZE

Na základě detailního vyšetření dopadů zanedbání vlivu vzdálené hrany na formování obrazu vyšetřované hrany byly z modelu zobrazení (4-10) odvozeny fyzikální modely přechodových hran v podobě pro sestupnou hranu

$$I_m(x) = \left( \frac{1}{2} - \mathcal{C}(d_{x-}) \right)^2 + \left( \frac{1}{2} - \mathcal{S}(d_{x-}) \right)^2, \quad (4-12)$$

a náběžnou hranu

$$I_m(x) = \left( \mathcal{C}(d_{x+}) - \frac{1}{2} \right)^2 + \left( \mathcal{S}(d_{x+}) - \frac{1}{2} \right)^2. \quad (4-13)$$

Vzhledem k symetrii problému je dostačující použít pouze jednoho z uvedených modelů, neboť přechod mezi nimi spočívá v pouhém převrácení vstupní posloupnosti. V rámci disertační práce byl také stanoven teoretický vztah pro výpočet hodnoty minimálního měřitelného předmětu zájmu.

## 5 NÁVRH METODY APROXIMACE PŘECHODOVÉ HRANY V OBRAZE ODVOZENÝM FYZIKÁLNÍM MODELEM

Tato kapitola disertační práce je věnována úpravě modelu přechodové hrany do podoby modelující funkce vhodné pro definici metody optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů modelující funkcí přechodové hrany.

### 5.1 MODELOVÁNÍ PŘECHODOVÉ HRANY POMOCÍ POLYNOMIÁLNÍ APROXIMACE FRESNELOVÝCH INTEGRÁLŮ

Odvozený model přechodové hrany (4-13) obsahuje *Fresnelovy integrály*. *Fresnelovy integrály* jsou tzv. *vyšší transcendentní funkce*, tedy funkce, které nelze v konečném tvaru vyjádřit pomocí *elementárních funkcí*. *Fresnelovy integrály* z tohoto důvodu nelze popsat například jedním polynomem, který je vhodný pro implementaci v algoritmech optimalizované aproximace reálné přechodové hrany. Z hlediska výstupů teoreticky provedených analýz se jako nejvhodnější pro návrh implementačně vhodné podoby modelu přechodové hrany ukázala aproximace *Fresnelových integrálů* dle Moshier [13] a [14], která pro oblast argumentu  $x$ ,

$0 \leq |x| \leq 1,6008$  aproximuje *Fresnelovy integrály* pomocí racionálních lomených funkcí. Střední kvadratická odchylka uvedeného způsobu aproximace *Fresnelových integrálů* se oproti jiným způsobům jejich výpočtu pohybuje v řádu  $1 \cdot 10^{-16}$  dle [13].

Použitím intervalové aproximace *Fresnelových integrálů* racionálními lomenými funkcemi na model (4-13) je po optimalizaci v programu Maple získána následující podoba modelující funkce přechodové hrany

$$I_{M\_edge}(x) = 0,25 \cdot \left( \left( \frac{P_A(d_{X+})}{Q_A(d_{X+})} \right)^2 + \left( \frac{P_B(d_{X+})}{Q_B(d_{X+})} \right)^2 \right), \quad (5-1)$$

kde  $d_{X+}$  je definováno vztahem (4-5) a

$$\begin{aligned} P_A(t) = & 3,99982969 \cdot 10^8 t^{24} - 9,976862291 \cdot 10^{12} t^{21} + 9,154392158 \cdot 10^{10} t^{20} + \\ & + 1,900856126 \cdot 10^{15} t^{17} + 1,250018625 \cdot 10^{13} t^{16} - 1,290382871 \cdot 10^{17} t^{13} + \\ & + 1,222627890 \cdot 10^{15} t^{12} + 3,776866388 \cdot 10^{18} t^9 + 8,680295429 \cdot 10^{16} t^8 - \\ & - 4,11051819 \cdot 10^{19} t^5 + 4,121420907 \cdot 10^{18} t^4 + 2 \cdot 10^{20} t + 1 \cdot 10^{20} \end{aligned} \quad (5-2)$$

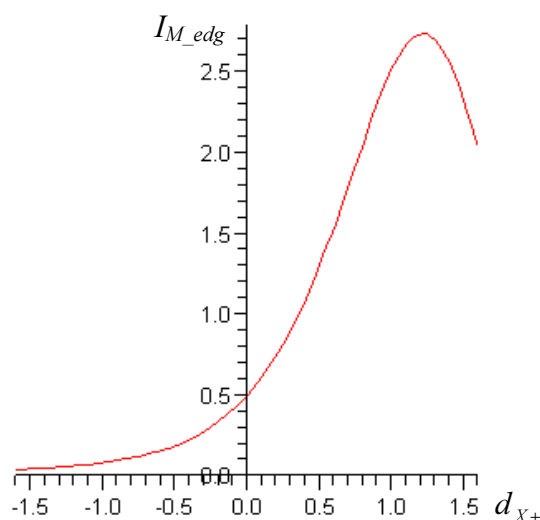
$$\begin{aligned} Q_A(t) = & 3,99982969 \cdot 10^8 t^{24} + 9,154392158 \cdot 10^{10} t^{20} + 1,250018625 \cdot 10^{13} t^{16} + \\ & + 1,222627890 \cdot 10^{15} t^{12} + 8,680295429 \cdot 10^{16} t^8 + 4,121420907 \cdot 10^{18} t^4 + 1 \cdot 10^{20}, \end{aligned} \quad (5-3)$$

$P_B(t)$  a  $Q_B(t)$  jsou definovány obdobně (viz úplné znění disertační práce). Tento model je nadále přímo svázán s fyzikální realitou tvorby obrazu danou zobrazovací soustavou.

Model přechodové hrany (5-1) založený na polynomiální aproximaci přechodových oblastí *Fresnelových integrálů* je platný v rozsahu hodnot argumentu

$$|d_{X+}| \leq 1,6008. \quad (5-4)$$

Průběh odezvy modelu v tomto rozsahu je zobrazen na následujícím obrázku.



Obr. 5.1 Průběh polynomiální modelující funkce přechodové hrany (5-1)

## 5.2 VLIV VZORKOVÁNÍ OBRAZU PŘECHODOVÉ HRANY CCD SNÍMAČEM

V rámci této kapitoly jsou v disertační práci vyšetřeny vlivy vzorkování obrazů reálným CCD snímačem. Nejprve jsou tyto vlivy šetřeny s použitím syntetických dat a následně i s reálnými přechodovými hranami získanými z obrazu předmětu zájmu. Závěry získané v rámci těchto analýz posloužily k formulování *metody optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů přechodové hrany modelující funkcí*.

## 5.3 METODA OPTIMALIZOVANÉ APROXIMACE JASOVÝCH HODNOT PIXELŮ PŘECHODOVÉ HRANY MODELUJÍCÍ FUNKCÍ

Vzhledem k tomu, že při reálném měření nejsou k dispozici všechny aktuální údaje o parametrech zobrazovací soustavy, ale pouze vzorkovaná přechodová hrana, je nutné upravit vztah (5-1) do podoby (5-5) vhodné pro *optimalizovanou aproximaci jasových hodnot pixelů přechodové hrany modelující funkcí*. Tento tvar modelující funkce nadále odpovídá fyzikální realitě tvorby obrazu.

$$I_{M\_edge}(x) = 0,25 \cdot \left( \left( \frac{P_A(\kappa(\tau + x))}{Q_A(\kappa(\tau + x))} \right)^2 + \left( \frac{P_B(\kappa(\tau + x))}{Q_B(\kappa(\tau + x))} \right)^2 \right). \quad (5-5)$$

### 5.3.1 Souhrn doporučení pro realizaci metody optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů přechodové hrany modelující funkcí

V následující kapitole je formou implementačních doporučení popsána strategie modelování reálné pixelové přechodové hrany modelující funkcí (5-5). Jednotlivá doporučení vycházejí z apriorních informací získaných při teoretických odvozeních, z výše uvedených závěrů řady diskuzí vlivu jednotlivých parametrů modelu zobrazení a z poznatků získaných testováním různých podob implementace aproximace jasových hodnot reálné přechodové hrany modelující funkcí (5-5).

- *Přechodová hrana modelu (4-13) je plně formována Fresnelovými integrály v rozsahu argumentu  $|x| \leq 1,5$  (viz kapitola 4.4), a proto lze použít aproximaci Fresnelových integrálů uvedenou v kapitole 5.1 a z ní vycházející modelující funkci přechodové hrany (5-1), respektive (5-5) platnou pro rozsah argumentů dle (5-4).*
- *Vlivem vzorkování obrazové funkce dochází k podvzorkování zákmitů v opticky propustné části předmětu, a tudíž nelze tyto hodnoty použít pro optimalizaci proložení modelující funkce jasovými hodnotami obrazové hrany.*
- *Podvzorkováním nemohou být zasaženy jasové hodnoty obrazové hrany s jasem menším než jas odpovídající prvnímu minimu fyzikálního modelu (4-13) v opticky propustné části bezprostředně za přechodovou hranou.*

*Hodnotu prvního minima za přechodovou hranou v rámci fyzikálního modelu lze odvodit a jak je patrné z obr. 4.4, nemění se s úrovní rozostření optické soustavy. Do procesu optimalizace proto zahrneme pouze ty pixely přechodové hrany, které mají hodnotu jasu menší než úroveň prvního minima za přechodovou hranou. V případě obrazového jasového průběhu normovaného vzhledem k fyzikálnímu modelu na ustálenou hodnotu jasu opticky propustné části předmětu je vhodné s rezervou volit hodnotu prahu 1,5.*

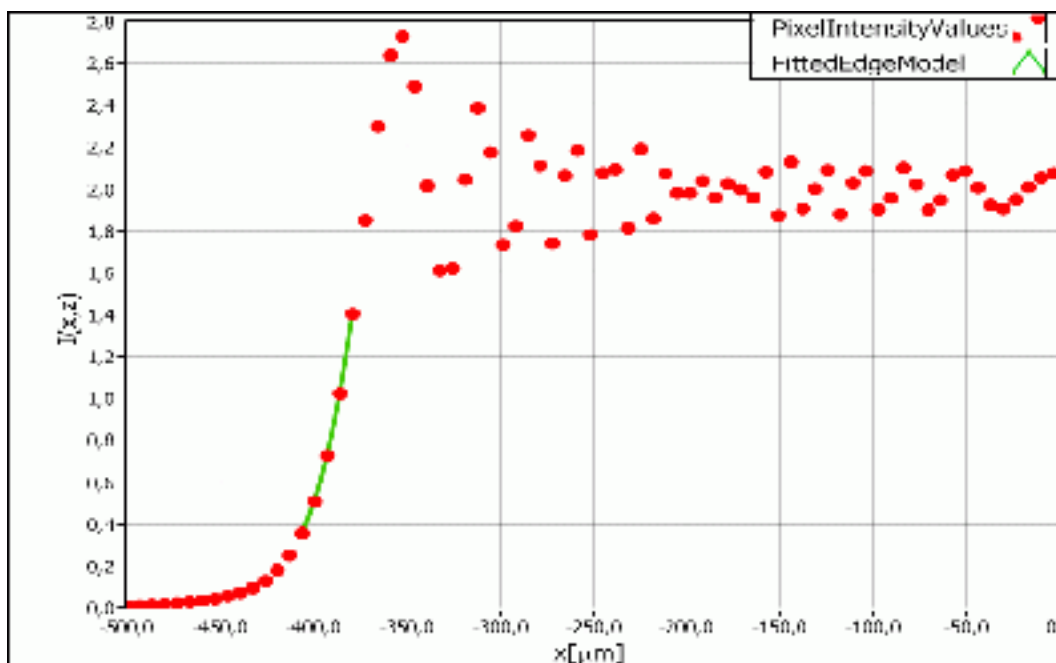
- *Z přijatelně ustálených hodnot jasu v opticky propustné části lze statistickým výpočtem stanovit hodnotu jasu odpovídající ustálené hodnotě fyzikálního modelu pro opticky propustnou část předmětu. Tato hodnota je poté využitelná pro normování obrazových jasových hodnot hrany do rozsahu hodnot modelující funkce (5-5).*
- *Hodnoty jasu pro opticky nepropustnou část předmětu (geometrický stín) jsou vzhledem k vlastnostem reálné kamery, zejména tepelnému šumu, významně zatíženy relativní chybou. Z tohoto důvodu je vhodné vypustit tyto hodnoty ze souboru hodnot určených k aproximaci modelující funkcí přechodové hrany (5-5). Do procesu optimalizované aproximace modelující funkcí proto zahrneme pouze pixely s jasem vyšším a rovným hodnotě nezbytně nutné pro určení přesné pozice obrysového bodu dle (4-11). Za nositele nezbytně nutné hodnoty jasu je přitom považován pixel s jasem bezprostředně nižším než hodnota odpovídající předpokládané pozici obrysového bodu předmětu dle (4-11). V případě normovaného jasového průběhu se jedná o hodnotu jasu pixelu bezprostředně nižší hodnotě 0,5.*
- *Pozice obrysového bodu předmětu v obraze je definována dle (4-11). V případě modelovaného normovaného průběhu je pozice obrysového bodu přímo dána subpixelovou polohou odpovídající hodnotě 0,5.*
- *Při hledání optimálních parametrů aproximace vybraných jasových hodnot funkcí modelující (5-5) je nutné vzít v úvahu rozsah platnosti parametru  $d_{x+}$  (5-4) modelující funkce (5-1) a pro aproximaci použít pouze odpovídající úsek modelující funkce (5-5) (viz obr. 5.1)<sup>2</sup>.*

Algoritmus respektující uvedená doporučení byl implementován v programovacím jazyce LabView. Pro optimalizaci parametrů  $\kappa$ ,  $\tau$  modelující funkce přechodové hrany (5-5) byla použita interní LabView implementace *Levenberg-Marquardt* [15] optimalizačního algoritmu. Na obr. 5.2 je zobrazen výsledek optimalizované aproximace přechodové hrany, jejíž body byly získány vzorkováním modelu přechodové hrany (4-13) pro zvolené parametry zobrazovacího systému. Pozice odpovídající skutečné hraně předmětu se pro model před vzorkováním nacházela v hodnotě  $-400 \mu\text{m}$ , přičemž při určení skutečné pozice

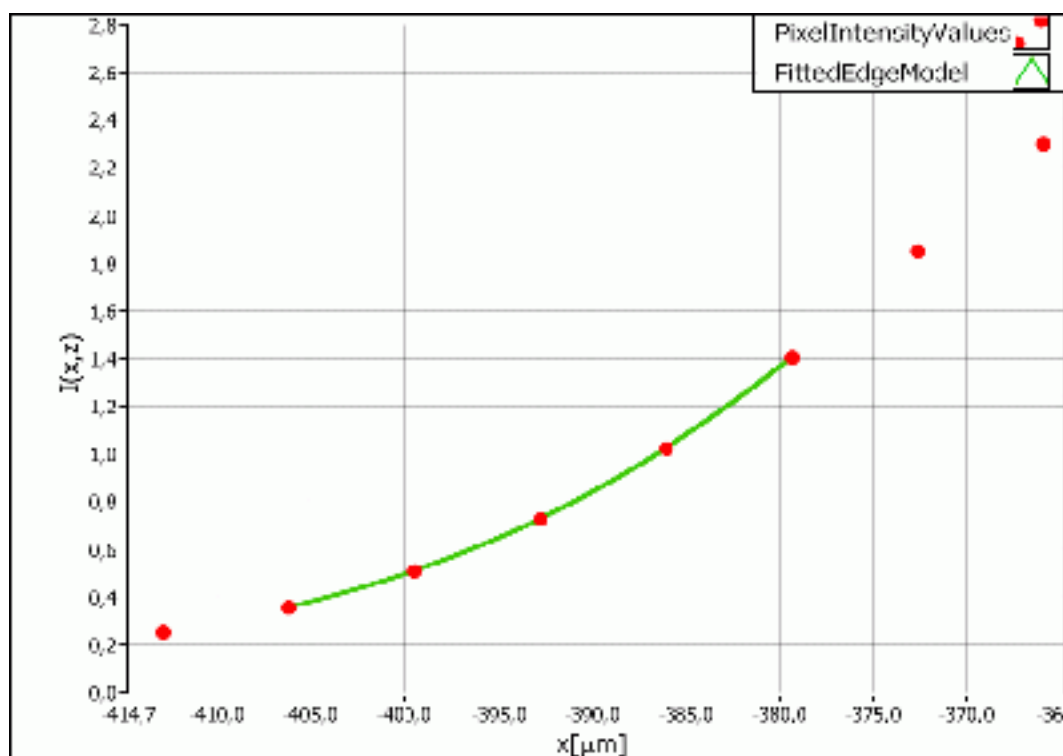
---

<sup>2</sup> Tento bod je vysoce implementačně závislý a je teoreticky možné najít optimalizační algoritmus provádějící úpravu rozsahu parametru modelující funkce automaticky.

obrysu předmětu v obraze podle vztahu (4-11) z proložené modelující funkce (5-5) je získána hodnota  $-400,04 \mu\text{m}$ . Relativní i absolutní chyba určení pozice při použití navrženého algoritmu se syntetickými daty je tedy zanedbatelná. V rámci testování algoritmu se syntetickými daty byla tato skutečnost potvrzena na reprezentativním vzorku 20 syntetických přechodových hran s různou úrovní rozostření.



Obr. 5.2 Výsledek optimalizované aproximace vzorkované odezvy modelu přechodové hrany modelující funkcí (5-5) pomocí navrženého algoritmu



Obr. 5.3 Detail výsledku optimalizované aproximace vzorkované odezvy modelu přechodové hrany modelující funkcí (5-5) pomocí navrženého algoritmu



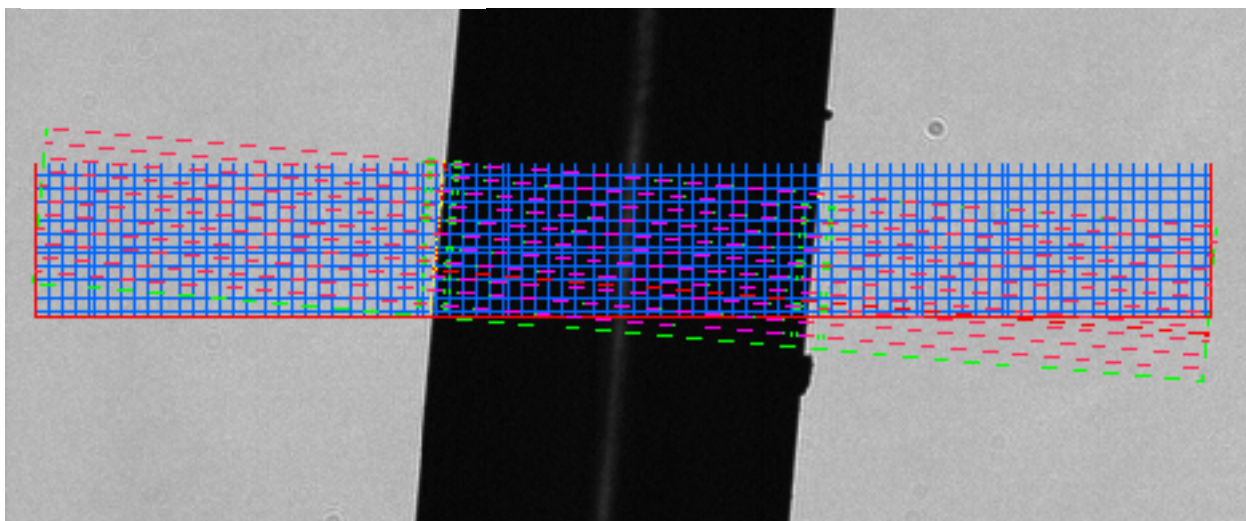
## 6 OVĚŘENÍ PŘESNOSTI METODY MODELOVÁNÍ PŘECHODOVÉ HRANY S REÁLNÝMI DATY

Navržená *metoda optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů přechodové hrany modelující funkcí* byla začleněna spolu s řadou dalších autorských algoritmů do měřicího systému Tester2D - *Prototyp zařízení pro přesné mikrometrické testování prosévacích sít pro stavební a potravinářský průmysl*. Měřicí systém Tester2D je zobrazen na obr. 6.1. Měřicí systém byl akreditován ČIA - *Český institut pro akreditaci* a jeho přesnost ověřena mezilaboratorním porovnáváním pod záštitou ČMI - *Český metrologický institut*. Pro ukázkou ověření přesnosti měření bylo použito měření přesných drátkových etalonů ( $620,5\ \mu\text{m}$ ;  $49,8\ \mu\text{m}$ ) viz obr. 6.2. V rámci úplného znění disertační práce je podrobně popsán a odůvodněn zvolený postup měření. Dosažené výsledky měření jsou v rámci úplného znění disertační práce statisticky vyhodnoceny a komentovány.

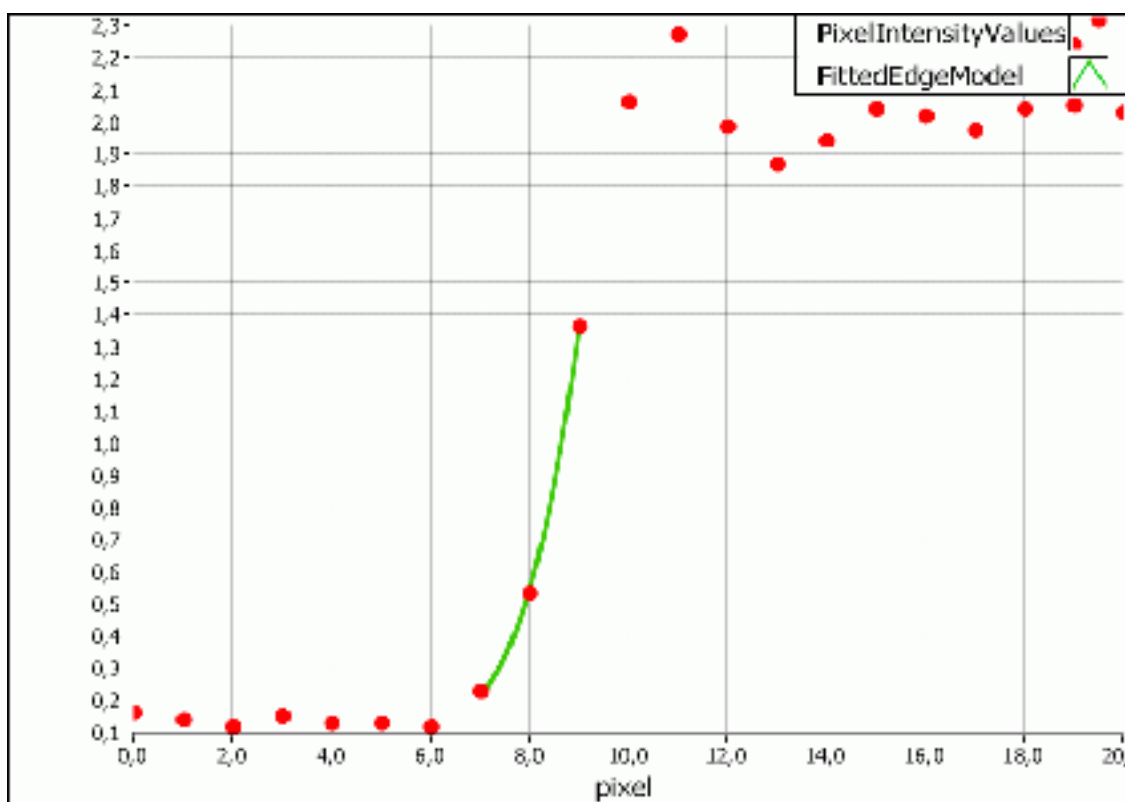


Obr. 6.1 Tester2D – akreditovaný měřicí systém pro testování průmyslových sít

a) etalon délky 620,5  $\mu\text{m}$



b) aproximovaná reálná náběžná hrana



Obr. 6.2 Ukázka vyhodnocené oblasti měřeného etalonu 620,5  $\mu\text{m}$  spolu s reálnou přechodovou hranou aproximovanou navrženou modelující funkcí

## 7 ZÁVĚR

V úvodních částech disertační práce byly představeny důvody proč se daným tématem zabývat, dále byla stručně zhodnocena pozice řešeného problému z hlediska aktuálního stavu problematiky v souvisejících technických oblastech a byly definovány cíle a očekávané výstupy práce.

Na principech geometrické optiky byla odůvodněna vhodnost použití telecentrické optické soustavy v předmětovém prostoru v kombinaci s telecentrickým osvětlením pro metrologické aplikace. Byl odvozen vztah definující hloubku předmětového pole telecentrické optické soustavy v předmětovém prostoru (4-2). Na tomto vztahu byly dokázány pozitivní dopady použití telecentrického osvětlení na zvýšení hloubky předmětového pole a odstranění přímé závislosti tohoto parametru na průměru aperturní telecentrické clony (4-3). Tyto vztahy jsou nezbytné pro další odvození a diskuzi výsledků odvození v navazujících částech práce.

Geometrická optika neumožňuje analyzovat problematiku zobrazování předmětu na úrovni rozložení optického pole a není proto vhodná pro hledání fyzikálního modelu přechodových hran předmětů zobrazovaných optickou soustavou. Za tímto účelem byla provedena detailní analýza konkrétního zobrazovacího systému zobrazujícího definovaný předmět zájmu (viz obr. 4.1) na základě pravidel Fourierovské optiky. Výsledkem analýzy je vztah definující rozložení optického pole v obrazovém prostoru a tedy i v místě umístění snímacího prvku. Tento vztah nese komplexní informaci o zobrazení definovaného předmětu zájmu telecentrickým optickým systémem s telecentrickým zadním osvětlením do snímací roviny. Dalším odvozením z něj byl získán fyzikální model zobrazení předmětu zájmu ve snímací rovině (4-10). Model byl podroben detailní diskuzi parametrů, na základě níž byl odvozen vztah určující hodnotu intenzity (4-11) odpovídající skutečné pozici obrysu předmětu zájmu při jeho zobrazení definovaným způsobem. Odvozený fyzikální model zobrazení předmětu zájmu byl realizován v programovacím jazyce LabView a jeho odezvy pro konkrétní nastavení parametrů optické soustavy byly analyzovány z hlediska dopadů na přesnost odvozeného vztahu pro určení skutečné pozice obrysu předmětu (obrysového bodu). Byly stanoveny limity tohoto modelu z pohledu rozostření optické soustavy a velikosti opticky propustné části předmětu zájmu. Z fyzikálního modelu zobrazení předmětu zájmu byl formou aproximace okrajových podmínek stanoven fyzikální model přechodové hrany (4-13) a provedena diskuze chyby této aproximace. Fyzikální model přechodové hrany (4-13) obsahuje ve své definici *Fresnelovy integrály*, což jsou tzv. *vyšší transcendentní funkce* a nelze je tedy vyjádřit pomocí *elementárních funkcí*. Diskuzí fyzikálního modelu bylo prokázáno, že na tvorbě přechodové hrany se podílí pouze konkrétní část *Fresnelových integrálů*, pro kterou je možné použít polynomiální aproximaci se zcela zanedbatelnou maximální chybou aproximace v řádu  $1.10^{-16}$ . Pomocí této polynomiální aproximace *Fresnelových integrálů* byl z fyzikálního modelu přechodové hrany (4-13) odvozen vztah pro modelující funkci (5-5) vhodnou k optimalizované aproximaci přechodové hrany v obraze. Modelující funkce je stále

zcela propojena s fyzikální realitou vycházející z odvozeného vztahu pro rozložení optického pole v obrazovém prostoru, a proto pro ni platí i odvozený vztah definující způsob určení skutečné pozice obrysu předmětu (4-11).

V navazující části práce byla provedena diskuze dopadů vzorkování přechodové hrany optickým snímačem do podoby diskrétních hodnot jasu v pixelech výstupního obrazu kamery. Z této diskuze a ze zkušeností s aproximací reálných přechodových hran byla stanovena stěžejní doporučení charakterizující *metodu optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů modelující funkcí přechodové hrany* (5-5).

Navržená metoda byla implementována v programovacím jazyce LabView a její přesnost nejprve ověřena pomocí syntetických vstupních dat. Pro ověření přesnosti metody s reálnými obrazovými daty byla metoda začleněna do měřicího systému Tester2D a provedeno kontrolní měření kalibrovaných etalonů délky ( $620,5 \mu\text{m}$ ;  $49,8 \mu\text{m}$ ). Výsledky měření etalonů délky jsou v úplném znění disertační práce statisticky zpracovány a podrobně diskutovány.

Z hlediska definovaných cílů disertační práce lze říci, že byly naplněny. Měřicí systém Tester2D byl akreditován pro měření geometrických rozměrů v rozsahu  $40 \mu\text{m} - 20 \text{mm}$  s přesností až  $0,1 \mu\text{m}$ . Byla odvozena fyzikálně podložená modelující funkce přechodové hrany předmětu zájmu (5-5) v podobě vhodné pro algoritmizaci. Byl stanoven způsob detekce přesné pozice obrysu předmětu zájmu v rámci modelující funkce přechodové hrany. Byla navržena metoda optimalizované aproximace reálných přechodových hran v obraze odvozenou modelující funkcí. Uvedená metoda byla implementována v programovacím jazyce LabView 6.1 a její přesnost ověřena se syntetickými i reálnými daty. V průběhu jejího začlenění do již existujících částí původní měřicí metody v systému Tester2D byla nově realizována nebo modifikována řada dalších algoritmů zpracování obrazů.

Mimo výše uvedeného je v rámci měřicího systému Tester2D autor disertační práce autorem uživatelského rozhraní měřicího systému, algoritmů automatického řízení pohonů křížového stolu dle vloženého typu síta (čtvercová oka, kruhová oka, obdélníková oka), metody automatické optimalizace expozice a algoritmů statistického vyhodnocení výsledků měření v návaznosti na příslušné požadavky norem ČSN ISO pro konkrétní typy průmyslových sít.

Nově vytvořená metoda byla postupně v průběhu jejího vývoje publikována autorem disertační práce v podobě konferenčních příspěvků na řadě zahraničních a domácích konferencí. Z pohledu disertační práce lze považovat za stěžejní následující publikace [37], [38], [39], [40].

Nezkrácená podoba disertační práce je k dispozici na Vědeckém oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně.

## LITERATURA

- [1] BASS, M. (Authors Collective), *HANDBOOK OF OPTICS Volume I Fundamentals, Techniques, and Design*, THE MCGRAW-HILL COMPANIES, INC., 1995, 1606 s., ISBN 0-07-047740-7.
- [2] GÄSVIK K. J. *Optical Metrology Third Edition*, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, 2002, ISBN 0-470-84300-4.
- [3] BORN, M., WOLF, E. *Principles of Optics, 6th ed.*, Pergamon Press Ltd., Oxford, 1985, ISBN 0-08-026482-4.
- [4] GOODMAN W. J. *Introduction to Fourier optics second edition* THE MCGRAW-HILL COMPANIES, INC., 1996, ISBN 0-07-0242254-2.
- [5] BANARJEE, P. P., POON, T. CH. *Principles of Applied Optics*, Richard D. Irwin, Boston, 1991, ISBN 0-256-08860-8.
- [6] RÖMER, H. *Theoretical Optics*, 2005, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, ISBN 3-527-40429-5.
- [7] Princeton Instruments. *MegaPlus EC16000 digital camera*. Dostupné z <http://www.piacom.com/>, 2008.
- [8] PULNiX. *TM-1320-15L Digital camera*. <http://www.jai.com>, 2008.
- [9] JAN, J. *Číslíková filtrace, analýza a restaurace signálů*. vědecké monografie. vědecké monografie. Brno: VUTIUM Brno, 2002. 427 s. ISBN: 80-214-1558-4.
- [10] GRADŠTEJN, I. S., RYZIK, I. M. *Tablicy integralov, summ, rjadov i proizvedenij* GIFML, Moskva, Fizmatgiz, 1962, 1100s.
- [11] BRYČKOV I. A., MARICEV O. I., PRUDNIKOV, A. P. *Tablicy neopredelennykh integralov*, Moskva, Nauk, 1986, 191s.
- [12] BOKOR, N., DAVIDSON, N. *Ideal collimation, concentration, and imaging with curved diffractive optical elements*, Review of Scientific Instruments, Volume 76, Issue 11, pp. 111101-111101-17 (2005).
- [13] MOSHIER, S., L. *Methods and Programs for Mathematical Functions* Ellis Horwood Ltd, New York, 1998, 300 s., ISBN10: 0135789982, ISBN13: 9780135789988.
- [14] MOSHIER, S., L. *Cephes Math Library Release 2.8* June, 2000 [online] <http://www.codecogs.com/cog-164>.
- [15] NOCEDAL J., WRIGHT J. S., *Numerical optimization* Springer, 1999, 636 s., ISBN 0387987932, 9780387987934.
- [16] CHRISTOPH, R., NEUMANN, H. J., *Multisensor Coordinate Metrology*, Sv corporate media GmbH, Munich, 2003, 96 s., ISBN 3-938889-03-5.
- [17] National Instruments: *IMAQ Vision Concepts Manuals* National Instruments Corporation 2001 [www.ni.com](http://www.ni.com).
- [18] National Instruments: *LabView 6.1 Manuals* National Instruments Corporation 2001 [www.ni.com](http://www.ni.com).
- [19] THALES OPTEM: *Telecentric ZOOM 100 – 10:1 Optical System*, Dostupné 21.11.2008 z <http://www.qioptiqimaging.com/Products/ProductDisplay.aspx?productid=158>.
- [20] Sill Optics: *LED Colimator Datasheet*, Dostupné 21.11.2008 na <http://www.silloptics.com/english/downloads/ev22.pdf>.
- [21] PULNiX: *TM-1320 CCD Camera*, Dostupné 21.11.2008 na <http://www.pulnix.com/PDFs/IMG-PDFs/Obsolete/TM-1320-15CL.pdf>.
- [22] Berger Lahr: *Linear Step Motors*, Dostupné 28.11.2008 z [http://www.berger-lahr.com/deutsch/pressemitteilungen/uploaded\\_files/press\\_33\\_1.pdf](http://www.berger-lahr.com/deutsch/pressemitteilungen/uploaded_files/press_33_1.pdf).
- [23] ČSN ISO 3310-1 *Zkušební síta. Technické požadavky a zkoušení, Zkušební síta z kovové tkaniny*. 1994.
- [24] ČSN ISO 3310-2 *Zkušební síta. Technické požadavky a zkoušení, Zkušební síta z děrovaného plechu*. 1994.
- [25] ČSN ISO 565. *Zkušební síta. Kovová tkanina, děrovaný plech a elektroformovaná folie. Jmenovitá velikost otvorů*. 1994.
- [26] STANĚK, TH. *Požadavky praxe na měření sít*. Technická zpráva, VUSH, a.s., Brno 2002.
- [27] HLAVÁČ, V., ŠONKA, M. *Počítačové vidění*, Grada a.s., 1992, ISBN 80-85424-67-3.
- [28] SOJKA E. *Digitální zpracování a analýza obrazů, VŠB-TU Ostrava, 2000, ISBN 80-7078-746-5*.

- [29] YU-SHAN LI, TZAY, Y., Y. Subpixel Edge Detection and Estimation with a Microprocessor-Controlled Line Scan Camera, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, Bd. 35, Nr. 1, 1.1998, p. 105-112, XP002365316.
- [30] TRUCHETET, F., NICOLIER, F., LALIGANT, O. Subpixel Edge Detection for Dimensional Control by Artificial Vision, *Journal of Electronic Imaging*, vol. 10, iss. 1, pp. 234-239, 2001, ISSN: 1017-9909 (print); 1560-229X (online).
- [31] QU, Y.D., CUI, C.S, CHEN, S.B., LI, J.Q., A fast subpixel edge detection method using Sobel-Zernike moments operators, *Image and Vision Computing - IVC(23)*, No. 1, 1 January 2004, pp. 11-17. ISSN: 0262-8856.
- [32] BIN, T.J., LEI, A., CUI, J.W., KANG, W.J., LIU, D.D. Subpixel edge location based on orthogonal Fourier-Mellin moments, *Image and Vision Computing - IVC(26)*, No. 4, April 2008, pp. 563-569.
- [33] HERMOSILLA, T., BERMEJO, E., BALAGUER, A., RUIZ, L.A., Non-linear fourth-order image interpolation for subpixel edge detection and localization, *Image and Vision Computing - IVC(26)*, No. 9, 1 September 2008, pp. 1240-1248. ISSN: 0262-8856.
- [34] JUTZI, B., NEULIST, J., STILLA, U. Sub-pixel edge localization based on laser waveform analysis, *Workshop "Laser scanning 2005"*, Enschede, the Netherlands, September 12-14, 2005.
- [35] NAGY, Z., VRBA, K. Accurate Imaging and Calibration Setup for 2D Non-contact Optical Measurements. In *VIIIP*. Benalmadena: VIIP, 2003. s. 200-203. ISBN: 0-88986-382-2.
- [36] NAGY, Z., VRBA, K., STEFICEK, R. Dimensional Measurement Using Highly Telecentric Illumination. In *Proceedings of International Conference Research in Telecommunication Technology – RTT 2003*, p. 67-70. ISBN 80-227-1934-X.

## VLASTNÍ PUBLIKACE

- [37] KOHOUTEK, M.; VRBA, K. Image Processing Method Based on Subpixel Analysis for Accurate Measurement of Dimensions. In *n Sixth International Conference on Networking. Sixth International Conference on Networking, ICN 2007*. Sainte Luce - Martinique, IEEE Computer Society. 2007. p. 1 - 4. ISBN 0-7695-2805-8.
- [38] KOHOUTEK, M. The Interactive Measuring System Based on the Image Processing. In *Preceedings of Interantionale Conference on Signals and Systems ICSES 06*. Poland, Lodž, Technical University of Łódź, Institute of Circuit Theory, 2006. p. 383 - 386. ISBN 83-921172-6-3.
- [39] KOHOUTEK, M.; ČÍKA, P.; ŘÍHA, K. Subpixel Edge Detection with Optimized Fresnel Edge Fitting Method and Double Calibration Method. In *31st International Conference on TELECOMMUNICATIONS AND SIGNAL PROCESSING TSP 2008*. 1. Budapest, Budapest University of Technology and Economics. 2008. p. 86 - 89. ISBN 978-963-06-5487-6.
- [40] NAGY, Z., KOHOUTEK, M. Diffraction Pattern Analysis for Accurate 2D Non-Contact Dimensional Measurements. In *Proceedins of the Int. Conf. Visualisation, Imaging and Image Processing 2005*. edice. Benidorm, VIIP 2005. 2005. p. 1 - 6.
- [41] KOHOUTEK, M. New methods for automatic focusing of pictures acquired from a camera, realized in LabView. In *Proceedings RTT2005 Research in Telecommunication Technology 2005*. Hradec nad Moravicí, the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science the Department of Electronics and Telecommunications VŠB. 2005. p. 701 - 704. ISBN 80-248-0897-8.
- [42] VRBA, K., NAGY, Z., ŘÍHA, K., KOHOUTEK, M. Výzkum nových metod zpracování obrazu pro přesná měření rozměrů ve stavebnictví a jejich ověření na prototypu 2D testeru. Brno. 2004. p. 1 - 84.
- [43] VRBA, K., VESELY, J., NAGY, Z., WILFERT, O., HUJKA, P., KOHOUTEK, M. Výzkum nových metod zpracování obrazu pro přesná měření rozměrů ve stavebnictví a jejich ověření na prototypu 2D testeru. Oponovaná závěrečná výzkumná zpráva o řešení projektu MPO ČR, FD-K2/01. 59 stran. VUT v Brně. Brno, 2002.

- [44] NAGY, Z., WILFERT, O., VRBA, K., KOHOUBEK, M. Výzkum metod segmentace obrazu založených na hranových detektorech a objektových modelech. Oponovaná výzkumná zpráva o řešení projektu MPO ČR, FD-K2/01. 60 stran. VUT v Brně. Brno, 2002.
- [45] NAGY, Z., WILFERT, O., HUJKA, P., VRBA, K., KOHOUBEK, M. Výzkum metod předzpracování obrazu pro přesnou analýzu objektů v digitálních obrazech. Oponovaná výzkumná zpráva o řešení projektu MPO ČR, FD-K2/01. 59 stran. VUT v Brně. Brno, 2002.
- [46] NAGY, Z., WILFERT, O., VRBA, K., KOHOUBEK, M. Vývoj zvětšovací telecentrické optické soustavy a ověření algoritmů pro měření rozměrů. Oponovaná výzkumná zpráva projektu MPO ČR, FD-K2/01 za rok 2003-2004, Brno.
- [47] VRBA, K., NAGY, Z., KOHOUBEK, M. Automatizované řízení polohovacího křížového stolu v dvojdimenzionálním prostoru. Oponovaná výzkumná zpráva k řešení projektu FD1849291.
- [48] KOHOUBEK, M. Program pro automatické ostření obrazu realizovaný v LabView. *Elektrorevue - Internetový časopis* (<http://www.elektrorevue.cz>). 2005. 2005(24). p. 1 - 1. ISSN 1213-1539.
- [49] KOHOUBEK, M.; KOVÁŘ, P.; ŠKORPIL, V. *Praktická TELEINFORMATIKA*. 1. Tribun EU, s. r. o., Gorkého 41, 602 00 Brno, Vysoké učení technické v Brně. 2008. 140 p. ISBN 978-80-214-3747-0.
- [50] KOHOUBEK, M.; HANUS, S.; BURDA, K.; ZEMAN, V.; MOLNÁR, K.; NOVOTNÝ, V.; KOMOSNÝ, D. *Teleinformatika I*. 1. Tribun EU, s. r. o., Gorkého 41, 602 00 Brno, Vysoké učení technické v Brně. 2008. 144 p. ISBN 978-80-214-3745-6.
- [51] KOHOUBEK, M.; SCHIMMEL, J.; BURGET, R.; JEŘÁBEK, J.; KYSELÁK, M. *Teleinformatika II*. 1. Tribun EU, s. r. o., Gorkého 41, 602 00 Brno, Vysoké učení technické v Brně. 2008. 106 p. ISBN 978-80-214-3746-3.
- [52] HANÁK, P.; VRBA, K.; KOHOUBEK, M. Single-Output, High-Amperage Digitally Controlled Current Pulse Generator for Magnetic Therapy. In *Proceedings of 31th Telecommunications and Signal Processing conference*. Budapest, Assisztencia Szervezo Kft. 2008. p. 1 - 4. ISBN 978-963-06-5487-6.
- [53] ČÍKA, P.; KOHOUBEK, M.; KOVÁŘ, P. Improved Digital Image Watermarking Method Based on DWT and SVD. In *31st International Conference on TELECOMMUNICATIONS AND SIGNAL PROCESSING TSP 2008*. 1. Budapest, Budapest University of Technology and Economics. 2008. p. 120 - 123. ISBN 978-963-06-5487-6.
- [54] ŠKORPIL, V.; KOHOUBEK, M. The Methodology of Telematic Subjects Creation. In *The Present and Future of Modern Transport*. CD. Praha, ČVUT Praha. 2008. p. 291 - 294. ISBN 978-80-01-04056-0.
- [55] NOVOTNÝ, V.; BODEČEK, K.; STEJSKAL, V.; ČÍKA, P.; KOHOUBEK, M. *Interaktivní aplikace pro digitální televizní vysílání*. FEKT VUT v Brně, Brno, ČR, FEKT VUT v Brně. 2008. p. 1 - 45.
- [56] KOHOUBEK, M.; ČÍKA, P.; NOVOTNÝ, V.; BODEČEK, K.; STEJSKAL, V. DVB-T broadcasting and MHP application development. In *Research in Telecommunication Technology RTT - 2007, Liptovský Ján*. Liptovský Ján, SR. 2007. p. 1 - 4. ISBN 978-80-8070-735-4.
- [57] ŠKORPIL, V.; KOHOUBEK, M. Celoživotní vzdělávání v oboru telematiky ve školství. In *CD sborník konference Telematika pro regionální dopravu 2007*. Plzeň, KPM Consult. 2007. p. 45 - 48. ISBN 978-80-239-9273-1.
- [58] RAMPL, I., VRBA, K., HANÁK, P., KOHOUBEK, M. *Výzkum a vývoj experimentálního léčebného zařízení LMG-4 pro kombinovanou magnetickou a optickou terapii*. Brno. 2006. p. 1 - 15.
- [59] KOHOUBEK, M.; BODEČEK, K.; NOVOTNÝ, V.; STEJSKAL, V. Experimentální pracoviště pro vývoj a testování interaktivních aplikací v sítích DVB-T. In *Proceedings RTT2006 Research in Telecommunication Technology 2006*. Brno. 2006. p. 36-40 (5 p.). ISBN 80-214-3243-8.
- [60] VRBA, K., BARTUŠEK, K., HANÁK, P., KOHOUBEK, M., KOULA, I. *Výzkum a vývoj číslicově řízeného impulsního magnetického plošného pole*. Brno. 2004. p. 1 - 50.



# CURRICULUM VITAE

Jméno: Ing. Michal Kohoutek  
Narozen: 7. 1. 1981 v Brně  
Kontakt: [kohoutek@feec.vutbr.cz](mailto:kohoutek@feec.vutbr.cz)

## Vzdělání:

2004 – 2007 Postgraduální studium oboru Teleinformatika v programu Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně.  
1999 – 2004 Magisterské studium v oboru Elektrotechnika a sdělovací technika na Fakultě elektrotechniky a informatiky Vysokého učení technického v Brně.  
1994 – 1999 SPŠ Jedovnice, Na Větráku 463, Jedovnice, Obor: Automatizační technika.

## Praxe:

2008 – dosud Flextronics Design, s. r. o. – vývojový pracovník.  
2007 – 2008 Vědecko pedagogický pracovník na Ústavu telekomunikací FEKT VUT v Brně (plný úvazek).  
2004 – 2007 Vědecko pedagogický pracovník na Ústavu telekomunikací FEKT VUT v Brně (částečný úvazek).

## Účast na řešení projektů:

2008 – 2008 Účast na projektu „Výzkum vlivu kombinace látek pro cílenou imunoterapii a inhibičního působení pole impulsního vektorového magnetického potenciálu na nádorová onemocnění“.  
2006 – 2008 Účast na projektu „Celoživotní vzdělávání a profesní příprava v oboru teleinformatiky, telematiky a dopravní telematiky“.  
2005 – 2008 Účast na výzkumném záměru „Elektronické komunikační systémy a technologie nových generací“.  
2007 – 2007 Účast na projektu „Zavedení laboratorních cvičení do předmětu Zabezpečovací systémy“.  
2007 – 2007 Účast na projektu „Inovace výuky předmětu Vzájemný převod analogových a digitálních signálů“.  
2005 – 2007 Účast na projektu „Univerzální architektura pro poskytování interaktivních informačních služeb terestriální digitální televize“.  
2004 – 2007 Účast na projektu „Výzkum účinků číslicově řízeného impulsního magneticko-laserového pole a příprava vývoje nového typu léčebného přístroje“.  
2006 – 2006 Získání projektu FRVŠ 3218/2006 „Teorie číslicového zpracování obrazů a její grafická prezentace ve výuce“.  
2003 – 2004 Účast na projektu „Výzkum nových metod zpracování obrazu pro přesná měření rozměrů ve stavebnictví a jejich ověření na typu 2D testeru“.



## Pedagogické aktivity:

- Výuka akreditovaných předmětů bakalářského studia oboru Teleinformatika a magisterského studia oboru Telekomunikační a informační technika na FEKT VUT v Brně – vedení laboratorních cvičení z předmětů:
  - Pokročilé techniky zpracování obrazů,
  - Multimediální služby,
  - Multimedia,
  - Vysokorychlostní komunikační sítě,
  - Počítače a programování 1,
  - Počítače a programování 2.
- Úspěšné vedení 10 bakalářských a 7 diplomových prací.
- Hlavní spoluautor monografie pro podporu celoživotního vzdělávání v oboru Teleinformatika
  - KOHOUTEK, M.; KOVÁŘ, P.; ŠKORPIL, V. *Praktická TELEINFORMATIKA*. 1. Tribun EU, s. r. o., Gorkého 41, 602 00 Brno, Vysoké učení technické v Brně. 2008. 140 p. ISBN 978-80-214-3747-0.
- Spoluautor 2 monografií pro podporu výuky v oboru Teleinformatika na Vysokých školách
  - KOHOUTEK, M.; HANUS, S.; BURDA, K.; ZEMAN, V.; MOLNÁR, K.; NOVOTNÝ, V.; KOMOSNÝ, D. *Teleinformatika I*. 1. Tribun EU, s. r. o., Gorkého 41, 602 00 Brno, Vysoké učení technické v Brně. 2008. 144 p. ISBN 978-80-214-3745-6.
  - KOHOUTEK, M.; SCHIMMEL, J.; BURGET, R.; JEŘÁBEK, J.; KYSELÁK, M. *Teleinformatika II*. 1. Tribun EU, s. r. o., Gorkého 41, 602 00 Brno, Vysoké učení technické v Brně. 2008. 106 p. ISBN 978-80-214-3746-3.

## Další aktivity:

Autor a spoluautor 7 registrovaných prototypů

- KOHOUTEK, M.; VRBA, K.: *Měřič sít - Prototyp zařízení pro přesné mikrometrické testování prosévacích sít pro stavební a potravinářský průmysl*. Prototyp je uložen ve firmě VÚSH a.s., Hněvkovského 30/65, Brno.
- KOHOUTEK, M.: *ImProTeach - Image Processing Teacher v. 1.0*. FEKT VUT Brno (software).
- HANÁK, P.; VRBA, K.; KOHOUTEK, M.: *VS-1 - Jednovýstupový výkonový číslicově řízený zdroj proudových pulsů pro magnetoterapii*. Prototyp je uložen na pracovišti: Ústav telekomunikací, FEKT VUTBR, Purkyňova 118, 61200 Brno.
- HANÁK, P.; VRBA, K.; KOHOUTEK, M.: *LMG-4 - Prototyp léčebného zařízení LMG-4 pro kombinovanou magnetickou a optickou terapii*. Prototyp je uložen na pracovišti: Ústav telekomunikací, FEKT VUTBR, Purkyňova 118, 61200 Brno.
- HANÁK, P.; VRBA, K.; KOHOUTEK, M.; KOULA, I.: *MG-3 - Prototyp léčebného zařízení MG-3 s pružným aplikátorem využívající planární cívky pro kožní magnetoterapii*. Prototyp je uložen na pracovišti: Ústav telekomunikací, FEKT VUTBR, Purkyňova 118, 61200 Brno.
- HANÁK, P.; VRBA, K.; KOHOUTEK, M.: *GP-P1 - Prototyp zařízení GP-P1 pro léčbu kožního onemocnění Adipositas oedematosa*. Prototyp je uložen ve firmě ENJOY s.r.o., Brno.
- NOVOTNÝ, V.; KOHOUTEK, M.; STEJSKAL, V.; ČÍKA, P.; BODEČEK, K.: *PeopleMetr - TV-meter-MHP*. UTKO, FEKT Vysoké učení technické v Brně, Purkyňova 118, Brno.

## ABSTRACT

The doctoral thesis is focused on a design of a new original image transition edge physical modeling method for exact object shape position determination. Automatic Optical Inspection Systems for the high accuracy optical measurements are main application area for designed method.

The new method design is based on precise physical analysis of a defined imaging system. Object side telecentric lens, telecentric backlight source and CCD video camera are main parts of the analyzed imaging system. New image transition edge physical model and method for accurate shape position detection within the model are derived by geometrical and Fourier optics imaging system analysis. Possible influences of the model parameters changes to the accuracy of shape position detection are studied precisely. A new modeling function suitable for implementation in a new optimal approximation method is derived from the physical transition edge model. The modeling function optimal approximation method is implemented in to a Tester2D measuring system and verified by length etalon measurements. The Tester2D measuring system was successfully accredited for dimensions measurement in range  $40\ \mu\text{m} - 20\ \text{mm}$  with accuracy up to  $0,1\ \mu\text{m}$ . Documentation of results of the accreditation process with the record of obtained results from measurement system in scope of preformed interlaboratory comparison tests are appended to the doctoral thesis.