VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

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

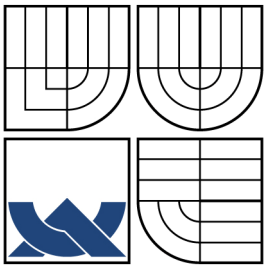
DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

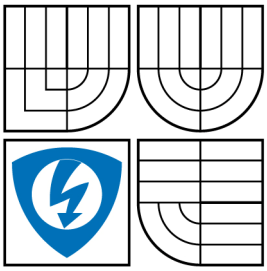
AUTOR PRÁCE **ING. MICHAL KOHOUTEK**

AUTHOR

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

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

IMAGE TRANSITION EDGE PHYSICAL MODELING FOR EXACT OBJECT SHAPE POSITION DETERMINATION

DOKTORSKÁ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE — Ing. Michal KOHOUTEK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. Vladislav ŠKORPIL, CSc
SUPERVISOR

BRNO 2009

Poděkování

Děkuji svému školiteli doc. Ing. Vladislavu Škorpilovi, CSc. za jeho trpělivost a podporu v mém výzkumu. Prof. Ing. Kamilu Vrbovi, CSc. za umožnění práce se špičkovými technologiemi a podnětné rady v průběhu výzkumu. Dále děkuji Jiřímu Petlachovi vedoucímu akreditované laboratoře AKL-Síta za ochotu, podporu a asistenci při nesčetných testech a měřeních.

V neposlední řadě děkuji svým blízkým, své přítelkyni Lucii a rodičům za to, že mi byli oporou a povzbuzením v průběhu celého studia a zejména v době psaní této disertační práce v průběhu nespočetných nočních hodin po příchodu ze zaměstnání.

Michal Kohoutek

Abstrakt

Disertační práce se zabývá návrhem nové originální metody fyzikálního modelování přechodových hran v obraze pro určení skutečné subpixelové pozice obrysu předmětu. Aplikační oblastí vyvinuté metody je oblast vysoce přesných měření geometrických rozměrů předmětů v průmyslových inspekčních systémech.

Návrh metody vychází z detailní fyzikální analýzy definovaného zobrazovacího systému, jehož stěžejními částmi jsou telecentrická optická soustava, zdroj vysoce telecentrického osvětlení a CCD kamera. Výsledkem provedené fyzikální analýzy z pohledu geometrické a Fourierovské optiky je komplexní fyzikální model zobrazení hrany předmětu zájmu, spolu s definicí způsobu určení skutečné pozice obrysu předmětu v rámci modelu. Model je podrobně prozkoumán a diskutován z hlediska vlivu jednotlivých parametrů na přesnost určení pozice obrysu předmětu. Následně je z něj odvozena modelující funkce přechodové hrany v podobě vhodné pro definici metody optimalizované aproximace reálných přechodových hran. Navržená metoda fyzikálního modelování přechodové hrany a určení subpixelové pozice obrysu předmětu je nejprve ověřena se syntetickými daty a implementována do měřicího systému Tester2D. Metodou dosahovaná přesnost měření geometrických rozměrů z reálně snímaných obrazů je ověřena formou měření etalonů délky. Měřicí systém Tester2D byl úspěšně akreditován pro měření rozměrů v rozsahu $40\,\mu\text{m} - 20\,\text{mm}$ s přesností až $0{,}1\,\mu\text{m}$, což je doloženo protokolem o akreditaci v příloze disertační práce, spolu s dokladem o dosažených výsledcích měřicího systému v rámci uskutečněného mezilaboratorního srovnávání.

Klíčová slova

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

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 is 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 $40\,\mu m - 20\,mm$ with accuracy up to $0{,}1\,\mu m$. 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.

Keywords

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

Prohlášení o původnosti práce

Prohlašuji, že jsem svoji dizertační práci na téma Metoda fyzikálního modelování přechodových hran v obraze pro určení skutečné pozice obrysu předmětu vypracoval samostatně pod vedením svého školitele s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v rámci práce a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené dizertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nepovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení §11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení §152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne ……. …….

Bibliografická citace

KOHOUTEK, M. *Metoda fyzikálního modelování přechodových hran v obraze pro určení skutečné pozice obrysu předmětu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 130 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Vladislav Škorpil, CSc.

Seznam použitých zkratek a symbolů

CCD	**Charge - Coupled Device**
ČIA	**Český institul pro akreditaci**
ČMI	**Český metrologický institut**
MPO ČR	**Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky**
VUSH a. s.	**Výzkumný ustav stavebních hmot, Brno**
AKL- Síta	**Akreditovaná laboratoř pro měření podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005, Brno**
$\mathcal{C}(x),\ \mathcal{S}(x)$	**Fresnelovy integrály argumentu *x***
$*$	**operátor konvoluce**
A	**průměr telecentrické aperturní clony**
$\mathbf{C_T}$	**telecentrická clona**
M	**příčné zvětšení optické soustavy**
d, d_P	**předmětová vzdálenost**
d', d_O	**obrazová vzdálenost**
f	**ohnisková vzdálenost**
F	**ohnisko v předmětovém prostoru**
F´	**ohnisko v obrazovém prostoru**
sin, cos, tg	**goniometrické funkce**
Σ_P	**předmětová rovina**
Σ_S	**snímací rovina**
Θ_{MAX}	**vrcholový úhel paprskového kužele schopného průchodu telecentrickou clonou**
P	**bod v předmětovém prostoru**
P´	**obraz bodu P v obrazovém prostoru**
h	**velikost předmětu**
h´	**velikost obrazu předmětu**
Θ_S	**vrcholový úhel paprskového kužele vytvářeného kolimátorem**
γ	**úhel**
C	**průměr rozptylového kroužku**
H_{PP}	**hloubka předmětového pole**
S	**velikost reálného bodového zdroje**
$h(x, y, z)$	**prostorová impulsní charakteristika prostředí délky *z***
$\psi(x, y, z)$	**prostorová funkce optického pole**
$I(x, y, z)$	**prostorová funkce intenzity optického pole**
$t(x, y)$	**rovinná funkce optické propustnosti**
ξ, η	**obecné integrační proměnné**
λ_c	**vlnová délka světla**
k_0	**vlnové číslo**
c	**rychlost světla**
f_c	**kmitočet světla**
X, Y	**rozměry předmětu zájmu**

$d_{X+}, d_{X-}, d_{Y+}, d_{Y-}$	**substituční proměnné argumentů Fresnelových funkcí ve fyzikálních modelech zobrazovací soustavy**
j	**komplexní jednotka**
$I_{EdgePoint}(x)$	**intenzita optického pole na ose *x* odpovídající pozici obrysu předmětu v jeho obraze**
I_{STAB}	**průměrná ustálená hodnota intenzity optického pole v propustné části předmětu zájmu**
$I_m(x)$	**fyzikální model přechodové hrany**
$I_{M_edge}(x)$	**polynomiální modelující funkce přechodové hrany**
κ, λ	**optimalizační parametry modelující funkce**
L	**úroveň jasu pixelu v obraze**
σ	**souborová směrodatná odchylka**

Obsah:

1 ÚVOD 12

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY 15

2.1 Soudobé konstrukční přístupy v oblasti přesných metrologických aplikací pro měření geometrických rozměrů – 2D profilometrie 15

2.2 Metody subpixelové detekce hrany v obraze 17

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE 22

4 KONCEPCE A KOMPLEXNÍ FYZIKÁLNÍ ANALÝZA POUŽITÉHO ZOBRAZOVACÍHO SYTÉMU 24

4.1 Telecentrické zobrazení v předmětovém prostoru s telecentrickým chodem světelných paprsků – z pohledu geometrické optiky 25

4.1.1 Zhodnocení dopadů použití kombinace telecentrického osvětlení a telecentrické optické soustavy v předmětovém prostou 31

4.1.2 Princip zdroje telecentrických paprsků s jednoduchým kolimátorem 31

4.2 Odvození fyzikálního modelu zobrazení předmětu zájmu na základě zákonů Fourierovské optiky 33

4.2.1 Analýza zobrazovací soustavy dle pravidel Fourierovské optiky 35

4.3 Odvození vztahu pro určení skutečné pozice obrysu předmětu v rámci modelu zobrazení . 47

4.3.1 Teoretický vliv různé úrovně rozostření optické soustavy na určení pozice obrysu předmětu zájmu 51

4.3.2 Stanovení dostupné hloubky předmětového pole pro model zobrazení 54

4.3.3 Posouzení vlivu příčného zvětšení na odezvu fyzikálního modelu zobrazení 57

4.4 Odvození fyzikálního modelu přechodové hrany v obraze 59

5 NÁVRH METODY APROXIMACE PŘECHODOVÉ HRANY V OBRAZE ODVOZENÝM FYZIKÁLNÍM MODELEM 64

5.1 Modelování přechodové hrany pomocí polynomiální aproximace Fresnelových integrálů .. 64

5.2 Vliv vzorkování obrazu přechodové hrany CCD snímačem 67

5.2.1 Teoretický vliv vzorkování fyzikálního modelu 67

5.2.2 Průběh jasu přechodové hrany z obrazu získaného reálným telecentrickým optickým systémem s CCD kamerou 68

5.3 Metoda optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů přechodové hrany modelující funkcí 70

5.3.1 Souhrn doporučení pro realizaci metody optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů přechodové hrany modelující funkcí 71

6 INTERAKTIVNÍ SYSTÉM TESTER2D - OVĚŘENÍ METODY MODELOVÁNÍ PŘECHODOVÉ HRANY A URČENÍ POZICE OBRYSU PŘEDMĚTU S REÁLNÝMI OBRAZOVÝMI DATY 74

6.1 Ověření přesnosti navržené metody modelování a detekce skutečné pozice obrysu předmětu na reálných obrazových datech 76

6.1.1 Výsledky měření drátkového etalonu délky navrženou metodou detekce skutečné pozice obrysu předmětu na základě modelování přechodové hrany 79

6.1.2 Vyhodnocení a diskuze výsledků měření drátkových etalonů 86

7 ZÁVĚR 88

8 LITERATURA 91

Seznam použité literatury 91

Vlastní publikace 93

Příloha 1 – Osvědčení o akreditaci ČIA měřicího systému Tester2D 95

Příloha 2 – Osvědčení a zpráva o dvoustranném mezilaboratorním porovnávání systému Tester2D, realizovaném pod záštitou ČMI 99

Příloha 3 – Kalibrační list drátkových etalonů 107

Příloha 4 – Výpočet nejistot měření pro Tester2D 110

CURRICULUM VITAE 128

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 zpracovaní 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.

Prvotním podnětem pro vznik tématu disertační práce se stalo řešení grantového projektu MPO ČR „Výzkum nových metod zpracování obrazu pro přesná měření rozměrů ve stavebnictví a jejich ověření na prototypu 2D testeru“ zahájeného v roce 2002. V rámci projektu byla navržena koncepce měřicího systému pro přesné měření geometrických rozměrů ok sít používaných v průmyslu. Autor předkládané disertační práce se stal součástí řešitelského kolektivu v průběhu druhého roku řešení projektu a podílel se na komplexním programovém vybavení měřicího systému. Výstupem řešení projektu se stal v roce 2005 prototyp měřicího systému pro automatické měření rozměrů ok v průmyslových sítech, dle příslušných norem ČSN ISO [23], [24], [25]. Při nasazení měřicího sytému do průmyslových podmínek se ukázalo, že stěžejní měřicí metoda, byť založená na nových, ovšem obecných přístupech subpixelové detekce pozice hran objektů v obraze nedosahuje požadované přesnosti. Prototyp měřicího systému tedy nebylo možné podstoupit akreditačnímu procesu a následnému průmyslovému nasazení. Na základě uvedených zjištění vznikl požadavek na vypsání tématu této disertační práce, s cílem vytvořit teoreticky fyzikálně podloženou měřicí metodu, schopnou s daným zařízením dosáhnout požadované přesnosti a tedy zisku akreditace a následného průmyslového nasazení prototypu měřicího systému.

Další výzkum v uvedené oblasti již neprobíhal v rámci řešitelského kolektivu, ale byl samostatným vědeckým bádáním autora disertační práce. V průběhu výzkumu se ukázalo, že příčina nevhodnosti použití obecných subpixelových metod detekce hran v obraze tkví v absenci přímé souvislosti použité měřicí metody subpixelové detekce hrany s fyzikální podstatou získávání obrazu konkrétním zobrazovacím systémem.

Stručně je tento nesoulad prezentován v následující kapitole disertační práce. Z uvedeného důvodu bylo nutné provést detailní fyzikální analýzu použitého zobrazovacího systému a na podkladě získaných výsledků navrhnout měřicí metodu schopnou reálného nasazení v měřicím systému. Dále pak navrženou metodu implementovat, ověřit její přesnost a podstoupit s měřicím systémem akreditační řízení opravňující jeho reálné průmyslové nasazení.

Z hlediska struktury textu je disertační práce členěna do logicky navazujících kapitol. Úvodní část (kapitola 2) se věnuje přehledu současného stavu problematiky. Je v ní představeno srovnání aktuálnosti náplně disertační práce se současnými trendy v oblasti optických měření rozměrů, jak z pohledu konstrukce měřicího systému, tak i z pohledu používaných metod zpracování obrazů a detekce hran (obrysu) předmětu. V kapitole 3 jsou detailně specifikovány cíle disertační práce.

Kapitola 4 je věnována komplexní fyzikální analýze použitého zobrazovacího systému. V úvodu je upřesněna a definována koncepce zobrazovacího systému. Následně je provedena nezbytná analýza jeho jednotlivých částí z pohledu geometrické optiky. V další části je prezentováno odvození fyzikálního modelu zobrazení předmětu zájmu na základě zákonů *Fourierovské optiky* a z něj vycházející odvození fyzikálního modelu přechodové hrany předmětu zájmu ve snímací rovině. Dále je odvozen vztah pro určení přesné pozice obrysu předmětu v rámci fyzikálního modelu přechodové hrany. Na konci kapitoly je provedena diskuse možných negativních vlivů jednotlivých parametrů modelu na přesnost určení pozice obrysu předmětu.

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 sytému provedená podle interního předpisu pracovníkem akreditované

laboratoře a výsledky mezilaboratorního porovnávání měřicího systému pod záštitou ČMI (*Český metrologický institut).*

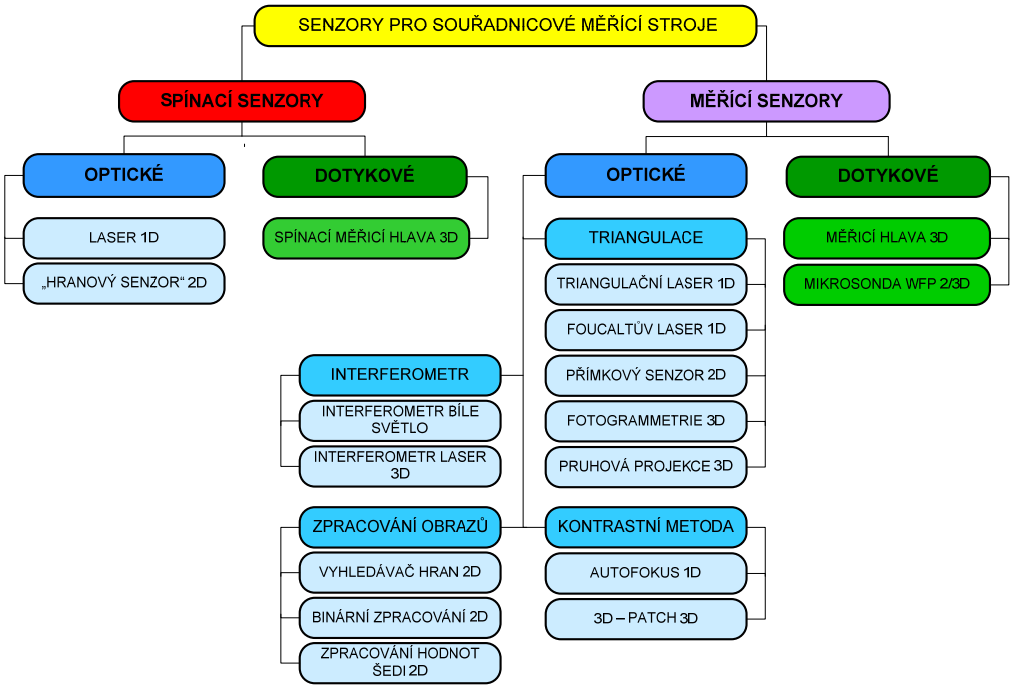
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY

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 bude větší pozornost 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 oblastní pro uvedené technologie přišlo i výrazné snížení jejich cenové náročnosti a tím došlo k další akceleraci jejich použití.

Před 10 lety bylo v dané oblasti dominantní nasazení měřicích systémů založených na dotykových mechanických senzorech. Nejmodernější systémy té doby fungovaly na principu detekce přerušování laserového paprsku obrysy měřeného předmětu, který se pohyboval přesně definovanou rychlostí vůči paprsku laseru. Tyto 1D laserové systémy byly velmi náročné na údržbu a vyžadovaly použití precizních mechanických částí zaručujících vysoce stabilní a přesně definovanou rychlost pohybu. Přesnost metody byla v dominantní míře odvozena od přesnosti těchto mechanických částí, které v průběhu doby podléhaly opotřebení. Měřicí systémy pracující na uvedeném principu jsou v průmyslu stále používány a nabízeny nové, ovšem v poměru k četnosti nasazení nových typů systémů se již jedná o ustupující technologii. Oproti této úzké nabídce typů měřicích systémů z doby před 10 lety (mechanické, laserové) je současná nabídka měřicích systémů výrazně širší. Lze ji dokladovat například aktuální nabídkou německé firmy Werth Messtechnik GmbH, která je celosvětovým lídrem v oblasti multisenzorových měřicích a inspekčních systémů. V publikaci věnované problematice soudobých měřicích a inspekčních systémů [16] vydané ve spolupráci autorů knihy s uvedenou firmou je mimo jiné uveden obecný přehled soudobých



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

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]).

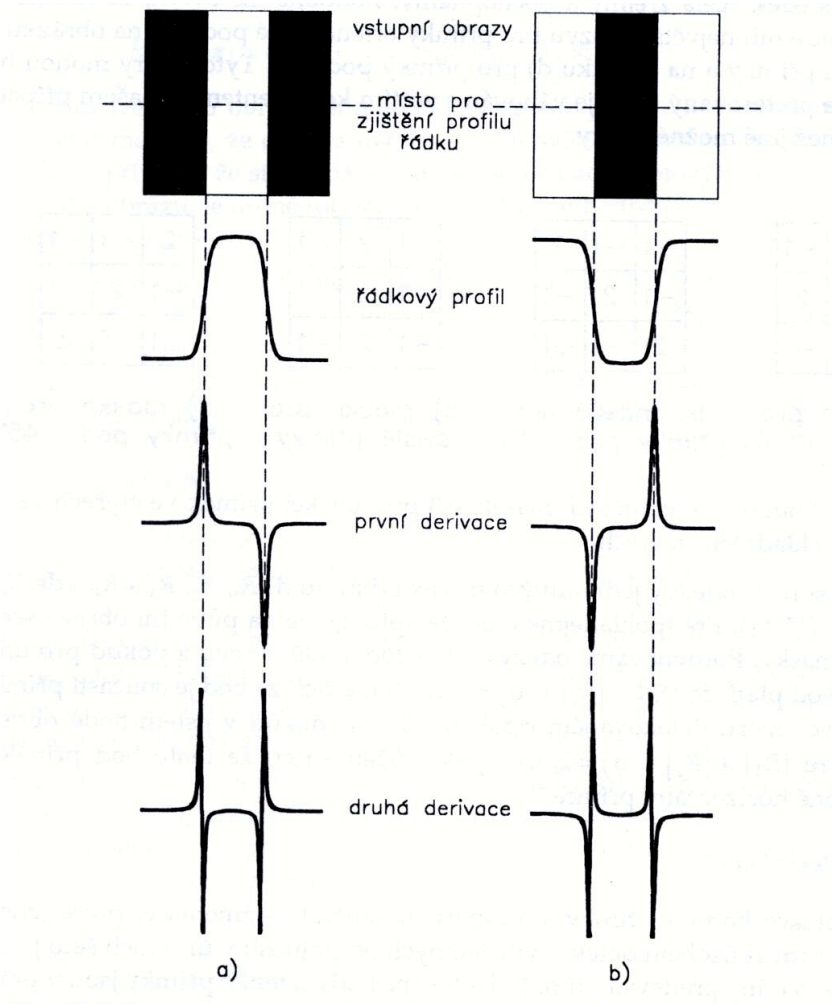
2.2 Metody subpixelové detekce hrany v obraze

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.*

Princip detekce hran podle prvních dvou bodů je zřejmý z obr. 2.2[1]. 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[2]. 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

[1] Obrázek byl převzat z diplomové práce autora této disertační práce.
[2] Výsledek rozčlení jednotlivých ok síta v měřeném obraze je patrný z obr. 6.3, kde jsou takto rozčleněná oka dále zpracovávána samostatně.



Obr. 2.2 Princip detekce hrany pomocí operátorů první a druhé derivace obrazové funkce

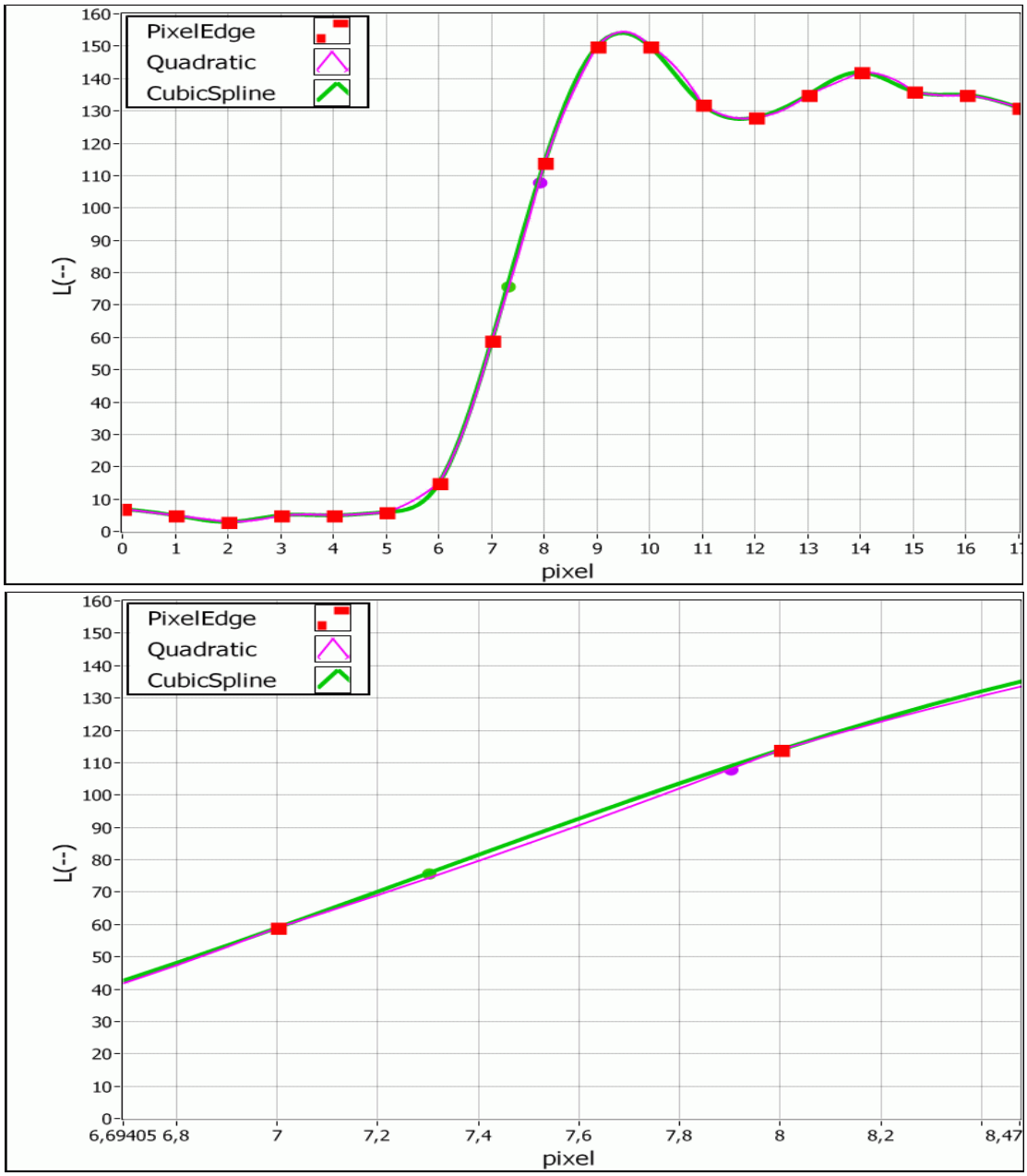
v obraze budou mít zcela jiné parametry a průběhy a to včetně přesné pozice obrysu předmětu v rámci odpovídajícího jasového přechodu hrany.

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 uvedené 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. 2.3. Na obrázku je reálná přechodová hrana



Obr. 2.3 Odezvy standardních subpixelových metod, které jsou součástí knihoven programovacího jazyka LabView [17] - a) kvadratická interpolace, b) kubická „spline“ interpolace

(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.

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.

Publikace zaměřené tak, jako tato disertační práce na návrh metody fyzikálního modelu přechodové hrany v obraze pro určení skutečné (subpixelové) pozice obrysu předmětu nebyly v průběhu studia současného stavu problematiky nalezeny. Lze však předpokládat, že minimálně u průmyslových lídrů, uvedených v předchozí kapitole, probíhá v dané oblasti neustálý intenzivní výzkum, jehož výsledky nejsou z konkurenčních důvodů podrobně publikovány.

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 DISERTAČNÍ PRÁCE

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, určeném pro přesná měření průmyslových sít dle příslušných norem [23], [24], [25] a požadavků ČIA a ČMI.

Jak bylo ukázáno v předchozí kapitole, subpixelová detekce pozice hrany spočívá ve dvou stěžejních krocích: 1. použití vhodné modelující funkce hrany, 2. určení subpixelové pozice obrysu v modelující funkci. Pro nalezení definice vhodné modelující funkce, respektující fyzikální realitu vytváření obrazu definovaným zobrazovacím systémem, je nutné provést komplexní fyzikální analýzu zobrazovací soustavy z hlediska zákonů geometrické a *Fourierovské (vlnové) optiky*. Výstup analýzy je třeba formovat do podoby fyzikálního parametrického modelu popisujícího tvar skokové přechodové hrany po jejím zobrazení definovanou zobrazovací soustavou. Detailní analýzou tohoto modelu je třeba definovat způsob určení přesné pozice obrysového bodu v rámci vytvořeného fyzikálního parametrického modelu. Dále je nutné provést vyšetření stability způsobu určení přesné pozice obrysového bodu při změně fyzikálních parametrů modelu, například z hlediska možného vlivu různé úrovně rozostření optické soustavy. Pro umožnění snadné aplikovatelnosti fyzikálního modelu v metodách zpracování obrazů je nutné upravit definici modelu do podoby modelující funkce vhodné pro implementaci. Jako nejlepší se z tohoto pohledu jeví docílení polynomiálního vyjádření modelující funkce.

Vytvořený fyzikální model je dále třeba analyzovat z hlediska dopadu prostorového vzorkování způsobeného snímáním obrazu CCD snímačem kamery. Je třeba provést diskuzi dopadů možných nežádoucích náhodných vlivů působících při vytváření obrazu reálným zobrazovacím systémem s reálnou CCD kamerou (např. tepelný šum aj.). Cílem těchto analýz je návrhnout metodu optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů přechodové hrany modelující funkcí. Návrh metody musí být implementačně nezávislý.

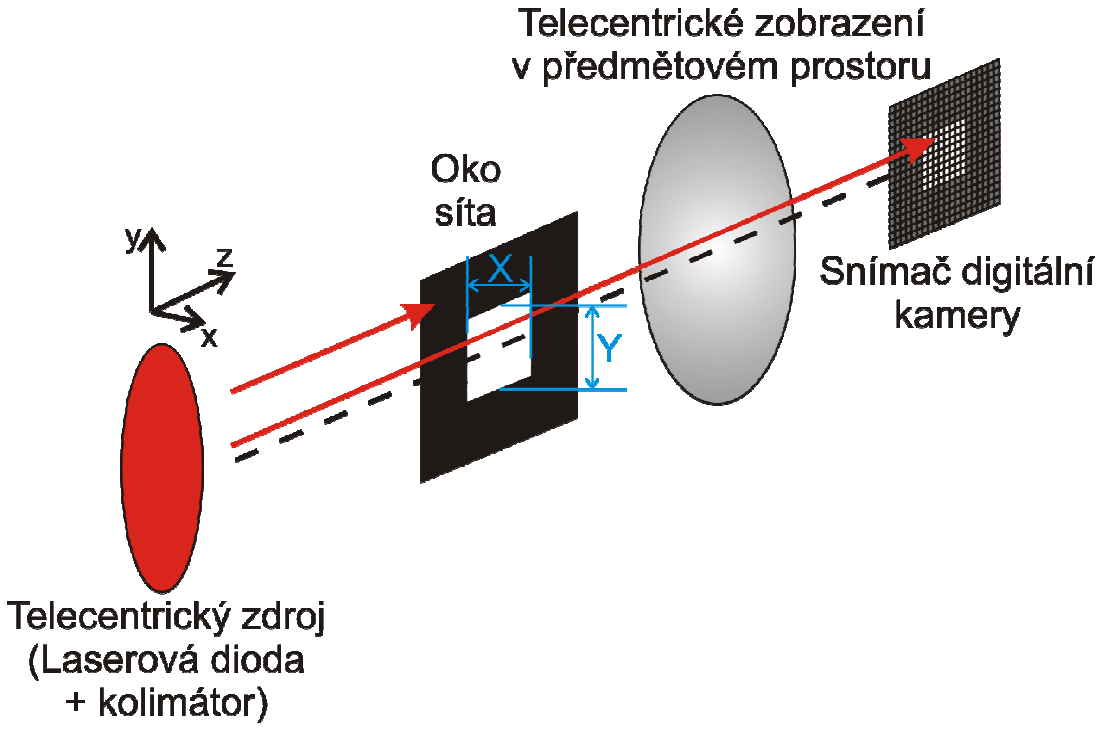
Metoda optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů modelující funkcí má být implementována v programovacím jazyce LabView a její přesnost nejprve ověřena pomocí syntetických vstupních dat. Přesnost metody v reálných měřeních má

být ověřena její implementací do měřicího systému Tester2D a následným reálným měřením etalonů délky.

Jedním z praktických cílů práce je docílit akreditace měřicího systému Tester2D a jeho nasazení v průmyslu právě díky aplikaci výsledků výzkumu prezentovaných v disertační práci a nové originální metodě subpixelové detekce obrysu předmětu v obraze.

4 KONCEPCE A KOMPLEXNÍ FYZIKÁLNÍ ANALÝZA POUŽITÉHO ZOBRAZOVACÍHO SYTÉMU

V rámci této kapitoly je představena základní koncepce zobrazovacího systému použitého v prototypu měřicího systému Tester2D. Následná fyzikální analýza jednotlivých částí zobrazovací soustavy povede k odvození fyzikálního modelu zobrazení předmětu zájmu v místě snímače digitální kamery. Z fyzikálního modelu zobrazení předmětu bude 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 povede k vyšetření stability

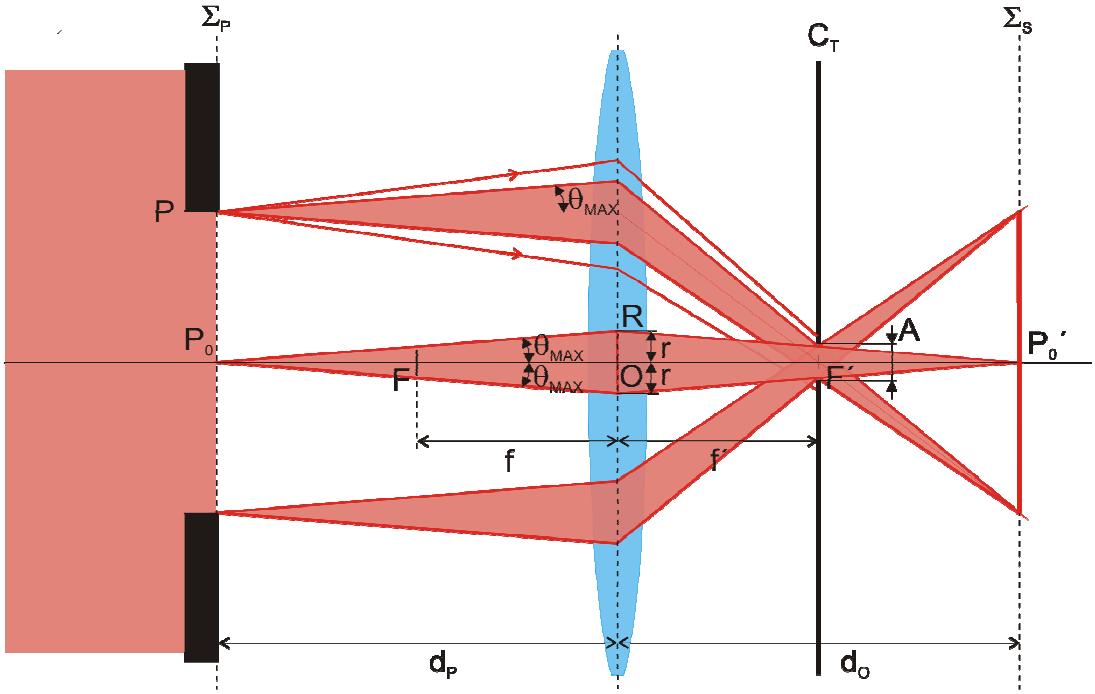


Obr. 4.1 Koncepce měřicího systému

způsobu určení přesné pozice hrany v závislosti na změně parametrů zobrazovací soustavy. Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, měřicí systém byl koncepčně navržen pro měření průmyslových a potravinářských sít. Z tohoto cíleného zaměření vychází tedy i definice předmětu prvotního zájmu a cílené zaměření fyzikálních analýz na konkrétní typy komponent použitých v měřicím systému. Z obr. 4.1 je patrné, že bylo použito zadní telecentrické osvětlení předmětu. 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 budou představeny stěžejní vlastnosti telecentrického zobrazení v předmětovém prostoru a následně rozšířeny o specifika daná použitím zadního telecentrického osvětlení. Takto vzniklá telecentrická optická soustava (telecentrické zobrazení v předmětovém prostoru + zadní telecentrické osvětlení) bude posuzována zejména z hlediska jejích vlastností pro použití v přesných metrologických aplikacích. Schématicky je základní princip *telecentrického zobrazení v předmětovém prostoru*[3] znázorněn na obr. 4.2. Na obrázku je patrné umístění tzv. *telecentrické clony*



Obr. 4.2 Telecentrické zobrazení v předmětovém prostoru

s průměrem *A* do obrazového ohniska F´. Z obrázku je dále patrné, že obraz ve snímací rovině Σ_S je tvořen pouze paprsky rovnoběžnými s optickou osou, případně paprsky svírajícími s optickou osou úhel menší než $\pm \theta_{MAX}$. Velikost tohoto úhlu přímo souvisí s průměrem *A* telecentrické aperturní clony. Je zřejmé, že v případě, kdy by se průměr telecentrické aperturní clony limitně blížil k nule ($A \rightarrow 0$), podílely by se na tvorbě obrazu pouze paprsky rovnoběžné s optickou osou. To by mělo za následek konstantní velikost předmětu a ostré zobrazení, obé nezávislé na poloze v předmětovém prostoru.

[3] V rámci celé práce je předpokládáno umístění telecentrické clony v obrazovém ohnisku souměrně kolem optické osy tak, jak je tomu u v praktické části použité optické soustavy. V některých odborných textech se lze setkat i s obecnějším umístěním clony v libovolné pozici ohniskové roviny.

Matematický vztah mezi A a θ_{MAX} lze na základě obr. 4.2 odvodit následujícím způsobem. Na obrázku je zachycen stav, pro který platí

$$f = f´; \quad d_P = d_O . \tag{4-1}$$

Jedná se o stav vyhovující níže uvedené *Gaussově zobrazovací rovnici* [1], [6] (4-6), podle které pro tuto situaci vyplývá

$$d_P = d_S = 2f . \tag{4-2}$$

Na základě vztahů definujících goniometrické funkce lze dále psát

$$\begin{aligned} tg\theta_{MAX} &= \frac{r}{d_p} \\ r &= d_F tg\theta_{MAX} \end{aligned} \tag{4-3}$$

a z podobnosti trojúhelníků $P_0´OR$, $P_0´F´R´$ je možné odvodit rovnici

$$\frac{r}{d_O} = \frac{A/2}{d_O - f´}. \tag{4-4}$$

Dosazením (4-3) do (4-4) při respektování (4-1), (4-2) je získán vztah

$$\theta_{MAX} = arctg\frac{A/2}{f}, \tag{4-5}$$

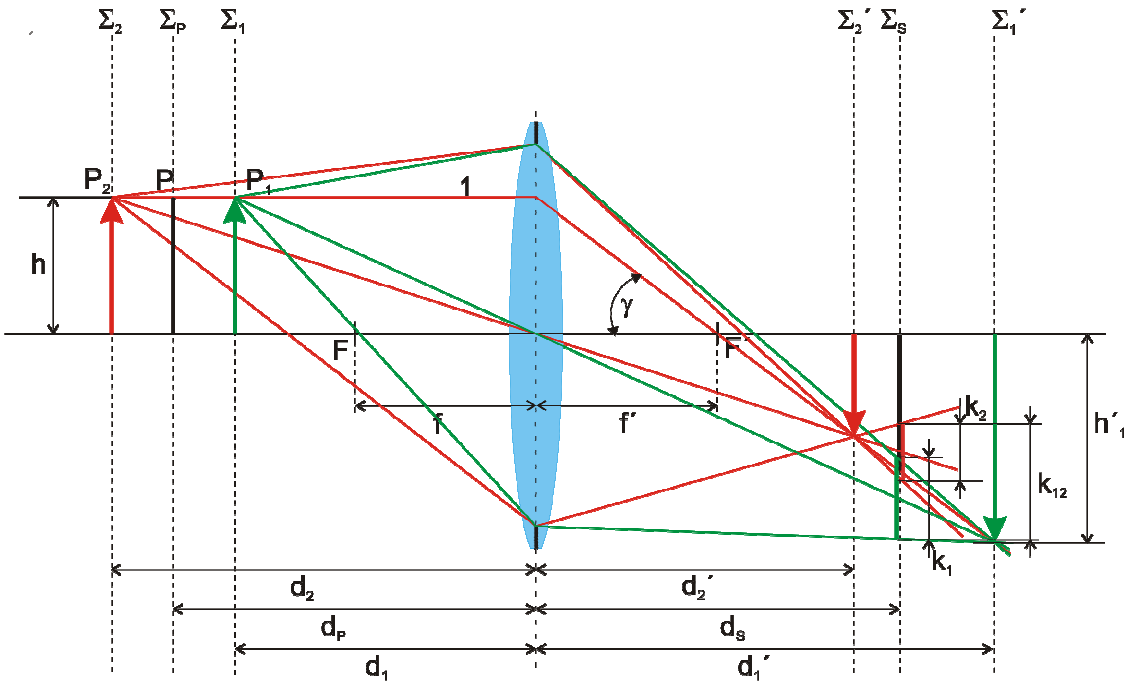
popisující kýženou závislost A a θ_{MAX}.

Při geometrické analýze zobrazování tenkou čočkou vycházíme ze základních zákonů geometrické optiky a znalosti vzájemných souvislostí mezi *hlavními body* a *hlavními paprsky* [1]. V obr. 4.2 představuje Σ_P *předmětovou rovinu*, v níž je umístěn zobrazovaný předmět. Rovina Σ_S je *snímací* nebo též *obrazová rovina*, v níž je umístěn čip kamery. Předmět umístěný v *předmětové rovině* je zobrazen do *snímací roviny* ostře, platí-li *Gaussova zobrazovací rovnice* (*lens formula* [6]):

$$\frac{1}{d_P} + \frac{1}{d_O} = \frac{1}{f}, \tag{4-6}$$

kde f je ohnisková vzdálenost tenké čočky, d_O je *obrazová vzdálenost* (v textu též nazývána jako *snímací vzdálenost* d_S) od osy čočky v obrazovém prostoru, odpovídající ostrému zobrazení předmětu umístěnému ve vzdálenosti d_P v předmětovém prostoru (viz obr. 4.2). Pod pojmem „*zobrazen ostře*“ rozumíme stav, kdy jednomu bodu v předmětovém prostoru odpovídá právě jeden bod v obrazovém prostoru. Mimo tuto ideální pozici je bod z předmětového prostoru rozprostřen do kruhové stopy (*rozptylového kroužku*) v obrazové rovině. V případě telecentrické optické soustavy v předmětovém prostoru má však vzniklá kruhová stopa některé pro přesné měření rozměrů výhodné vlastnosti. S ohledem na názornost je vhodné nejprve ukázat, jak se

vliv změny předmětové vzdálenosti d_P projeví na zobrazení předmětu *perspektivním zobrazením*, zůstane-li vzdálenost *snímací roviny* d_S nezměněna. Tuto situaci ilustruje obr. 4.3. V předmětovém prostoru jsou umístěny body P_1, P_2 souměrně vzdálené kolem bodu P. Pomocí hlavních paprsků je zobrazen ostrý obraz předmětu P_1



Obr. 4.3 Vliv změny předmětové vzdálenosti při perspektivním zobrazení

v rovině Σ_1', jejíž pozice d_1' odpovídá rovnici (4-6). Ostrý obraz bodu P_2 je pomocí hlavních paprsků zobrazen v rovině Σ_2', jejíž pozice také odpovídá *Gaussově zobrazovací rovnici* (4-6). Rovina Σ_S představuje rovinu umístění snímače (čipu kamery) a dle (4-6) jsou v ní ostře zobrazeny body z roviny Σ_P. Bod P_1 je ve *snímací rovině* zobrazen jako kruhová stopa průměru k_1. Bod P_2 je ve *snímací rovině* zobrazen jako kruhová stopa průměru k_2. Důležité je také poznamenat, že hlavní paprsek rovnoběžný v předmětovém prostoru s optickou osou a po průchodu čočkou procházející obrazovým ohniskem F´ neprochází středem ani jednoho z rozptylových kroužků k_1, k_2. Obr. 4.3 lze využít k odvození vztahu pro *příčné zvětšení M* platného i v případě telecentrické optické soustavy. Na základě podobnosti trojúhelníků lze pro úhel γ psát

$$tg\gamma = \frac{h}{f'} = \frac{h_1'}{d_1' - f'}. \qquad (4\text{-}7)$$

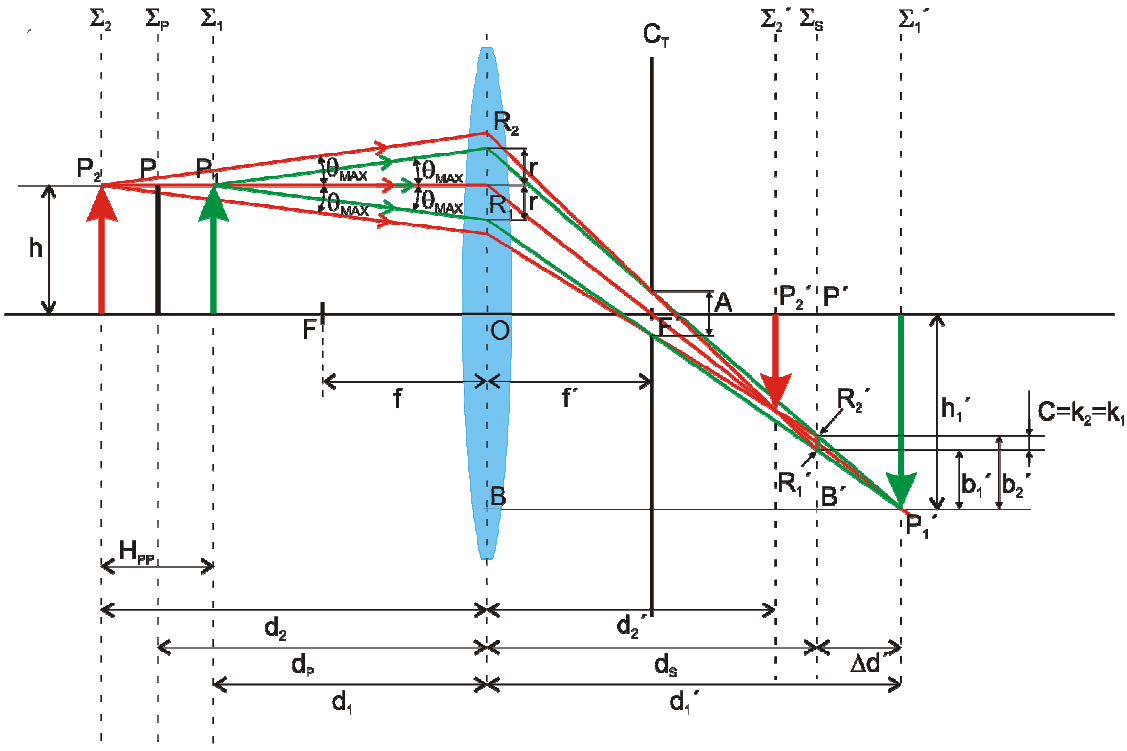
Přičemž příčné zvětšení je definováno jako

$$M = \frac{h'}{h}. \tag{4-8}$$

Ze vztahu (4-7) lze při respektování $f = f'$ pro *příčné zvětšení* M dle obr. 4.3 odvodit

$$M = \frac{h'}{h} = \frac{d_1' - f}{f}. \tag{4-9}$$

Nyní následuje obdobná analýza vlivu předmětové vzdálenosti pro telecentrické zobrazení v předmětovém prostoru. Na obr. 4.4 je zobrazen geometrický model telecentrického zobrazení v předmětovém prostoru pro případ změny předmětové vzdálenosti. Z obrázku je patrné, že v případě telecentrického zobrazení v předmětovém prostoru zanechají kolem bodu P souměrně vzdálené body P_1 a P_2 ve snímací rovině Σ_S stejně velký rozptylový kroužek průměru $C=k_1=k_2$, souměrný kolem hlavního (telecentrického) paprsku rovnoběžného s optickou osou v předmětové rovině a procházejícího obrazovým ohniskem F´. Tato skutečnost je zásadním rozdílem oproti perspektivnímu zobrazování a též zásadní výhodou telecentrického zobrazení v předmětovém prostoru z hlediska metrologických aplikací.



Obr. 4.4 Vliv změny předmětové vzdálenosti při telecentrickém zobrazení v předmětovém prostoru

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

- *telecentrické zobrazení v předmětovém prostoru vytváří ve snímací rovině* Σ_S *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 této definice 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 clony A*. Jejím vlivem se na tvorbě výsledného obrazu ve snímací rovině podílejí i paprsky, které nejsou v předmětové rovině rovnoběžné s optickou osou. Nyní bude provedena analýza zobrazovací soustavy za účelem nalezení vztahu popisujícího *průměr rozptylových kroužků C* odpovídajících *hloubce předmětového pole* H_{PP}. Z obr. 4.4 je zřejmá následující možnost určení *C* a H_{PP} jako

$$C = b_2' - b_1', \tag{4-10}$$

$$H_{PP} = d_2 - d_1. \tag{4-11}$$

Nejprve vyjádříme velikosti b_1' *a* b_2' pomocí parametrů soustavy. Z podobnosti trojúhelníků $P_1'BR_2$ a $P_1'B'R_2'$ lze psát

$$\frac{h'+h+r}{d_1'} = \frac{b_2'}{\Delta d'}. \tag{4-12}$$

Obdobně z podobnosti trojúhelníků $P_1'BR_1$ a $P_1'B'R_1'$ vyplývá

$$\frac{h'+h-r}{d_1'} = \frac{b_1'}{\Delta d'}. \tag{4-13}$$

Pro velikost *r* platí

$$r = d_1 \operatorname{tg}\theta_{MAX}. \tag{4-14}$$

Dosazením (4-14) do (4-12), (4-13) a následnou úpravou je získáno

$$\begin{aligned} b_1' &= \frac{\Delta d'}{d_1'}\left(h'+h-\operatorname{tg}\theta_{MAX}\right) \\ b_2' &= \frac{\Delta d'}{d_1'}\left(h'+h+\operatorname{tg}\theta_{MAX}\right) \end{aligned}. \tag{4-15}$$

Na základě (4-15) je po dosazení do (4-10) odvozeno

$$C = 2\frac{\Delta d' d_1}{d_1'}\operatorname{tg}\theta_{MAX}\,. \tag{4-16}$$

Pro $\Delta d'$ lze psát

$$\Delta d' = d_1' - d_S\,. \tag{4-17}$$

Z platnosti *Gaussovy zobrazovací rovnice* (4-6) lze vyjádřit

$$\begin{aligned} d_S &= \frac{f d_P}{d_P - f} \\ d_1' &= \frac{f d_1}{d_1 - f} \end{aligned}\,. \tag{4-18}$$

Aplikací vztahů (4-17), (4-18) do vztahu (4-16) se získá

$$C = 2\frac{f\left(d_P - d_1\right)}{d_P - f}\operatorname{tg}\theta_{MAX}\,. \tag{4-19}$$

Obdobným způsobem odvození lze dosáhnout také následujícího vztahu pro velikost rozptylového kroužku vzniklého zobrazením bodu P_2 ve snímací rovině Σ_S

$$C = 2\frac{f\left(d_2 - d_P\right)}{d_P - f}\operatorname{tg}\theta_{MAX}\,. \tag{4-20}$$

Ze vztahů (4-19), (4-20) je možné vyjádřit d_1, respektive d_2 jako

$$\begin{aligned} d_1 &= d_P - \frac{C\left(d_P - f\right)}{2 f \operatorname{tg}\theta_{MAX}} \\ d_2 &= \frac{C\left(d_P - f\right)}{2 f \operatorname{tg}\theta_{MAX}} + d_P \end{aligned}\,. \tag{4-21}$$

Dosazením (4-21) do (4-11) je získán vztah

$$H_{PP} = \frac{C\left(d_P - f\right)}{f \operatorname{tg}\theta_{MAX}}\,. \tag{4-22}$$

Tento vztah popisuje, jakým způsobem souvisí hloubka předmětového pole s šířkou osvětlujícího paprsku. Ze vztahu (4-22) i obr. 4.4 je zřejmé, že s klesajícím úhlem osvětlujícího kuželu bude růst hloubka předmětového pole H_{PP}. Dosazením podle (4-5) do (4-22) lze odvodit vztah

$$H_{PP} = \frac{2C\left(d_P - f\right)}{A}\,, \tag{4-23}$$

popisující jakým způsobem souvisí hloubka předmětového pole s průměrem telecentrické aperturní clony. Ze vztahů (4-5), (4-22) a (4-23) je zřejmé, že pro

$$\theta_{MAX} \leq arctg \frac{A/2}{f} \tag{4-24}$$

již nebude mít průměr aperturní clony vliv na hloubku předmětového pole. Tímto způsobem se lze vyhnout případným nepříjemným vlivům telecentrické aperturní clony na přenos obrazu ve frekvenční oblasti. Tyto vlivy jsou podrobněji rozebírány např. v literatuře [1], [4], [5]. Při zmenšování průměru telecentrické clony k 0 (případně k vlnové délce použitého světla) by tato clona umístěná v obrazovém ohnisku plnila funkci prostorového filtru a omezovala spektrum obrazu [4]. Stala by se obrazovou dolní propustí, vlivem čehož by zkreslovala pro měření nejpodstatnější část, tedy přechodové hrany v obraze. Pro minimalizaci těchto vlivů je vhodné použít specifický zdroj osvětlení tvořený telecentrickými paprsky, v ideálním případě zcela rovnoběžnými s optickou osou soustavy. Ideálního zdroje telecentrického osvětlení s velkým průměrem paprskového svazku potřebným pro osvětlování předmětu zájmu je při rozumných nákladech obtížné dosáhnout. Z tohoto důvodu lze považovat za dostačující, produkuje-li zdroj telecentrického osvětlení paprsky v podobě kuželů s vrcholovým úhlem vyhovujícím podmínce (4-24).

4.1.1 Zhodnocení dopadů použití kombinace telecentrického osvětlení a telecentrické optické soustavy v předmětovém prostou

Současné použití telecentrického zdroje osvětlení a telecentrické soustavy v předmětovém prostoru přináší řadu výhod. Telecentrická soustava umožní odchycení paprsků vzniklých ohybovými jevy na hraně osvětleného předmětu a současně telecentrické osvětlení poskytne dostatek paprsků schopných průchodu telecentrickou aperturní clonou pro vytvoření dostatečně kontrastního obrazu v rovině snímače.

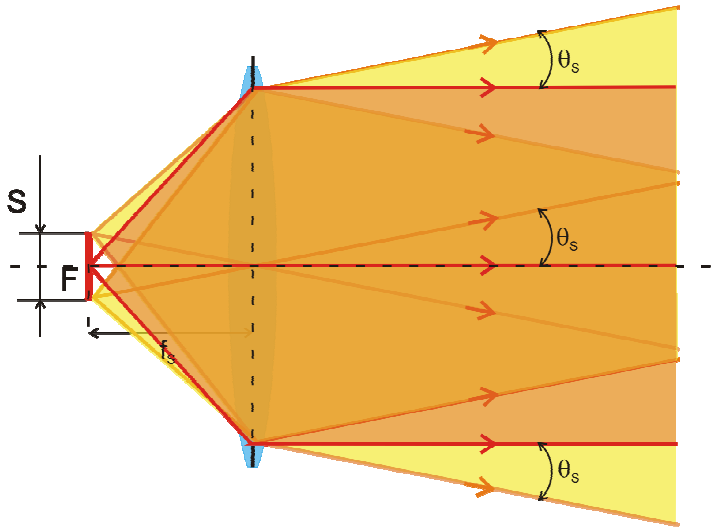
Pro tvorbu telecentrického osvětlení se v metrologických aplikacích používají tzv. kolimátory.

4.1.2 Princip zdroje telecentrických paprsků s jednoduchým kolimátorem

Kolimátorem je nazýváno zařízení produkující paprsky s nízkou rozbíhavostí od své optické osy [1]. V praxi se vyskytuje celá řada principů pro konstrukci kolimátorů [12], které se liší zejména účelem svého využití a emitovaným zářením. Z hlediska rozebírané problematiky je důležité při volbě kolimátoru brát ohled zejména na tyto parametry:

- dostatečná intenzita emitovaného osvětlení,

- rozbíhavost paprsků vyhovující podmínce (4-24),
- uniformita emitovaných rovinných vln.



Obr. 4.5 Princip jednoduchého kolimátoru s LED diodou a tenkou čočkou

Na obr. 4.5 je naznačen jeden ze základních způsobů tvorby telecentrických paprsků v podobě tenké čočky, v jejímž předmětovém ohnisku je umístěn bodový světelný zdroj. Na podkladě základních zákonů geometrické optiky a vlastností tenké čočky lze předpokládat, že v případě bodového zdroje by všechny paprsky v obrazovém prostoru byly rovnoběžné s optickou osou. V reálném případě však má bodový zdroj reálné rozměry, na obrázku označeny jako S, což vede ke vzniku světelných kuželů s nenulovým vrcholovým úhlem. Velikost úhlu lze na základě podobnosti trojúhelníků určit jako

$$\theta_S = arctg \frac{S/2}{f_S}. \tag{4-25}$$

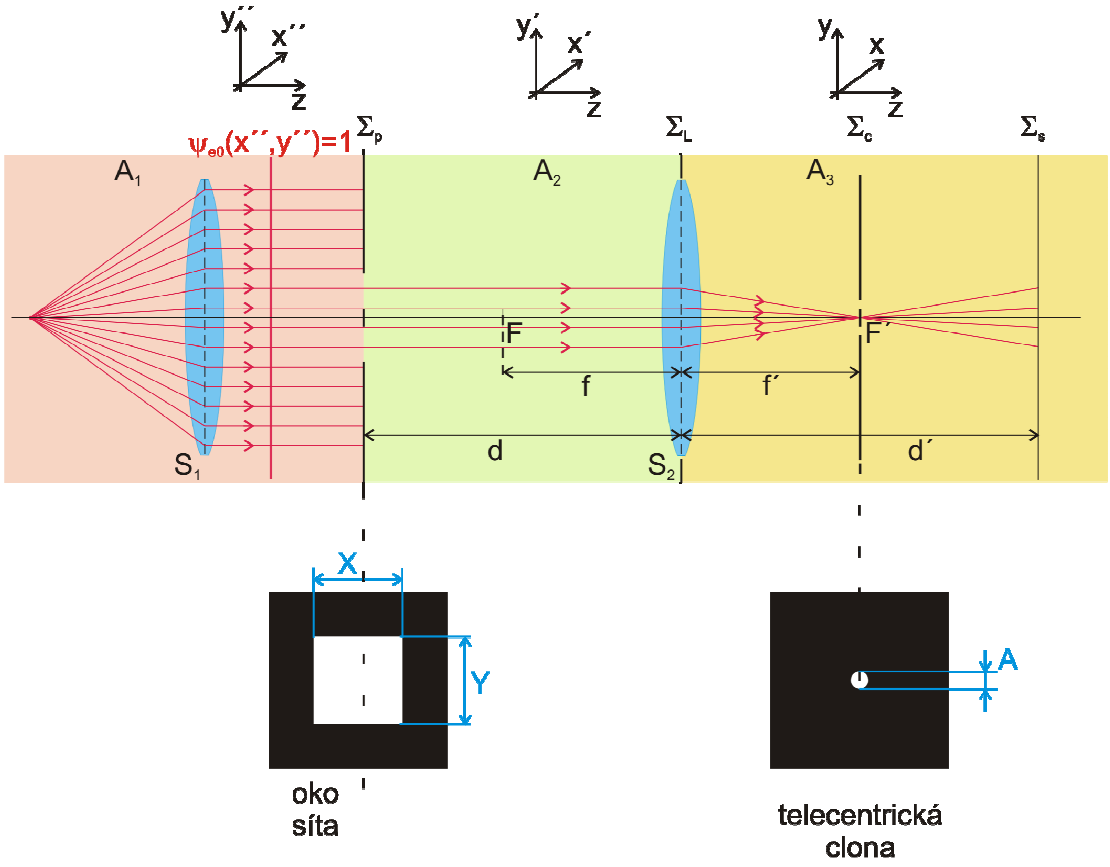
V případě, kdy bude θ_S definované dle (4-25) menší než θ_{MAX} dané vztahem (4-5), bude na základě (4-22) platit

$$H_{PP} = \frac{C(d_P - f)}{f \mathrm{tg}\,\theta_S} \tag{4-26}$$

a hloubka předmětového pole již tedy nebude závislá na velikosti *telecentrické aperturní clony A*. Ta bude dále sloužit jako prostředek pro zachycení netelecentrických paprsků vzniklých ohybovými jevy na telecentricky osvětlovaném měřeném předmětu.

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. Následující obrázek představuje základní model analyzovaného zobrazovacího systému. Přičemž popisy souřadných os v jednotlivých částech obrázku korespondují se symboly používanými v rámci vlastního odvození.



Obr. 4.6 Principiální detail zobrazovací soustavy měřicího systému

Pohled na optickou soustavu telecentrickou v předmětové rovině 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 svazku předmětem zájmu (okem síta) a telecentrickou optickou soustavou v předmětovém prostoru. Znalost fyzikálního modelu rozložení intenzity optického pole v obrazovém prostoru umožňuje odvodit fyzikální 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. 4.6, 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. Osa *z* je ve všech oblastech neměnná s počátkem v rovině Σ_L.

První oblast (viz obr. 4.6) nese označení A_1, je charakteristická růžovým podbarvením. Souřadný systém v této oblasti je *(x´´, y´´, z)*. Z fyzikálního hlediska se jedná o oblast tvorby osvětlení předmětu zájmu. Kolimátorem jsou zde vytvářeny paprsky telecentrického osvětlení předmětu zájmu. Jak bylo uvedeno výše, jedná se o paprsky rovnoběžné s optickou osou. Z geometrického hlediska sahá oblast A_1 zprava limitně k povrchu předmětu zájmu. V dalším odvození předpokládáme, že tento telecentrický zdroj světla vybudí v rovině předmětu zájmu Σ_p konstantní časově i prostorově invariantní vlnoplochu telecentrických světelných paprsků $\psi_{e0}(x'',y'')=1$.

Druhá oblast je označena A_2, je podbarvena světle zeleně a souřadný systém je definován jako *(x´, y´, z)*. Oblast je zleva limitně ohraničena předmětem zájmu (rovina Σ_p) a zprava limitně vstupní čočkou telecentrické optické soustavy označenou S_2.

Třetí oblast je označena A_3, je podbarvena žlutě a souřadný systém je definován jako *(x,y,z)*. Zleva je oblast limitně omezena vstupní čočkou telecentrické optické soustavy, zprava není na obrázku omezena. V reálném případě telecentrického objektivu by byla ohraničena případnou další čočkou starající se například o dodatečnou lineární úpravu měřítka optického zobrazení. Za předpokladu dobré kvality objektivu (minimálních optických zkreslení a deformací obrazu) není nutné tuto část objektivu zahrnout do odvození.

4.2.1 Analýza zobrazovací soustavy dle pravidel Fourierovské optiky

Dle [4] je šíření optického pole lineárním, prostorově invariantním systémem definováno jako

$$\psi(x,y,z) = \psi(x,y,0) * h(x,y,z), \tag{4-27}$$

kde $\psi(x,y,0)$ představuje *prostorové rozložení optického pole* na vstupu lineárního systému definovaného *prostorovou impulsní charakteristikou* $h(x,y,z)$ a $\psi(x,y,z)$ představuje prostorové rozložení optického pole v bodě *z*. Operátor $*$ je operátorem konvoluce.

Obecně je dvourozměrná konvoluce definována vztahem [9]

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f(\xi,\eta)h(x-\xi,y-\eta)d\xi d\eta), \tag{4-28}$$

kde ξ,η jsou integrační proměnné.

Na vstupu zobrazovací soustavy, před předmětem zájmu, prochází optické pole nejprve volným prostředím. Prostorová impulsní charakteristika volného prostředí délky *z* je dle [4] definována jako

$$h(x,y,z) = \frac{jk_0}{2\pi z} e^{-\frac{j(x^2+y^2)k_0}{2z}}, \tag{4-29}$$

přičemž k_0 je *vlnové číslo* definované vztahem

$$k_0 = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi f_c}{c} = \frac{2\pi}{\lambda_c}, \tag{4-30}$$

kde λ_c [m], f_c [Hz], c[m.s^{-1}] jsou *vlnová délka*, *kmitočet* a *rychlost šíření světla ve vakuu.*

Dosazením (4-29) do vztahu (4-27) a následnou aplikací (4-28) je získáno

$$\psi(x,y,z) = \frac{jk_0}{2\pi z}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\psi(\xi,\eta,0)e^{\frac{-jk_0}{2z}\left\{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2\right\}}d\xi d\eta. \tag{4-31}$$

Tento obecný vztah se nazývá *Fresnelova difrakční rovnice* [5] a popisuje šíření optické vlny volným prostředím délky *z*.

Ačkoliv světlo prochází mezi kolimátorem a předmětem zájmu prostředím určité délky, lze vzhledem k výše uvedeným požadavků na zdroj telecentrického osvětlení vliv této části zanedbat. Díky tomu na vstupu zobrazovací soustavy obr. 4.6 nadále

předpokládáme monochromatickou, prostorově koherentní rovinnou vlnu, tvořenou telecentrickými paprsky tak, jak bylo definováno v kapitole 4.1.2. Matematicky lze rovinnou vlnoplochu na vstupu osvětlující předmět zájmu popsat rovnicí

$$\psi_z(x'',z'',0)=1. \tag{4-32}$$

2D funkce optické propustnosti předmětu prvotního zájmu je definována jako

$$t(x'',y'')=rect\left(\frac{x''}{X}\right)rect\left(\frac{y''}{Y}\right), \tag{4-33}$$

kde X, Y jsou rozměry propustné části předmětu v osách x, y tak, jak je naznačeno na obr. 4.6. Funkce optické propustnosti $rect(x'')$ je definována následovně

$$rect(x'')=\begin{cases}1 & |x''|<\frac{X}{2}\\ 0 & |x''|\geq\frac{X}{2}\end{cases}. \tag{4-34}$$

Obdobně je definována i funkce optické propustnosti v ose y''.

Dle [4] lze pro případ komplexního optického pole dopadajícího na nekonečně tenkou překážku[4] definovanou její optickou propustností popsat optické pole těsně za překážkou vztahem

$$\psi_{zaT}=t(x,y)\psi_{prT}(x,y), \tag{4-35}$$

kde ψ_{prT} je rozložení optického pole dopadajícího na přepážku a ψ_{zaT} je rozložení optického pole těsně za překážkou definovanou optickou propustností $t(x,y)$.

Na základě výše uvedeného lze provést následující odvození. Průchodem rovinné vlny (4-32) předmětem zájmu majícím funkci propustnosti definovánu dle (4-33) vznikne na základě (4-31) a (4-35) za předmětem zájmu optické pole definované vztahem

$$\psi(x',y',z)=\frac{-jk_0}{2\pi z}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}rect\left(\frac{x''}{X}\right)rect\left(\frac{y''}{Y}\right)e^{\frac{-jk_0}{2z}\left\{(x'-x'')^2+(y'-y'')^2\right\}}dx''dy''. \tag{4-36}$$

[4] V reálném případě není předmět zájmu nekonečně tenký, avšak je osvětlen telecentrickým osvětlením a následná telecentrická optická soustava s telecentrickou clonou v obrazovém ohnisku provádí dodatečné odstranění netelecentrických paprsků. Vlivem toho lze konečnou šířku předmětu zájmu zanedbat, neboť v rovině snímače se předmět zobrazí ostrý v kolmém průmětu k ose optické soustavy. Dalším faktorem umožňujícím zanedbat šířku předmětu je dostatečný poměr mezi velikostí propustné části předmětu a vlnovou délkou použitého světla.

Vztah (4-36) umožňuje výpočet optického pole rovinné vlny definovaného dle (4-32) po průchodu předmětem zájmu definovaným (4-33), (4-34) v libovolném bodě prostoru *(x´, y´, z)*, za předmětem. Na obr. 4.6 se jedná o světle zeleně vyplněnou oblast označenou A_1. Díky separovatelnosti integrálu lze zavést následující substituci

$$g(x') = \int_{-\frac{X}{2}}^{\frac{X}{2}} e^{-j\frac{k_0}{2z}(x'-x'')^2} dx'' \qquad g(y') = \int_{-\frac{Y}{2}}^{\frac{Y}{2}} e^{-j\frac{k_0}{2z}(y'-y'')^2} dy'' , \tag{4-37}$$

Zavedením substituce (4-37) do (4-36) se získá

$$\psi(x', y', z) = \frac{jk_0}{2\pi z} g(x')g(y') . \tag{4-38}$$

Následujícím prvkem zobrazovací soustavy je konvexní zobrazovací čočka. Obecně je přenos optického pole konvexní zobrazovací čočkou [4] definován následovně

$$\psi_{zaC}(x, y) = \psi_{prC}(x, y) e^{j\frac{k_0}{2f}(x^2+y^2)} , \tag{4-39}$$

kde ψ_{prC} je optické pole těsně před čočkou a ψ_{zaC} je optické pole těsně za čočkou.

Nechť je konvexní čočka umístěna ve vzdálenosti *d* od předmětu zájmu na ose *z* (obr. 4.6). Dosazením $z = d$ do vztahu (4-38) a aplikací vztahu (4-39) je získán vztah popisující zobrazení předmětu zájmu těsně za čočkou

$$\psi_{zaC}(x, y) = \frac{jk_0}{2\pi d} g(x')g(y') e^{j\frac{k_0}{2f}(x^2+y^2)} . \tag{4-40}$$

Dosazením vztahu (4-40) do *Fresnelovy difrakční rovnice* (4-31) je obdržen vztah

$$\psi(x, y, z) = \frac{-k_0^{\,2}}{4\pi^2 zd} \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} g(x')g(y') e^{j\frac{k_0}{2f}(x^2+y^2)} e^{\frac{-jk_0}{2z}\left\{(x-x')^2+(y-y')^2\right\}} dx'dy' \tag{4-41}$$

Vztah (4-41) popisuje rozložení optického pole v libovolném bodě prostoru za zobrazovací čočkou po průchodu rovinné vlny (4-32) předmětem zájmu (4-33) a

zobrazovací čočkou telecentrické optické soustavy. Na obr. 4.6 se jedná o světle žlutě vyplněnou oblast označenou A_2.

Vliv telecentrické clony při použití telecetrického způsobu osvětlení předmětu je osvětlen výše. Bylo také prokázáno, že jej lze při dodržení podmínek (4-24) *a podmínky dostatečného průměru clony vůči vlnové délce světla zanedbat.*

Vztah (4-41) lze upravit převedením exponentů *Eulerových čísel* na společný jmenovatel a následným roznásobením a vhodným vytýkáním do následující podoby

$$\psi(x,y,z)=\frac{-k_0{}^2}{4\pi^2 dz}e^{j\frac{k_0}{2z}(x^2+y^2)}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}g(x')g(y')e^{\frac{-jk_0}{2fz}\left\{x'^2(f-z)-2fxx'+y'^2(f-y')-2fyy'\right\}}dx'dy'. \tag{4-42}$$

Ze vztahu (4-42) je patrná možnost separace dílčích částí podle integračních proměnných x', y' a přepsání (4-42) do tvaru

$$\psi(x,y,z)=\overbrace{\frac{-k_0{}^2}{4\pi^2 dz}e^{j\frac{k_0}{2z}(x^2+y^2)}}^{A_C}\overbrace{\int_{-\infty}^{\infty}g(x')e^{\frac{-jk_0}{2fz}\left\{x'^2(f-z)-2fxx'\right\}}dx'}^{I_x}\overbrace{\int_{-\infty}^{\infty}g(y')e^{\frac{-jk_0}{2fz}\left\{y'^2(f-z)-2fyy'\right\}}dy'}^{I_y}, \tag{4-43}$$

kde A_C představuje absolutní člen rovnice nezávislý na integračních proměnných. Vzhledem k této jeho vlastnosti jej v dalším odvozování není nutno uvažovat. Integrály označené I_x *a* I_y představují separované části vztahu pro osy vstupní a výstupní roviny x', y' a x, y. Obdobnost I_x *a* I_y je patrná již ze symetrického zadání optické soustavy. Pro další odvozování je tedy možné věnovat se pouze jedné ze složek, neboť druhá je její přímou obdobou. Proto je pro další řešení použita pouze složka I_x.

$$I_x=\int_{-\infty}^{\infty}g(x')e^{\frac{-jk_0}{2fz}\left\{x'^2(f-z)-2fxx'\right\}}dx'. \tag{4-44}$$

Dosazením (4-37) do vztahu (4-44) je odvozen vztah

$$I_x=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\frac{X}{2}}^{\frac{X}{2}}e^{-j\frac{k_0}{2z}(x'-x'')^2}e^{\frac{-jk_0}{2fz}\left\{x'^2(f-z)-2fxx'\right\}}dx''dx'. \tag{4-45}$$

Roznásobením exponenciálních funkcí a provedením úprav exponentů dostáváme

$$I_x = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\frac{X}{2}}^{\frac{X}{2}} e^{-j\frac{k_0}{2d}x''^2} e^{\frac{-jk_0}{2dfz}\left\{x'^2(fz+df-dz)-2fx'(zx''+dx)\right\}} dx''dx' . \quad (4\text{-}46)$$

Díky tvaru exponenciálních funkcí je možné a vhodné z hlediska dalších operací provést záměnu pořadí integrace, čímž se dospěje k následující podobě vztahu

$$I_x = \int_{-\frac{X}{2}}^{\frac{X}{2}} e^{-j\frac{k_0}{2d}x''^2} \overbrace{\int_{-\infty}^{\infty} e^{\frac{-jk_0}{2dfz}\left\{x'^2(fz+df-dz)-2fx'(zx''+dx)\right\}} dx'}^{I_{x'}} dx'' . \quad (4\text{-}47)$$

Z důvodu nalezení vhodného tvaru pro provedení integrace je vhodné aplikovat na člen $I_{x'}$ tzv. *Eulerův vztah*

$$e^{j\phi} = \cos\phi + i\sin\phi . \quad (4\text{-}48)$$

Po aplikaci *Eulerova vztahu* (4-48) na část vztahu (4-47) označenu $I_{x'}$ lze psát

$$I_{x'} = \int_{-\infty}^{\infty} \cos\left\{\frac{-k_0}{2dfz}\left(x'^2(fz+df-dz)-2fx'(zx''+dx)\right)\right\}dx' + \int_{-\infty}^{\infty} j\sin\left\{\frac{-k_0}{2dfz}\left(x'^2(fz+df-dz)-2fx'(zx''+dx)\right)\right\}dx' . \quad (4\text{-}49)$$

Argumenty neurčitých integrálů funkcí sin a cos ve vztahu (4-49) lze zavedením vhodné substituce převést na tvar neurčitého integrálu funkcí sin, cos s argumentem druhého řádu, jehož řešení je tabelováno. Nechť je zavedena substituce

$$a = -\frac{k_0}{2dfz}(fz+df-dz), \quad (4\text{-}50)$$

$$b = \frac{k_0}{2dz}(zx''+dx), \quad (4\text{-}51)$$

do vztahu (4-49). Zavedením substituce je získán vztah

$$I_{x'} = \int_{-\infty}^{\infty}\cos\left(ax'^2+2bx'\right)dx' + \int_{-\infty}^{\infty} j\sin\left(ax'^2+2bx'\right)dx' . \quad (4\text{-}52)$$

Vztah (4-52) je možné podle [10], [11] integrovat jako obdobu následujících vztahů

$$\int \cos\left(ax^2+2bx+c\right)dx = \sqrt{\frac{\pi}{2a}}\left\{\cos\frac{ac-b^2}{a}\,\mathcal{C}\left(\frac{ax+b}{\sqrt{a}}\right)-\sin\frac{ac-b^2}{a}\,\mathcal{S}\left(\frac{ax+b}{\sqrt{a}}\right)\right\}, \quad (4\text{-}53)$$

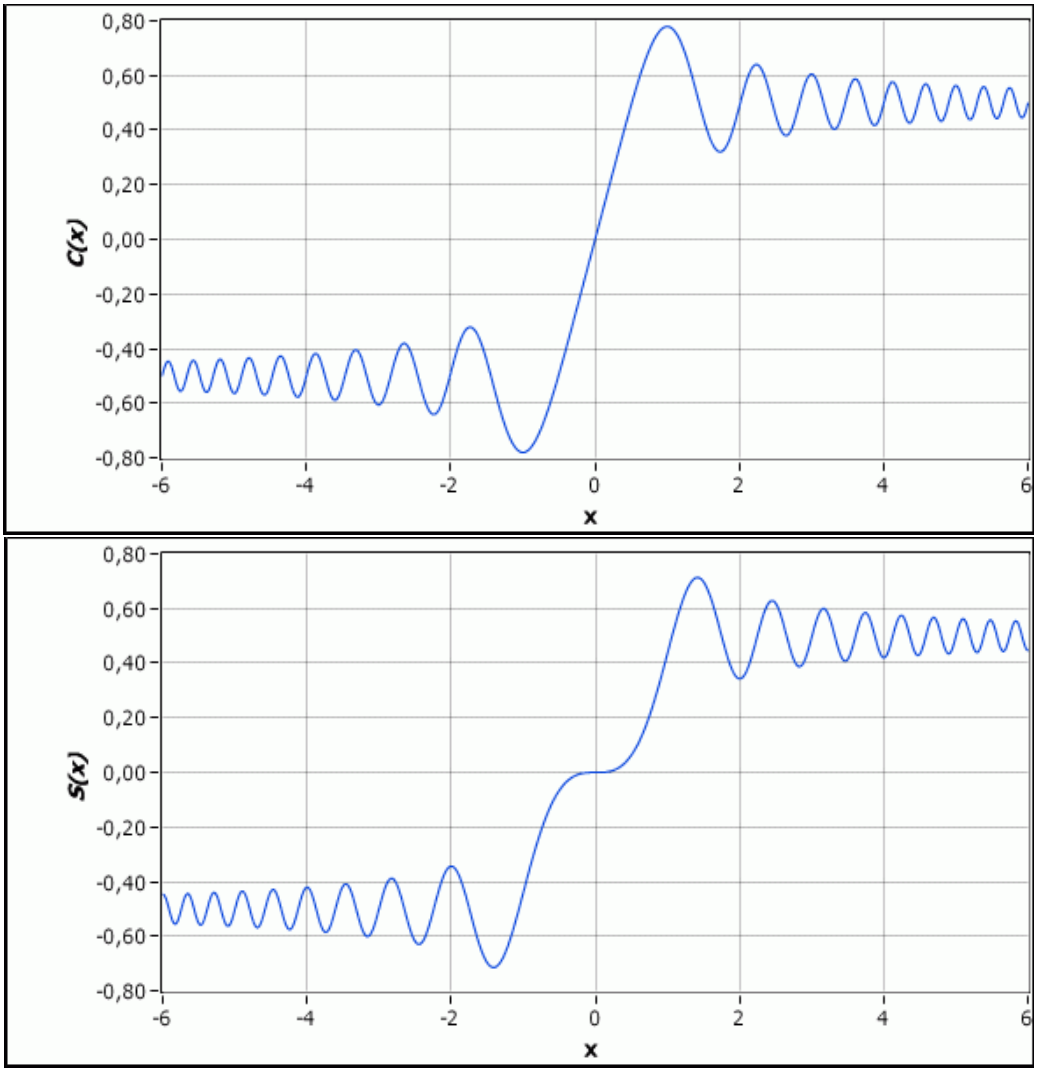
$$\int \sin\left(ax^2+2bx+c\right)dx = \sqrt{\frac{\pi}{2a}}\left\{\cos\frac{ac-b^2}{a}\,\mathcal{S}\left(\frac{ax+b}{\sqrt{a}}\right)+\sin\frac{ac-b^2}{a}\,\mathcal{C}\left(\frac{ax+b}{\sqrt{a}}\right)\right\}, \quad (4\text{-}54)$$

kde $\mathcal{C}(\,)$ a $\mathcal{S}(\,)$ značí *Fresnelovy integrály* definované jako

$$\mathcal{C}(x) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right)dt, \quad (4\text{-}55)$$

$$\mathcal{S}(x) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right)dt. \quad (4\text{-}56)$$

Průběhy *Fresnelových integrálů* pro $x\in(-4,4)$ jsou uvedeny na obr. 4.7.



Obr. 4.7 Průběh *Fresnelových integrálů*

Výpočtem neurčitých integrálů ve vztahu (4-52) pomocí (4-53), (4-54) se získá

$$I_{x'} = \sqrt{\frac{\pi}{2a}} \left[\left\{ \begin{array}{l} \cos\frac{-b^2}{a}\mathcal{C}\left(\frac{ax'+b}{\sqrt{a}}\right) - \sin\frac{-b^2}{a}\mathcal{S}\left(\frac{ax'+b}{\sqrt{a}}\right) + \\ + j\cos\frac{-b^2}{a}\mathcal{S}\left(\frac{ax'+b}{\sqrt{a}}\right) + j\sin\frac{-b^2}{a}\mathcal{C}\left(\frac{ax'+b}{\sqrt{a}}\right) \end{array} \right\} \right]_{-\infty}^{\infty}, \quad (4\text{-}57)$$

kde *a*, *b* jsou definovány dle (4-50), (4-51). Ze vztahu (4-57) je zřejmá nutná podmínka $a \geq 0$, tj. po dosazení (4-50) do této podmínky a několika úpravách je dosaženo podmínky

$$z \geq \frac{df}{d-f}. \quad (4\text{-}58)$$

Při dodržení výše uvedené podmínky je třeba provést dosazení integračních limitů $\infty, -\infty$ do vztahu (4-58). Je patrné, že integrační proměnná x' se nachází pouze v argumentech *Fresnelových funkcí*, je proto vhodné provést diskuzi pouze těchto argumentů v bodech $\infty, -\infty$. Diskuze argumentů je provedena na základě pravidel limitního počtu a její výsledky jsou následující

$$\lim_{x'\to\infty} \frac{ax'+b}{\sqrt{a}} = \infty, \quad (4\text{-}59)$$

$$\lim_{x'\to-\infty} \frac{-ax'+b}{\sqrt{a}} = -\infty. \quad (4\text{-}60)$$

Po dosazení integračních mezí do (4-57) lze na základě (4-59), (4-60) a při uvážení vztahů

$$\begin{array}{l} \sin(-x) = -\sin x \\ \cos(-x) = \cos x \end{array}, \quad (4\text{-}61)$$

přepsat (4-57) do následující podoby

$$I_{x'} = \sqrt{\frac{\pi}{2a}} \left\{ \begin{array}{l} \cos\frac{b^2}{a}\mathcal{C}(\infty) + \sin\frac{b^2}{a}\mathcal{S}(\infty) - \cos\frac{b^2}{a}\mathcal{C}(-\infty) - \sin\frac{b^2}{a}\mathcal{S}(-\infty) + \\ + j\left(\cos\frac{b^2}{a}\mathcal{S}(\infty) - \sin\frac{b^2}{a}\mathcal{C}(\infty) - \cos\frac{b^2}{a}\mathcal{S}(-\infty) + \sin\frac{b^2}{a}\mathcal{C}(-\infty)\right) \end{array} \right\}. \quad (4\text{-}62)$$

Pro limitní hodnoty *Fresnelových integrálů* [4] platí

$$\mathcal{C}(\infty) = \mathcal{S}(\infty) = \frac{1}{2}, \quad (4\text{-}63)$$

$$\mathcal{C}(-\infty)=\mathcal{S}(-\infty)=-\frac{1}{2}. \tag{4-64}$$

Dosazením hodnot *Fresnelových integrálů* (4-63), (4-64) do (4-62) a provedením úprav je odvozen vztah

$$\begin{aligned} I_{x'} &= \sqrt{\frac{\pi}{2a}}\underbrace{\left(\cos\frac{b^2}{a}-j\sin\frac{b^2}{a}\right)}_{e^{-j\frac{b^2}{a}}}+j\sqrt{\frac{\pi}{2a}}\underbrace{\left(\cos\frac{b^2}{a}-j\sin\frac{b^2}{a}\right)}_{e^{-j\frac{b^2}{a}}}= \\ &= \sqrt{\frac{\pi}{2a}}e^{-j\frac{b^2}{a}}(1+j) \end{aligned}. \tag{4-65}$$

Po dosazení (4-65) do (4-47) a sloučení exponentů *Eulerových čísel* lze psát

$$I_x=\sqrt{\frac{\pi}{2a}}(1+j)\int_{-\frac{X}{2}}^{\frac{X}{2}}e^{-j\frac{2db^2+ak_0x''^2}{2da}}dx'', \tag{4-66}$$

kde *a* a *b* jsou definovány podle (4-50) a (4-51). Přičemž *b* je funkcí *x´´*, a proto musí být uvnitř integrálu. Dosazením za *a*, *b* do (4-66) a úpravou exponentů *Eulerových čísel* je dosaženo vztahu

$$I_x=(1+j)\sqrt{\frac{\pi dfz}{k_0(dz-df-fz)}}e^{-j\frac{k_0dfx^2}{2z(dz-df-fz)}}\underbrace{\int_{-\frac{X}{2}}^{\frac{X}{2}}e^{-j\frac{k_0}{2(dz-df-fz)}\left(x''^2(z-f)+2fxx''\right)}dx''}_{I_{x''}}. \tag{4-67}$$

Pro potřeby integrace je převedena pomocí *Eulerova vzorce* (4-48) část vztahu (4-67) označená jako $I_{x''}$ opět do podoby tabelovaných integrálů (4-53), (4-54). Touto úpravou je získáno

$$\begin{aligned} I_{x''} = &\int_{-\frac{X}{2}}^{\frac{X}{2}}\cos\left(\frac{k_0}{2(dz-df-fz)}\left(x''^2(z-f)+2fxx''\right)\right)dx''- \\ &-j\int_{-\frac{X}{2}}^{\frac{X}{2}}\sin\left(\frac{k_0}{2(dz-df-fz)}\left(x''^2(z-f)+2fxx''\right)\right)dx'' \end{aligned}. \tag{4-68}$$

Zavedením substituce

$$a_2 = \frac{k_0(z-f)}{2(dz-df-fz)}, \tag{4-69}$$

$$b_2 = \frac{k_0 fx}{2(dz-df-fz)} \tag{4-70}$$

přejde vztah (4-68) do tvaru vhodného pro integraci

$$I_{x''} = \int_{-\frac{X}{2}}^{\frac{X}{2}} \cos\left(a_2 x''^2 + 2b_2 x''\right) dx'' - j \int_{-\frac{X}{2}}^{\frac{X}{2}} \sin\left(a_2 x''^2 + 2b_2 x''\right) dx'' =$$

$$= \sqrt{\frac{\pi}{2a_2}} \left[\begin{array}{l} \cos\frac{-b_2^{\,2}}{a_2} \mathcal{C}\left(\frac{a_2 x'' + b_2}{\sqrt{a_2}}\right) - \sin\frac{-b_2^{\,2}}{a_2} \mathcal{S}\left(\frac{a_2 x'' + b_2}{\sqrt{a_2}}\right) - \\ - j\left(\cos\frac{-b_2^{\,2}}{a_2} \mathcal{S}\left(\frac{a_2 x'' + b_2}{\sqrt{a_2}}\right) + \sin\frac{-b_2^{\,2}}{a_2} \mathcal{C}\left(\frac{a_2 x'' + b_2}{\sqrt{a_2}}\right)\right) \end{array} \right]_{-\frac{X}{2}}^{\frac{X}{2}} . \tag{4-71}$$

Pro usnadnění budoucí diskuze argumentů *Fresnelových integrálů* je před dosazením integračních mezí zavedena substituce

$$d_{X+} = \frac{a_2(X/2) + b_2}{\sqrt{a_2}}, \tag{4-72}$$

$$d_{X-} = \frac{-a_2(X/2) + b_2}{\sqrt{a_2}}, \tag{4-73}$$

obsahující příslušné meze z určitého integrálu (4-71). Při respektování substituce (4-72), (4-73) je po dosazení integračních mezí do (4-71) a úpravách vhodným vytýkáním dosaženo vztahu

$$I_{x''} = \sqrt{\frac{\pi}{2a_2}} \left\{ \begin{array}{l} \cos\frac{-b_2^{\,2}}{a_2} \left[\mathcal{C}(d_{X+}) - \mathcal{C}(d_{X-}) + j\mathcal{S}(d_{X-}) - j\mathcal{S}(d_{X+})\right] - \\ - j\sin\frac{-b_2^{\,2}}{a_2} \left[\mathcal{C}(d_{X+}) - \mathcal{C}(d_{X-}) + j\mathcal{S}(d_{X-}) - j\mathcal{S}(d_{X+})\right] \end{array} \right\}. \tag{4-74}$$

Vytknutím členů násobících goniometrické funkce a aplikací *Eulerova vzorce* (4-48) je získáno

$$I_{x''} = \sqrt{\frac{\pi}{2a_2}} e^{j\frac{b_2^2}{a_2}} \left[\mathcal{C}(d_{X+}) - \mathcal{C}(d_{X-}) + j\mathcal{S}(d_{X-}) - j\mathcal{S}(d_{X+}) \right]. \tag{4-75}$$

Dosazením za a_2, b_2 podle (4-69), (4-70) a úpravou přejde vztah do podoby

$$I_{x''} = \sqrt{\frac{\pi(dz - df - fz)}{k_0(z-f)}} e^{j\frac{k_0 f^2 x^2}{2(z-f)(dz-df-fz)}} \left[\mathcal{C}(d_{X+}) - \mathcal{C}(d_{X-}) + j\mathcal{S}(d_{X-}) - j\mathcal{S}(d_{X+}) \right]. \tag{4-76}$$

Na základě dosazení vztahu (4-76) do vztahu (4-67) se po provedení úprav získá

$$I_x = (1+j)\frac{\pi}{k_0} \sqrt{\frac{dfz}{(z-f)}} e^{-j\frac{k_0 f x^2}{2z(z-f)}} \left[\mathcal{C}(d_{X+}) - \mathcal{C}(d_{X-}) + j\mathcal{S}(d_{X-}) - j\mathcal{S}(d_{X+}) \right]. \tag{4-77}$$

Pro finalizaci tohoto výrazu je nutné vyjádřit substituční proměnné d_{X+} a d_{X-} v proměnných definovaných na obr. 4.6. Tohoto vyjádření lze docílit dosazením (4-69) a (4-70) do (4-72) a (4-73). Vzhledem k tomu, že čitatel vztahu (4-72) a (4-73) může principiálně nabývat kladnou i zápornou hodnotu, je nutné v průběhu dosazení provést diskuzi parametru a tím rozdělení platnosti vztahů do specifických intervalů. Takto je získána nová definice substitučních proměnných

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

$$d_{X+} = \frac{a_2(X/2) + b_2}{\sqrt{a_2}} = -\sqrt{\frac{k_0((X/2)(z-f) + fx)^2}{2(z-f)(dz - df - fz)}}, \text{ pro } \frac{(X/2)(z-f) + fx}{(dz - df - fz)} < 0, \tag{4-78}$$

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

$$d_{X-} = \frac{-a_2(X/2) + b_2}{\sqrt{a_2}} = -\sqrt{\frac{k_0((X/2)(f-z) + fx)^2}{2(z-f)(dz - df - fz)}}, \text{ pro } \frac{(X/2)(f-z) + fx}{(dz - df - fz)} < 0. \tag{4-79}$$

Díky symetrii řešeného problému, která je patrná i z obr. 4.6 a vztahu (4-43) je možné analogicky k (4-77) psát

$$I_y = (1+j)\frac{\pi}{k_0}\sqrt{\frac{dfz}{(z-f)}}e^{-j\frac{k_0 fy^2}{2z(z-f)}}\left[\mathcal{C}(d_{Y+})-\mathcal{C}(d_{Y-})+j\mathcal{S}(d_{Y-})-j\mathcal{S}(d_{Y+})\right], \quad (4\text{-}80)$$

kde d_{Y+} a d_{Y-} jsou opět analogicky k (4-78), (4-79) definovány jako

$$d_{Y+} = \sqrt{\frac{k_0((Y/2)(z-f)+fy)^2}{2(z-f)(dz-df-fz)}}, \text{ pro } \frac{(Y/2)(z-f)+fy}{(dz-df-fz)} \geq 0,$$

$$d_{Y+} = -\sqrt{\frac{k_0((Y/2)(z-f)+fy)^2}{2(z-f)(dz-df-fz)}}, \text{ pro } \frac{(Y/2)(z-f)+fy}{(dz-df-fz)} < 0, \quad (4\text{-}81)$$

$$d_{Y-} = \sqrt{\frac{k_0((Y/2)(f-z)+fy)^2}{2(z-f)(dz-df-fz)}}, \text{ pro } \frac{(Y/2)(f-z)+fy}{(dz-df-fz)} \geq 0,$$

$$d_{Y-} = -\sqrt{\frac{k_0((Y/2)(f-z)+fy)^2}{2(z-f)(dz-df-fz)}}, \text{ pro } \frac{(Y/2)(f-z)+fy}{(dz-df-fz)} < 0, \quad (4\text{-}82)$$

Po dosazení vztahů (4-77) a (4-80) do (4-43) a provedení nezbytných úprav je získán vztah

$$\begin{aligned}\psi(x,y,z) = \frac{-f}{4(z-f)}e^{-j\frac{k_0 f(x^2+y^2)}{2z(z-f)}} \cdot \\ \cdot\left[(1+j)(\mathcal{C}(d_{X+})-\mathcal{C}(d_{X-})+j\mathcal{S}(d_{X-})-j\mathcal{S}(d_{X+}))\right]\cdot \\ \cdot\left[(1+j)(\mathcal{C}(d_{Y+})-\mathcal{C}(d_{Y-})+j\mathcal{S}(d_{Y-})-j\mathcal{S}(d_{Y+}))\right]\end{aligned} \quad (4\text{-}83)$$

představující funkci rozložení *optického pole* při zobrazení předmětu zájmu (4-33) osvětleného telecentrickou rovinnou vlnou a zobrazeného telecentrickou optickou soustavou v předmětovém prostoru. Umožňuje tedy vypočítat obrazovou reprezentaci předmětu zájmu v libovolném bodě na ose *z*, pro který platí podmínka (4-58). Z hlediska obrazu vytvářeného na polovodičovém snímači je však vhodnější pracovat místo s *optickým polem* přímo s *intenzitou optického pole*.

Rozložení *intenzity optického pole* je definováno vztahem

$$I(x,y,z) = \left|\psi(x,y,z)\right|^2 . \tag{4-84}$$

Dosazením (4-83) do (4-84) se při aplikaci následujících vztahů pro absolutní hodnotu komplexních čísel

$$\left|a+ib\right| = \sqrt{a^2+b^2}\ ,$$

$$\begin{aligned} e^{-j\varphi} &= \cos\varphi + i\sin\varphi \\ abs\left(\cos\varphi + i\sin\varphi\right) &= \sqrt{\cos^2\varphi + \sin^2\varphi} = 1 \end{aligned}\ , \tag{4-85}$$

a poučky říkající, že *absolutní hodnota součinu dvou komplexních čísel je rovna součinu absolutních hodnot komplexních čísel* získá

$$\begin{aligned} I(x,y,z) = \frac{f^2}{4\left(z-f\right)^2}\Big[&\left(\mathcal{C}\left(d_{X+}\right)-\mathcal{C}\left(d_{X-}\right)\right)^2 + \left(\mathcal{S}\left(d_{X+}\right)-\mathcal{S}\left(d_{X-}\right)\right)^2\Big]\cdot \\ \cdot\Big[&\left(\mathcal{C}\left(d_{Y+}\right)-\mathcal{C}\left(d_{Y-}\right)\right)^2 + \left(\mathcal{S}\left(d_{Y+}\right)-\mathcal{S}\left(d_{Y-}\right)\right)^2\Big] \end{aligned} . \tag{4-86}$$

Tento vztah lze považovat za *fyzikální model zobrazení předmětu zájmu* (4-33) osvětleného telecentrickými paprsky a zobrazeného telecentrickou optickou soustavou v předmětovém prostoru. Model v sobě zahrnuje difrakční jevy vznikající na hranách předmětu a jejich přenos telecentrickou optickou soustavou v předmětovém prostoru. V rámci modelu jsou tedy definovaný i tvary hranových křivek předmětu. Pomocí (4-86) lze vypočítat intenzitní obraz předmětu zájmu v libovolném bodě na ose *z*, při platnosti podmínky (4-58).

4.3 Odvození vztahu pro určení skutečné pozice obrysu předmětu v rámci modelu zobrazení

Obecně lze výsledek výše uvedeného odvození shrnout následujícím způsobem. V předmětovém prostoru je hrana předmětu zájmu definována skokovou změnou optické propustnosti (4-34). Po nasvětlení předmětu zájmu rovinnou vlnou (4-32) a jeho zobrazením telecentrickou optickou soustavou do snímací roviny, v níž je umístěna kamera, dojde ke změně tvaru hranové funkce předmětu ze skokové na hranu přechodovou. Z teorie je známo [1], že čím bude velikost předmětu zájmu (X, Y viz obr. 4.6) menší vzhledem k použité vlnové délce světla, tím větší budou difrakční projevy světla. Jelikož je pro nasvětlení předmětu použita rovinná vlna, jedná se o tzv. *Fraunhoferovy ohybové (difrakční) jevy*. Právě vlivem těchto jevů dojde ke změně ze skokové hrany na hranu charakterizovanou spojitým přechodem, tedy k určitému rozprostření hrany v obraze. Z hlediska přesného měření je nezbytné najít v obrazové reprezentaci skokové hrany obrysový bod odpovídající obrysovému bodu předmětu v předmětové rovině.

Při odvození vztahu pro určení přesné pozice obrysu předmětu se vychází ze vztahu (4-86). Absolutní člen v tomto vztahu můžeme vzhledem k jeho nezávislosti na osách *x*, *y* při dalším vyšetřování zanedbat. Vzhledem k separovatelnosti vztahu v osách *x*, *y* je možné provést následující analýzu pouze v jedné z nich a její výsledek následně zobecnit i do osy druhé. Při respektování těchto skutečností dostáváme z (4-86) jednorozměrný řez fyzikálním modelem zobrazení

$$I(x,z) = \left(\mathcal{C}\left(d_{X+}\right) - \mathcal{C}\left(d_{X-}\right)\right)^2 + \left(\mathcal{S}\left(d_{X+}\right) - \mathcal{S}\left(d_{X-}\right)\right)^2, \tag{4-87}$$

kde d_{X+}, d_{X-} jsou definovány podle (4-78), (4-79). Jak bude ukázáno níže, tento vztah ve své definici obsahuje i přesné fyzikální modely přechodových hran.

Z předchozího odvození vyplynula jediná omezující podmínka platnosti vztahu (4-87) a tou je podmínka (4-58). Nic tedy nebrání provedení následující úvahy. Nechť je vyšetřen průběh intenzity optického pole těsně za předmětem zájmu, tedy limitně zprava v pozici $z = -d$ (viz obr. 4.6). V tomto bodě nechť je určena hodnota intenzity optického pole odpovídající pozici skokové hrany předmětu zájmu, tedy souřadnici $X/2$. Pro uvedou pozici na ose *z* je možné dodržet podmínku (4-58) pouze v případě $f \to \infty$. Důkaz její platnosti vyplývá z následující diskuze pomocí *L´Hospitalova pravidla* limitního počtu

$$\lim_{x \to c} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \to c} \frac{f'(x)}{g'(x)}. \tag{4-88}$$

Podmínka $z \geq \frac{df}{d-f}$ pro $z = -d$ platí je-li $f \to \infty$, důkaz:

$$\lim_{f\to\infty} \frac{df}{d-f} = \lim_{f\to\infty} \frac{d}{-1} = -d = z\,. \tag{4-89}$$

Dosazením $z = -d$ do (4-78), (4-79) je získáno

$$d_{X+} = \sqrt{\frac{k_0\left(-(X/2)(d+f)+fx\right)^2}{2d^2(d+f)}}\,,\ \text{pro}\ \ (X/2)(d+f)-fx \geq 0\,,$$

$$d_{X+} = -\sqrt{\frac{k_0\left(-(X/2)(d+f)+fx\right)^2}{2d^2(d+f)}}\,,\ \text{pro}\ \ (X/2)(d+f)-fx < 0\,, \tag{4-90}$$

$$d_{X-} = \sqrt{\frac{k_0\left((X/2)(d+f)+fx\right)^2}{2d^2(d+f)}}\,,\ \text{pro}\ \ (X/2)(d+f)+fx \leq 0\,,$$

$$d_{X-} = -\sqrt{\frac{k_0\left((X/2)(d+f)+fx\right)^2}{2d^2(d+f)}}\,,\ \text{pro}\ \ (X/2)(d+f)+fx > 0\,. \tag{4-91}$$

Aplikací *L´Hospitalova pravidla* (4-88) na vztahy (4-90), (4-91) pro $f \to \infty$ se získá

$$\lim_{f\to\infty} P_{X+} = \lim_{f\to\infty} \sqrt{k_0\left(\frac{-X(x-X/2)}{2d} + \frac{(x-X/2)^2}{d^2} f\right)}\,,\ \text{pro}\ \ (X/2)(d+f)-fx \geq 0\,,$$

$$\lim_{f\to\infty} P_{X+} = -\lim_{f\to\infty} \sqrt{k_0\left(\frac{-X(x-X/2)}{2d} + \frac{(x-X/2)^2}{d^2} f\right)}\,,\ \text{pro}\ \ (X/2)(d+f)-fx < 0\,, \tag{4-92}$$

$$\lim_{f\to\infty} P_{X-} = \lim_{f\to\infty} \sqrt{k_0\left(\frac{X(x+X/2)}{2d} + \frac{(x+X/2)^2}{d^2} f\right)}\,,\ \text{pro}\ \ (X/2)(d+f)+fx \leq 0\,,$$

$$\lim_{f\to\infty} P_{X-} = -\lim_{f\to\infty} \sqrt{k_0\left(\frac{X(x+X/2)}{2d} + \frac{(x+X/2)^2}{d^2} f\right)}\,,\ \text{pro}\ \ (X/2)(d+f)+fx > 0\,. \tag{4-93}$$

Jak již bylo uvedeno, skokové hrany předmětu zájmu se dle jeho definice (4-34) nachází v bodech $|x| = X/2$. Dosazením $x = X/2$ do (4-92), (4-93) při respektování odpovídajících podmínek se získá

$$\lim_{\substack{f\to\infty \\ x\to X/2}} P_{X+} = 0\,, \tag{4-94}$$

$$\lim_{\substack{f\to\infty \\ x\to X/2}} P_{X-} = -\infty\,. \tag{4-95}$$

Dosazením těchto hodnot do (4-87) je určena intenzita optického pole v obrysovém bodě na ose x ($x = X/2$) bezprostředně za předmětem zájmu na ose z

$$I(X/2) = \left(\mathcal{C}(0) - \mathcal{C}(-\infty)\right)^2 + \left(\mathcal{S}(0) - \mathcal{S}(-\infty)\right)^2 = \frac{1}{2}\,. \tag{4-96}$$

Obdobně je získána intenzita pole v opticky propustné části, tedy pro $|x| < X/2$

$$I(|x| < X/2) = \left(\mathcal{C}(\infty) - \mathcal{C}(-\infty)\right)^2 + \left(\mathcal{S}(\infty) - \mathcal{S}(-\infty)\right)^2 = 2 \tag{4-97}$$

a za nepropustnou částí předmětu v místě geometrického stínu $|x| > X/2$ je intenzita optického pole rovna

$$\begin{aligned} I(|x| > X/2) &= \left(\mathcal{C}(-\infty) - \mathcal{C}(-\infty)\right)^2 + \left(\mathcal{S}(-\infty) - \mathcal{S}(-\infty)\right)^2 = \\ &= \left(\mathcal{C}(\infty) - \mathcal{C}(\infty)\right)^2 + \left(\mathcal{S}(\infty) - \mathcal{S}(\infty)\right)^2 = 0 \end{aligned}\,. \tag{4-98}$$

Z vypočtených hodnot intenzity optického pole v těsné blízkosti za předmětem zájmu na ose z v bodě $z \to -d$ zleva pro bod $x \to X/2$ a intervaly $|x| < X/2$, $|x| > X/2$ lze usuzovat na poměr mezi intenzitou optického pole v místě hrany předmětu a maximální intenzitou optického pole v místě opticky propustné části předmětu. **Z vypočtených hodnot vyplývá, že intenzita v obrysovém bodě, je rovna 1/4 ustálené intenzity optického pole v propustné části předmětu.** Matematicky lze tuto skutečnost popsat následujícím vztahem

$$I_{\mathrm{EdgePoint}}(x) = \frac{1}{4} * I_{\mathrm{STAB}}\,, \tag{4-99}$$

kde $I_{\mathrm{EdgePoint}}(x)$ - je intenzita optického pole v obrazové rovině odpovídající pozici obrysu předmětu v předmětové rovině,

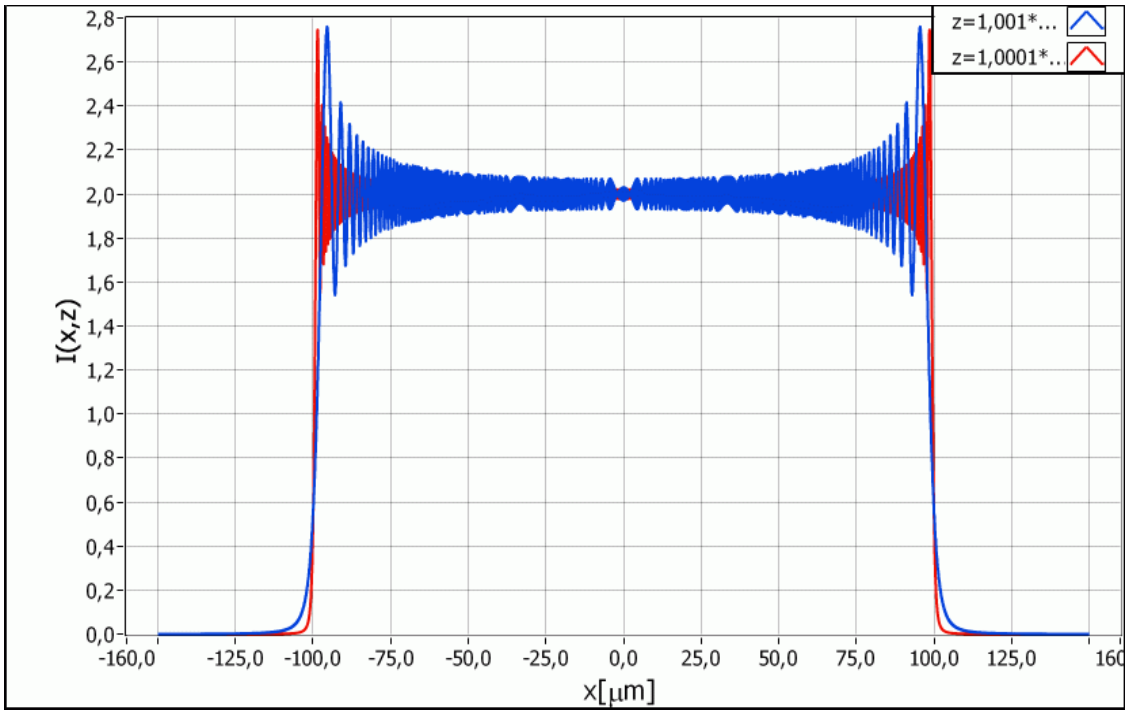
I_{STAB} - je průměrná ustálená hodnota intenzity optického pole v obrazové rovině odpovídající pozici opticky propustné části předmětu v předmětové rovině.

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

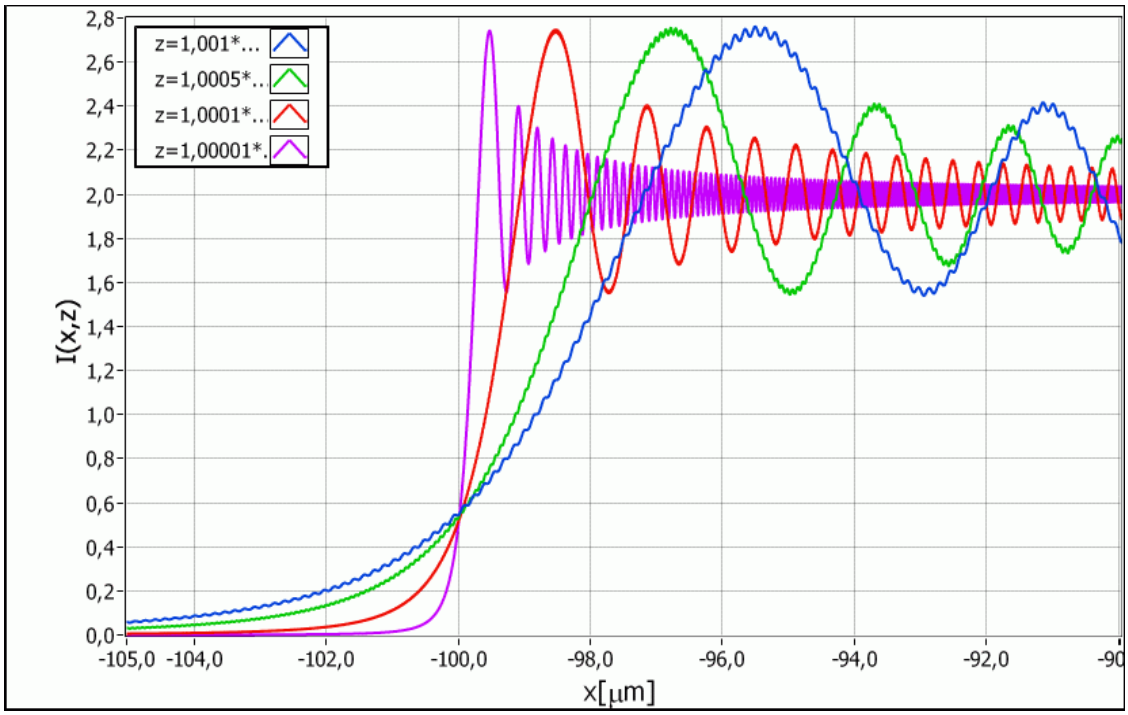
Vzhledem k původu vztahu (4-87) v odvozeních založených na zákonech *Fourierovské optiky* je důležité připomenout, že ideálně ostrý obraz předmětu bude produkován pouze v bodě *d´*, jenž je definován *Gaussovou zobrazovací rovnicí* (4-6) platnou i pro uvažovanou optickou soustavu. Jak již bylo uvedeno výše, telecentrická optická soustava s telecentrickým osvětlením v předmětovém prostoru sice potlačuje vliv perspektivního zobrazování předmětů, avšak i ona poskytuje ostrý obraz pouze s určitou *hloubkou ostrosti* definovanou vztahem (4-26).

Vliv zaostření optické soustavy je možné ilustrovat pomocí odvozeného fyzikálního modelu (4-87), který byl implementován v programovacím jazyce LabView právě pro výzkum těchto vlivů. Definujme velikost předmětu zájmu $X = 200\,\mu\text{m}$; $d = 0{,}075\,\text{m}$;[5] $f = 0{,}0375\,\text{m}$ a $\lambda = 630\,\text{nm}$. Různé úrovně zaostření lze simulovat formou změny pozice snímací roviny na ose z v obrazovém prostoru $z \in [1{,}001;\ 1{,}0005;\ 1{,}0001;\ 1{,}00001] * \frac{df}{(d-f)}$. Všechny uvedené pozice musí vyhovovat podmínce (4-58). Z hlediska použité symboliky odpovídá změna z významově posuvu hodnoty *d´* (*pozice kamery*). Na obr. 4.8 je vykreslena odezva fyzikálního modelu (4-87) s uvedenými parametry. Z důvodu zachování přehlednosti jsou zobrazeny pouze průběhy pro $z = 1{,}001 * \frac{df}{(d-f)}$ a $z = 1{,}0001 * \frac{df}{(d-f)}$. Ze zobrazených průběhů je zřejmá souvislost s hodnotami odvozenými ve vztazích (4-96), (4-97) a (4-98) a to sice v podobě zachování teoreticky odvozených poměrů intenzit. Z hlediska problematiky měření rozměrů není nutné modelovat tvar celého oka, naopak jako vhodnější se jeví modelovat pouze jednotlivé náběžné a sestupné hrany. Důvody proč tomu tak je, jsou diskutovány z různých hledisek v dalších částech textu. Detaily náběžných hran odezev modelu pro 4 uvedené hodnoty zaostření optické soustavy jsou zobrazeny na obr. 4.9. Z tohoto obrázku je ještě detailněji patrný společný průsečík všech přechodových hran v teoreticky odvozené hodnotě odpovídající vztahu (4-99). I přes různě rozostřený obraz je tedy možné na základě (4-99) určit přesnou polohu pozice obrysu předmětu v jeho obraze. Dalším důležitým faktem patrným z průběhu přechodových hran je jejich délka. Je zřejmé, že v případě „příliš“ kvalitního zaostření optické soustavy odpovídajícímu například křivce pro $z = 1{,}00001 * \frac{df}{(d-f)}$ je průběh přechodové hrany realizován pouze v rámci $1\,\mu\text{m}$. Reálné rozměry světlocitlivých buněk CCD snímačů odpovídajících jednomu pixelu v obraze jsou v řádu jednotek μm.

[5] Hodnota d=0,075m odpovídá pracovní vzdálenosti telecentrického objektivu použitého v prototypu měřicího systému.



Obr. 4.8 Odezva fyzikálního modelu (4-87) při zobrazení předmětu zájmu $X = 200\,\mu\text{m}$, telecentrickou optickou soustavou v předmětovém prostoru. Parametry modelu: $d = 0{,}075\,\text{m}$; $f = 0{,}0375\,\text{m}$, $\lambda = 630\,\text{nm}$; z viz legenda, kde $z = 1{,}001*...$ odpovídá zaostřením dle $z = [1{,}001;1{,}0001]*\frac{df}{(d-f)}$



Obr. 4.9 Detail náběžných hran fyzikálního modelu pro různé úrovně zaostření obrazu (viz legenda, kde $z = 1{,}001*...$ odpovídá zaostření $z = 1{,}001*\frac{df}{(d-f)}$. Náběžné hrany se pro různé úrovně zaostření obrazu protínají právě v bodě odpovídajícímu vztahu (4-99)

V případě kamery použité v měřicím systému Tester2D jsou rozměry světlocitlivé buňky CCD snímače odpovídající jednomu pixelu rovny $6{,}7\,\mu\mathrm{m} \times 6{,}7\,\mu\mathrm{m}$. Uvedená situace by tedy znamenala, že minimální informace o přechodové hraně nutná pro proložení fyzikálního modelu by byla ztracena v rámci jednoho pixelu. V tomto případě proto mírné rozostření obrazu paradoxně umožňuje přesnější subpixelovou detekci pozice obrysu předmětu v jeho obraze. Důležité však zůstává dodržení podmínky (4-58) vyžadující ostření mezi předmět zájmu a optickou soustavu. Jak bude ukázáno v další kapitole, kromě rozostření obrazu lze pro rozprostření přechodové hrany do více pixelů s výhodou použít i možnosti *příčného zvětšení* obrazu optickou soustavou.

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}. Bylo odvozeno, že při použití telecentrického osvětlení s paprsky majícími menší rozbíhavost než je dosahováno vlivem telecentrické clony *A*, platí vztah (4-26). Při jeho odvození se vycházelo z předpokladu rovnoměrného zvětšení a zmenšení předmětové vzdálenosti kolem ideální předmětové vzdálenosti odpovídající poloze snímací roviny na ose *z* v obrazovém prostoru dle (4-6). Z podmínky (4-58) je zřejmé, že model optického zobrazení (4-87) je možné použít pouze při ostření před předmětovou rovinu (u 3D předmětů je to do oblasti směrem mezi objektiv a povrch předmětu). Na základě těchto skutečností a vztahu (4-26) lze stanovit hloubku předmětového pole platného pro model zobrazení (4-87) následujícím způsobem

$$H_{PP} = \Delta d = \frac{C\left(d_P - f\right)}{2\,f tg\,\theta_s}, \tag{4-100}$$

kde d_P odpovídá předmětové rovině, z níž je vytvářen ideálně ostrý obraz v rovině snímače d_S, C a θ_s jsou definovány výše. Pro Δd musí podle (4-58) platit

$$\Delta d \geq 0\,. \tag{4-101}$$

Pomocí *Gaussovy zobrazovací rovnice* (4-6) a vztahu pro příčné zvětšení (4-9) lze (4-100) přepsat do podoby

$$H_{PP} = \Delta d = \frac{Cf}{2\left(d_S - f\right)tg\,\theta_s} = \frac{C}{2Mtg\,\theta_s}\,. \tag{4-102}$$

Mezní vzdálenost v předmětové rovině, pro kterou je vytvořen ve snímací rovině rozptylový kroužek průměru *C*, je dána vztahem

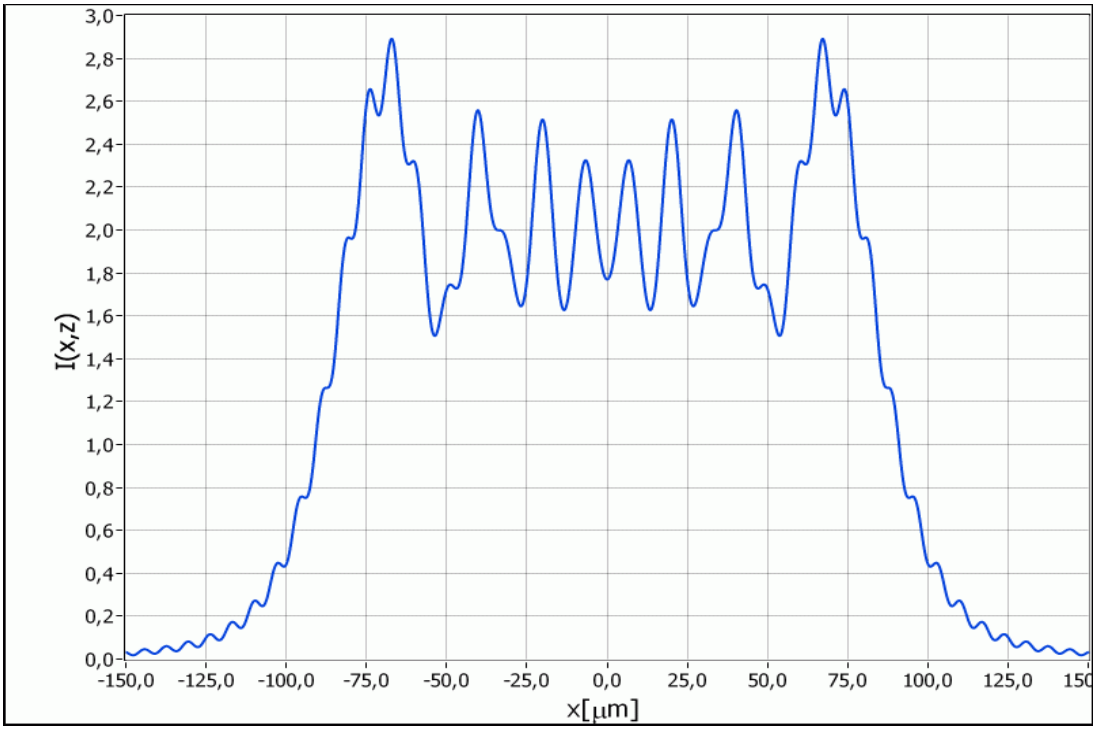
$$d_{\max} = d_P + \Delta d = \frac{C\left(d_P - f\right)}{2\,f tg\,\theta_s} + d_P\,, \tag{4-103}$$

případně při respektování vztahu pro příčné zvětšení (4-9) lze psát

$$d_{\max} = d_P + \Delta d = \frac{1}{M}\left(\frac{C}{2tg\,\theta_S} + d_S\right). \tag{4-104}$$

Průměr rozptylového kroužku C je v klasickém pojetí fotografie určené pro vnímání lidským okem stanoven dohodou, přičemž se vychází z psychosomatického modelu lidského oka. V metrologických aplikacích není obraz vytvářený kamerou určený pro lidské oko, ale pro detailní matematické vyhodnocení. Při určení maximálního povoleného rozptylového kroužku lze vyjít přímo z parametrů použité CCD kamery. Jako maximální povolená volba C se jeví hodnota průměru kružnice vepsané jedné světlocitlivé buňce snímací kamery. Díky této volbě může dojít maximálně k rozprostření bodu z prostorové roviny do rozměru jednoho pixelu (minimální fyzické jednotky snímače) v obrazové rovině. Důležitým faktem nadále zůstává výše odůvodněná soustřednost kruhové stopy vzhledem ke skutečné pozici obrazu bodu z předmětové roviny.

Pro názornost je vhodné uvést na příkladu blízkém reálnému, v praktické části práce použitému zobrazovacímu systému, jaká bude odezva fyzikálního modelu zobrazení (4-87) při volbě maximální přípustné velikosti rozptylového kroužku. Přepokládejme oko velikosti $X = 200\,\mu\text{m}$, maximální rozbíhavost paprsků zdroje telecentrického osvětlení $\theta = 1.10^{-3}\,\text{rad}$, přípustnou velikost rozptylových kroužků odpovídající rozměru jednoho pixelu zobrazovací CCD kamery $C = 6{,}7\,\mu\text{m}$, ohniskovou vzdálenost vstupní čočky $f = 0{,}0375\,\text{m}$ a pracovní vzdálenost objektivu $d_p = d_S = 0{,}075\,\text{m}$. Ze vztahu (4-103) je výpočtem stanoveno $d_{\max} = 0{,}07835\,\text{m}$. Průběh odezvy fyzikálního modelu zobrazení (4-87) pro tyto parametry je uveden na



Obr. 4.10 Odezva fyzikálního modelu zobrazení (4-87) pro maximální dovolenou hloubku ostrosti dle (4-100), $X = 200\,\mu\text{m}$, $C = 6{,}7\,\mu\text{m}$, $f = 0{,}0375\,\text{m}$, $\theta = 1.10^{-3}\,\text{rad}$, $d_p = d_S = 0{,}075\,\text{m}$ a $d_{\max} = 0{,}07835\,\text{m}$

obr. 4.10. Z tohoto obrázku je očividné, že hranový přechod modelu je již poměrně výrazně pozvolný, v délce asi $50\,\mu m$, avšak přesná pozice předmětové hrany v obraze stále odpovídá vztahu (4-99). Ostření na předmět zájmu lze tedy provádět automaticky i intuitivně v daném rozsahu stanoveném hloubkou předmětového pole (4-100), neboť ostrost obrazu nemá v mezích daných H_{PP} přímý vliv na přesnost určení pozice hrany. Jak již bylo uvedeno, jistá úroveň rozostření je naopak nezbytná, aby bylo možné získat přechodovou hranu předmětu zájmu zobrazenou v dostatečném počtu pixelů snímací kamery pro její optimalizovanou aproximaci modelující funkcí přechodové hrany (viz následující kapitoly).

4.3.3 Posouzení vlivu příčného zvětšení na odezvu fyzikálního modelu zobrazení

V doposud uvedených příkladech byly voleny takové poměry *z (d*$_S$*, d´), f* a *d*, pro něž bylo příčné zvětšení *M* definované dle (4-9) rovno 1. Z definice příčného zvětšení (4-9) a z definic parametrů *Fresnelových integrálů* (4-78), (4-79) je zřejmá neodmyslitelná souvislost. Vzájemnou změnou poměrů umístění snímací roviny a předmětové roviny na ose *z* vůči ohnisku *f* tenké čočky, lze dosáhnout různé úrovně příčného zvětšení (4-9) při zachování ostrého obrazu (4-6). Vztah (4-78) lze vhodnou úpravou pomocí (4-6), (4-9), při uvážení obdobnosti $z, d_1´$ a d_S v jednotlivých vztazích a při dodržení podmínky (4-58), respektive (4-101), přepsat do podoby

$$d_{X+} = \sqrt{\frac{k_0\left(M\left(X/2\right)+x\right)^2}{2M^2\Delta d}}\ ,\ \text{pro}\ \ \frac{M\left(X/2\right)+x}{M} \geq 0\ ,$$

$$d_{X+} = -\sqrt{\frac{k_0\left(M\left(X/2\right)+x\right)^2}{2M^2\Delta d}}\ ,\ \text{pro}\ \ \frac{M\left(X/2\right)+x}{M} < 0\ .$$

(4-105)

Dosazením (4-104) za Δd do (4-105) je získáno[6]

$$d_{X+} = \sqrt{\frac{k_0 tg\theta_S\left(M\left(X/2\right)+x\right)^2}{MC}}\ ,\ \text{pro}\ \ \frac{M\left(X/2\right)+x}{M} \geq 0\ ,$$

$$d_{X+} = -\sqrt{\frac{k_0 tg\theta_S\left(M\left(X/2\right)+x\right)^2}{MC}}\ ,\ \text{pro}\ \ \frac{M\left(X/2\right)+x}{M} < 0\ .$$

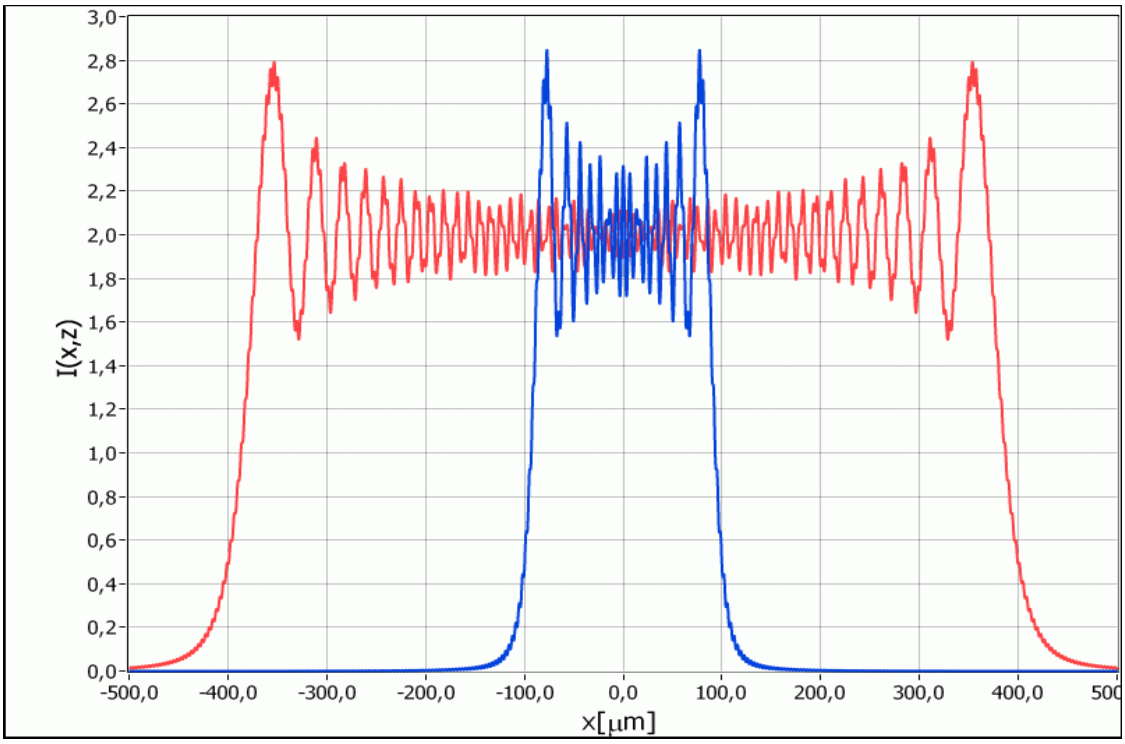
(4-106)

Pro názornost dokreslení vlivu příčného zvětšení je na obr. 4.11 zobrazena odezva fyzikálního modelu při zobrazení předmětu zájmu velikosti $X = 200\,\mu\text{m}$. Modře je zobrazen průběh odpovídající příčnému zvětšení *M*=1, červeně průběh odpovídající příčnému zvětšení *M*=4, zaostření optické soustavy odpovídá posuvu ostřící vzdálenosti do ½ vzdálenosti mezi d_P a $d_{\max}$, neboli $C = 3{,}45\,\mu\text{m}$ - polovina pixelu. Na obr. 4.12 je zobrazen detail náběžných hran, ze kterého je patrné, že vlivem příčného zvětšení došlo k rozprostření přechodové hrany do větší délky, avšak body odpovídající předpokládaným souřadnicím obrysových bodů předmětu

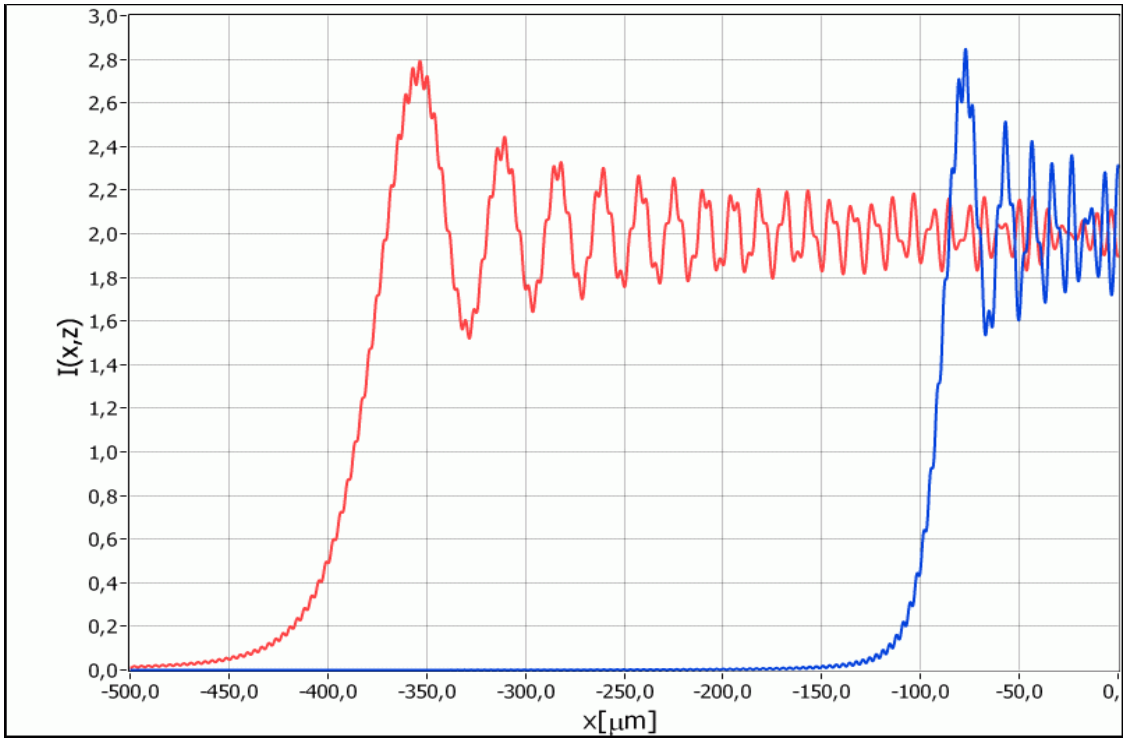
$$x_{edge} = \pm MX/2\ , \qquad (4\text{-}107)$$

si nadále zachovaly odpovídající poměr maximální ustálené intenzity, dle vztahu (4-99). Lze tedy říci, že příčné zvětšení obrazu nemá negativní vliv na přesnost detekce obrazového bodu hrany předmětu dle (4-99).

[6] Definice úhlu θ_S je provedena na Obr. 4.5. Z principu je zřejmé, že bude nabývat malých kladných hodnot v řádech mrad.



Obr. 4.11 Odezva fyzikálního modelu zobrazení (4-87) s následujícími parametry $X = 200\,\mu\text{m}$, $C = 3{,}45\,\mu\text{m}$, $f = 0{,}0375\,\text{m}$, $\theta = 1.10^{-3}$ rad. **a)** M=1 modrá křivka, **b)** M=4 červená křivka



Obr. 4.12 Detail náběžných hrana odezvy fyzikálního modelu zobrazení (4-87) s následujícími parametry $X = 200\,\mu\text{m}$, $C = 3{,}45\,\mu\text{m}$, $f = 0{,}0375\,\text{m}$, $\theta = 1.10^{-3}$ rad. **a)** M=1 modrá křivka, **b)** M=4 červená křivka

4.4 Odvození fyzikálního modelu přechodové hrany v obraze

Jak bylo uvedeno výše, z hlediska práce s reálnými obrazy není vhodné modelovat celý tvar oka síta, ale pouze jednotlivé náběžné (sestupné hrany). Na tom, zda je zvolen model náběžné nebo sestupné hrany vzhledem k symetrii problému nezáleží. Pro oba případy lze vstupní data připravit do vhodné podoby jednoduchým převrácením pole vstupních hodnot. Přechod od fyzikálního modelu zobrazení předmětu zájmu (4-86), respektive od jeho jednorozměrné podoby (4-87) k modelu hrany lze provést formou diskuze argumentů *Fresnelových integrálů* pro okolí vybraného obrazového bodu hrany předmětu. Z obr. 4.7 je patrné, že v případě *Fresnelových integrálů* je možné přechodový děj považovat za dostatečně ukončený pro hodnoty argumentu

$$|x| \geq 1{,}5\,. \tag{4-108}$$

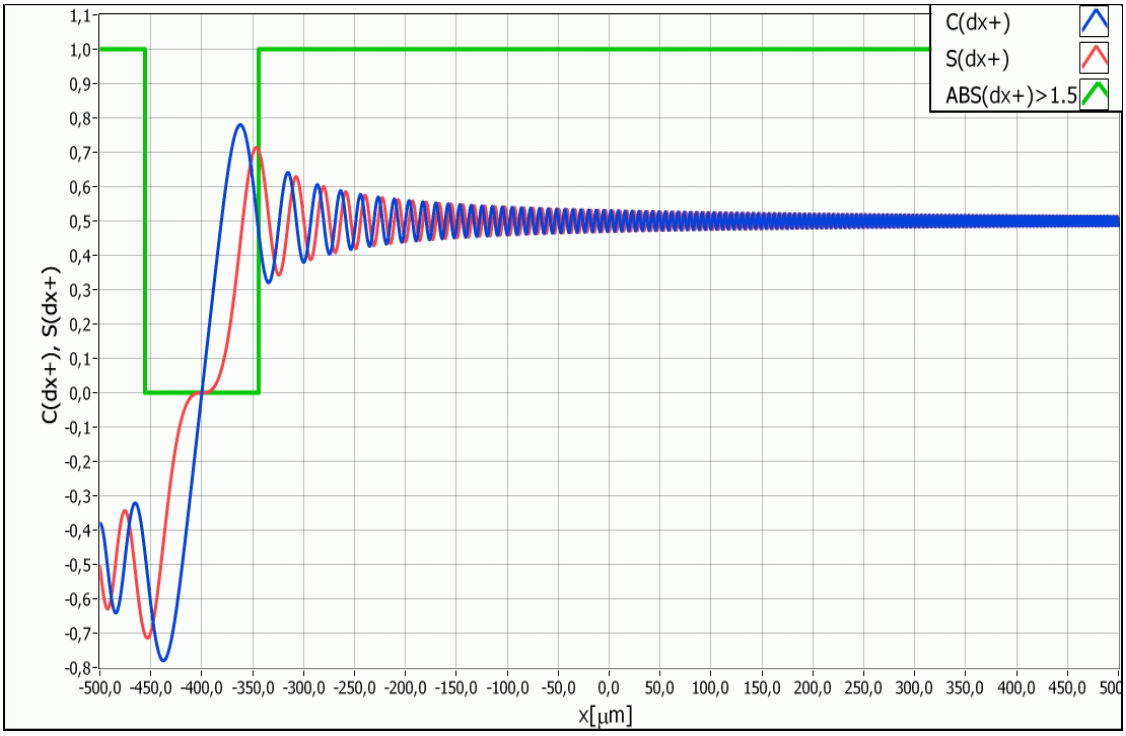
Pro tyto hodnoty již *Fresnelovy integrály* konvergují k $\pm\frac{1}{2}$. Obdobně lze pro absolutní hodnotu argumentů (4-55), (4-56) *Fresnelových integrálů* v modelu psát

$$\begin{gathered} |d_{X+}| \geq 1{,}5 \\ \sqrt{\frac{k_0 tg\theta_S \left(M\left(X/2\right)+x\right)^2}{MC}} > 1{,}5 \end{gathered}\,. \tag{4-109}$$

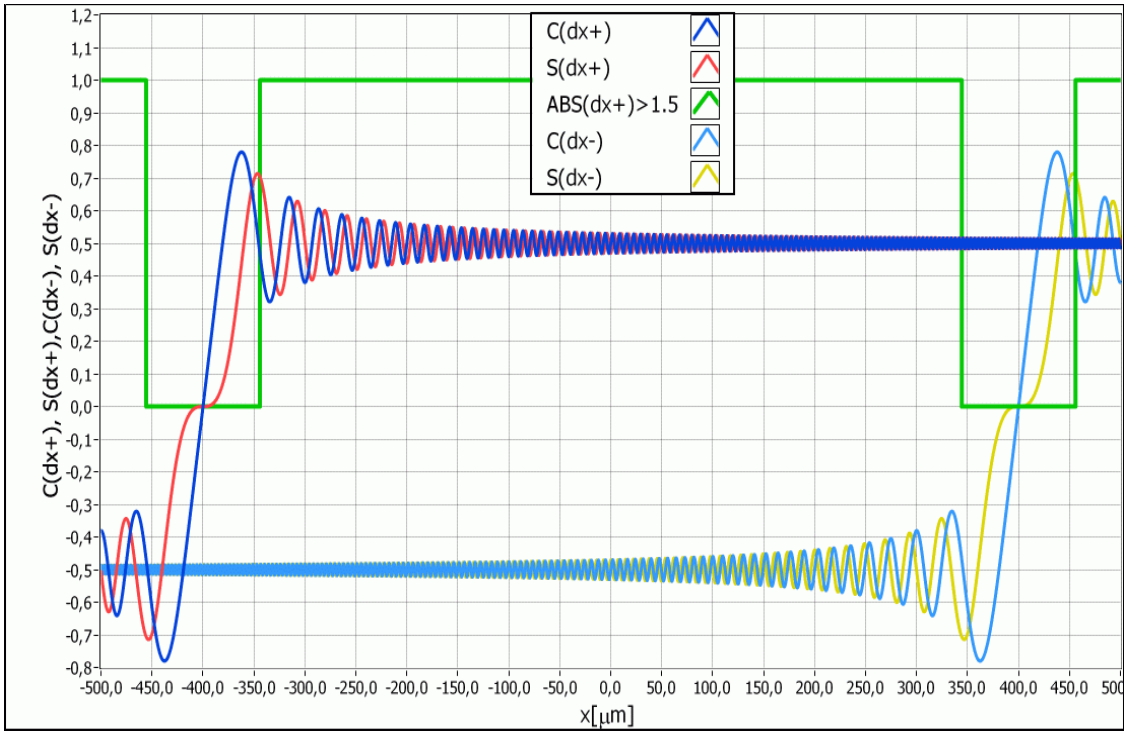
Řešením nerovnice je interval

$$x < -\frac{k_0 tg\theta_S MX + 3\sqrt{k_0 tg\theta_S MC}}{2k_0 tg\theta_S} \wedge x > -\frac{k_0 tg\theta_S MX - 3\sqrt{k_0 tg\theta_S MC}}{2k_0 tg\theta_S}\,. \tag{4-110}$$

Pro názornost je na obr. 4.13 vykreslen průběh hodnot *Fresnelových integrálů* parametru d_{X+} dle (4-106) a platnosti podmínek (4-110). Pro výpočet jsou použity stejné parametry modelu zobrazování jako v případě obr. 4.12. Křivka platnosti podmínek (4-110) má zelenou barvu. Nabývá hodnotu 1 pro oblasti, v nichž jsou podmínky splněny a 0 pro oblast, ve které splněny nejsou. V oblastech se splněnou podmínku můžeme dle výše uvedené analýzy hodnot *Fresnelových integrálů* integrály aproximovat hodnotou $\pm\frac{1}{2}$. Z uvedeného obrázku je jasně patrný vliv tenké čočky ve fyzikálním modelu (4-87). Čočka obrací poloroviny, tj. bod se souřadnicí $x = X/2$, nacházející se v předmětové rovině v kladné poloose osy *x*, vytváří v obrazové rovině bod nacházející se v záporné poloose osy *x*, konkrétně pak v bodě $x = -MX/2$. Dále je z obrázku zřejmé, že v místě obrazu předmětového bodu $x = -X/2$, tedy v obrazovém bodě $x = MX/2$ již budou hodnoty Fresnelových integrálů z bodu



Obr. 4.13 Zobrazení hodnot Fresnelových integrálů fyzikálního modelu zobrazení (4-87) pro parametr d_{X+} spolu s podmínkou aproximace (4-110)



Obr. 4.14 Zobrazení hodnot Fresnelových integrálů fyzikálního modelu zobrazení (4-87) pro parametry d_{X+}, d_{X-} spolu s průběhem odpovídajících podmínek aproximace

$x = X/2$ aproximovatelné $\frac{1}{2}$ se zanedbatelnou chybou. Čím kvalitněji bude obraz zaostřen, tím menší bude chyba uvedené aproximace. Přitom je nutné dodržet výše uvedený požadavek na dostatečný počet pixelů (nejméně tři) připadající na délku přechodové hrany, aby bylo možné přechodovou hranu dostatečně kvalitně modelem aproximovat (viz dále). Vzhledem k symetrii problému by stejná analýza provedená pro parametr d_{X-} poskytla ekvivalentní závěry. Souborný výsledek analýz pro d_{X+} a d_{X-} je zobrazen na obrázku obr. 4.14.

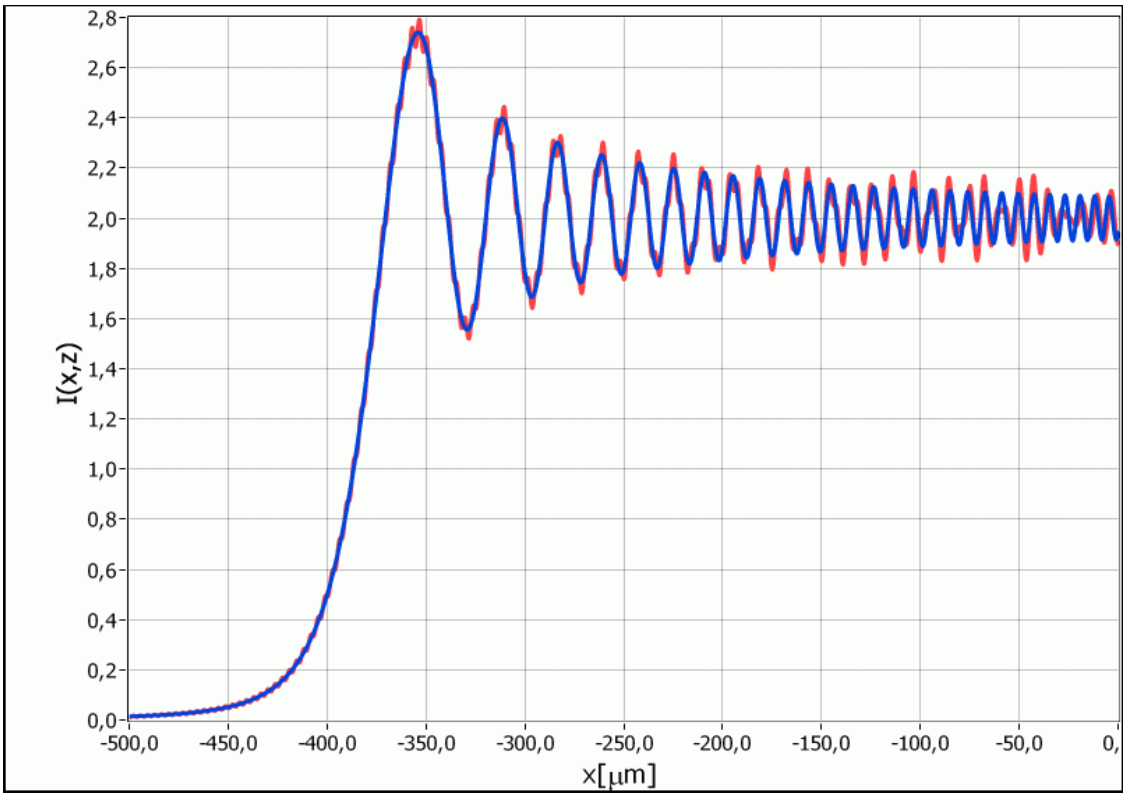
Z výše uvedeného je evidentní možnost realizovat fyzikální model hrany ve dvou symetrických podobách (náběžná/sestupná) a to následujícím způsobem. Pro fyzikální model sestupné hrany lze na základě (4-87) a provedené diskuze psát

$$I_m(x) = \left(\frac{1}{2} - \mathcal{C}(d_{X-})\right)^2 + \left(\frac{1}{2} - \mathcal{S}(d_{X-})\right)^2 . \qquad (4\text{-}111)$$

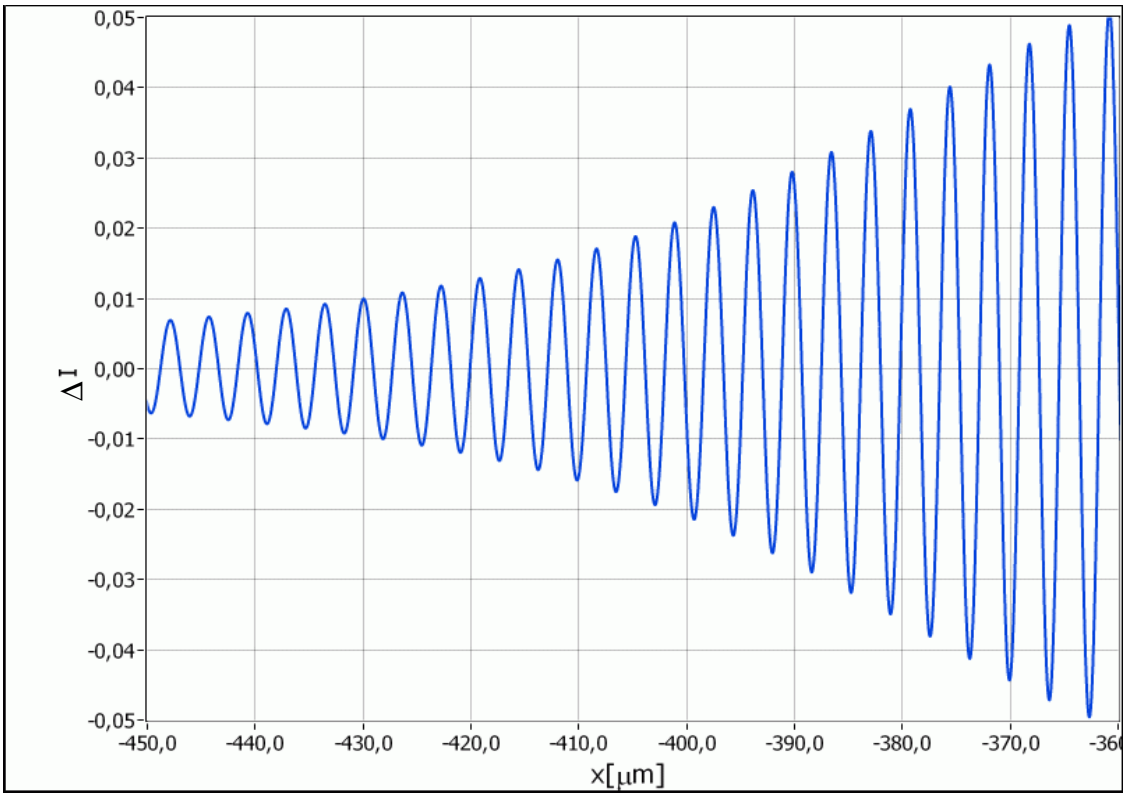
Náběžnou hranu je možné definovat jako

$$I_m(x) = \left(\mathcal{C}(d_{X+}) - \frac{1}{2}\right)^2 + \left(\mathcal{S}(d_{X+}) - \frac{1}{2}\right)^2 . \qquad (4\text{-}112)$$

Na obr. 4.15 je zobrazeno srovnání odezvy náběžné hrany fyzikálního modelu zobrazení dle (4-87) a odezvy fyzikálního modelu náběžné hrany dle (4-112). Odezvy obou modelů přísluší velikosti předmětu zájmu $X = 200\,\mu\text{m}$ a následujícím parametrům zobrazovací soustavy $C = 3{,}45\,\mu\text{m}$, $f = 0{,}0375\,\text{m}$, $M = 4$, $\theta = 1.10^{-3}\,\text{rad}$. Pro posouzení chyby aproximace lze použít obecně platné vztahy definující výpočet absolutní a relativní chyby, avšak vzhledem ke specifiku řešeného problému má vyšší vypovídací hodnotu přímý rozdíl hodnot obou modelů. Průběh této rozdílové funkce je pro oblast přechodové hrany zobrazen na obr. 4.16. Je z něj zřejmá periodicita kladné a záporné odchylky modelů způsobená aproximací vlivů protější přechodové hrany hodnotou $\frac{1}{2}$ (viz srovnání modelů (4-87) a (4-112)). Důležitým faktem zůstává skutečnost, že i pro poměrně rozostřený obraz z uvedeného příkladu je perioda kladných a záporných maxim natolik vysoká, že na velikost odpovídající jednomu pixelu připadá několik záporných a kladných maxim, což způsobí vzájemnou kompenzaci jejich vlivu v rámci jednoho pixelu. Díky tomu se systematická chyba aproximace v reálném obraze neprojeví nebo bude její vliv zcela zanedbatelný. S rostoucí kvalitou zaostření obrazu dochází k dalšímu zvyšování periody záporných a kladných půlvln a vliv chyby aproximace nadále klesá.



Obr. 4.15 Srovnání odezvy náběžné hrany fyzikálního modelu zobrazení dle (4-87) – červeně a odezvy fyzikálního modelu náběžné hrany dle (4-112) – modře, pro výše uvedené parametry zobrazovací soustavy



Obr. 4.16 Rozdíl hodnot odezev náběžných hran fyzikálního modelu zobrazení dle (4-87) a fyzikálního modelu náběžné hrany dle (4-112)

Pro dokončení úplné teoretické analýzy modelu zobrazování je vhodné stanovit teoretickou závislost parametrů modelu zobrazování (M, f, θ_s, C) a minimálního možného měřeného rozměru X předmětu zájmu. Při stanovení dané závislosti lze vyjít z absolutní hodnoty vztahu (4-106). Dosazením souřadnice $x = MX/2$ do (4-106) přejde vztah po úpravách do podoby

$$|d_{X+}| = \sqrt{\frac{k_0 tg\theta_S MX^2}{C}}. \tag{4-113}$$

Při respektování podmínky (4-108) se získá

$$X > \frac{1{,}5\sqrt{k_0 tg\theta_S MC}}{k_0 tg\theta_S M}. \tag{4-114}$$

Tento vztah představuje teoretické omezení minimální velikosti měřeného předmětu v závislosti na parametrech použitého zobrazovacího systému a požadavcích na maximální přípustné rozostření obrazu. V praxi je nutné vzít v potaz i konečnou velikost pixelů snímací kamery, vzhledem k nutnosti zajištění dostatečného množství pixelů (jasových hodnot) pro aproximaci přechodové hrany.

5 NÁVRH METODY APROXIMACE PŘECHODOVÉ HRANY V OBRAZE ODVOZENÝM FYZIKÁLNÍM MODELEM

Následující část textu je věnována úpravě fyzikálního 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 fyzikální model přechodové hrany (4-112) obsahuje *Fresnelovy integrály* definované dle (4-55), (4-56). *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. Důležitým faktem vyplývajícím z výše provedených analýz (např. obr. 4.14) je skutečnost, že na tvorbě přechodové hrany v modelu (4-112) se podílí výhradně přechodové děje *Fresnelových integrálů*. Délku trvání přechodového děje *Fresnelových integrálů* lze na základě obr. 4.7 stanovit v souladu s (4-108). Pro definici modelující funkce přechodové hrany v obraze, respektující (4-112), je proto dostačující být schopen přesné aproximace *Fresnelových integrálů* v oblasti přechodového děje. Jak již bylo uvedeno, z implementačního hlediska je nejvhodnější získat modelující funkci přechodové hrany ve formě polynomu. Tomuto požadavku optimálně vyhovuje metoda aproximace *Fresnelových integrálů* uvedená v [13] a [14], která pro oblast argumentu x, $0 \le |x| \le 1{,}6008$ aproximuje *Fresnelovy integrály* pomocí racionálních lomených funkcí následovně.

$$S(x) = x^3 \frac{SN\left(x^4\right)}{SD\left(x^4\right)}, \tag{5-1}$$

kde funkce $SN(t)$ a $SD(t)$ jsou definovány jako

$$\begin{aligned} SN(t) = {} & 3{,}18016297876567817986 \cdot 10^{11} - 4{,}42979518059697779103 \cdot 10^{10} t \\ & + 2{,}54890880573376359104 \cdot 10^{9} t^2 - 6{,}29741486205862506537 \cdot 10^{7} t^3 , \\ & + 7{,}08840045257738576863 \cdot 10^{5} t^4 - 2{,}99181919401019853726 \cdot 10^{3} t^5 \end{aligned} \tag{5-2}$$

$$SD(t) = 6{,}07366389490084639049 \cdot 10^{11} + 2{,}24411795645340920940 \cdot 10^{10} t + \\ + 4{,}19320245898111231129 \cdot 10^{8} t^2 + 5{,}17343888770096400730 \cdot 10^{6} t^3 + \\ + 4{,}55847810806532581675 \cdot 10^{4} t^4 + 2{,}81376268889994315696 \cdot 10^{2} t^5 + t^6 \tag{5-3}$$

$$C(x) = x \frac{CN(x^4)}{CD(x^4)}, \tag{5-4}$$

kde funkce $CN(t)$ a $CD(t)$ jsou definovány jako

$$CN(t) = 9{,}99999999999999998822 \cdot 10^{-1} - 2{,}05525900955013891793 \cdot 10^{-1} t + \\ + 1{,}88843319396703850064 \cdot 10^{-2} t^2 - 6{,}45191435683965050962 \cdot 10^{-4} t^3 + , \\ + 9{,}50428062829859605134 \cdot 10^{-6} t^4 - 4{,}98843114573573548651 \cdot 10^{-8} t^5 \tag{5-5}$$

$$CD(t) = 1{,}00000000000000000118 + 4{,}12142090722199792936 \cdot 10^{-2} t + \\ + 8{,}68029542941784300606 \cdot 10^{-4} t^2 + 1{,}22262789024179030997 \cdot 10^{-5} t^3 + \\ + 1{,}25001862479598821474 \cdot 10^{-7} t^4 + 9{,}15439215774657478799 \cdot 10^{-10} t^5 + \\ + 3{,}99982968972495980367 \cdot 10^{-12} t^6 \tag{5-6}$$

Střední kvadratická odchylka uvedeného způsobu aproximace *Fresnelových integrálů* se oproti jiným způsobům jejich výpočtu pohybuje v řádu 1.10^{-16} dle [13].

Aplikací vztahů (5-1) až (5-6) na model přechodové hrany (4-112) a úpravami v programu Maple lze dosáhnout podoby racionální lomené funkce polynomů 96. řádu. Jak se ukázalo v průběhu testování metody optimalizované aproximace (viz níže) je pro použitou optimalizační metodu vhodnější následující tvar modelující funkce přechodové hrany

$$I_{M_edge}(x) = 0{,}25 * \left(\left(\frac{P_A(d_{X+})}{Q_A(d_{X+})} \right)^2 + \left(\frac{P_B(d_{X+})}{Q_B(d_{X+})} \right)^2 \right), \tag{5-7}$$

kde d_{X+} je definováno vztahem (4-78) a

$$P_A(t) = 3{,}99982969 \cdot 10^{8} t^{24} - 9.976862291 \cdot 10^{12} t^{21} + 9{,}154392158 \cdot 10^{10} t^{20} + \\ + 1{,}900856126 \cdot 10^{15} t^{17} + 1{,}250018625 \cdot 10^{13} t^{16} - 1{,}290382871 \cdot 10^{17} t^{13} + \\ + 1{,}222627890 \cdot 10^{15} t^{12} + 3{,}776866388 \cdot 10^{18} t^{9} + +8{,}680295429 \cdot 10^{16} t^{8} - \\ - 4{,}11051819 \cdot 10^{19} t^{5} + 4{,}121420907 \cdot 10^{18} t^{4} + 2 \cdot 10^{20} t + 1 \cdot 10^{20} \tag{5-8}$$

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

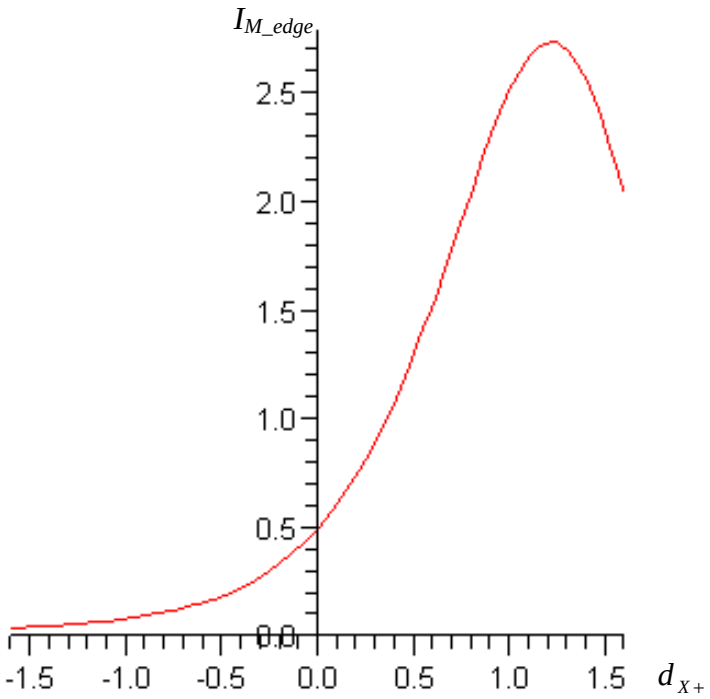
$$P_B(t) = 1{,}250000000 \cdot 10^7 t^{24} - 7{,}479547985 \cdot 10^{10} t^{23} + 3{,}517203361 \cdot 10^9 t^{20} + \\ + 1{,}772100113 \cdot 10^{13} t^{19} + 5{,}698097635 \cdot 10^{11} t^{16} - 1{,}574353716 \cdot 10^{15} t^{15} + \\ + 6{,}46679861 \cdot 10^{13} t^{12} + 6{,}372272015 \cdot 10^{16} t^{11} + 5{,}241503075 \cdot 10^{15} t^8 - , \\ - 1{,}10748795 \cdot 10^{18} t^7 + 2{,}805147446 \cdot 10^{17} t^4 + 7{,}950407445 \cdot 10^{18} t^3 + \\ + 7{,}592079870 \cdot 10^{18} \quad (5\text{-}10)$$

$$Q_B(t) = 1{,}250000000 \cdot 10^7 t^{24} + 3{,}517203361 \cdot 10^9 t^{20} + 5{,}698097635 \cdot 10^{11} t^{16} + \\ + 6{,}466798610 \cdot 10^{13} t^{12} + 5{,}241503075 \cdot 10^{15} t^8 + 2{,}805147446 \cdot 10^{17} t^4 + . \\ + 7{,}592079870 \cdot 10^{18} \quad (5\text{-}11)$$

Modelující funkce přechodové hrany založená na polynomiální aproximaci přechodových oblastí *Fresnelových integrálů* je platná v rozsahu hodnot argumentu

$$|d_{X+}| \le 1{,}6008. \quad (5\text{-}12)$$

Průběh odezvy modelující funkce v tomto rozsahu je zobrazen na obr. 5.1.

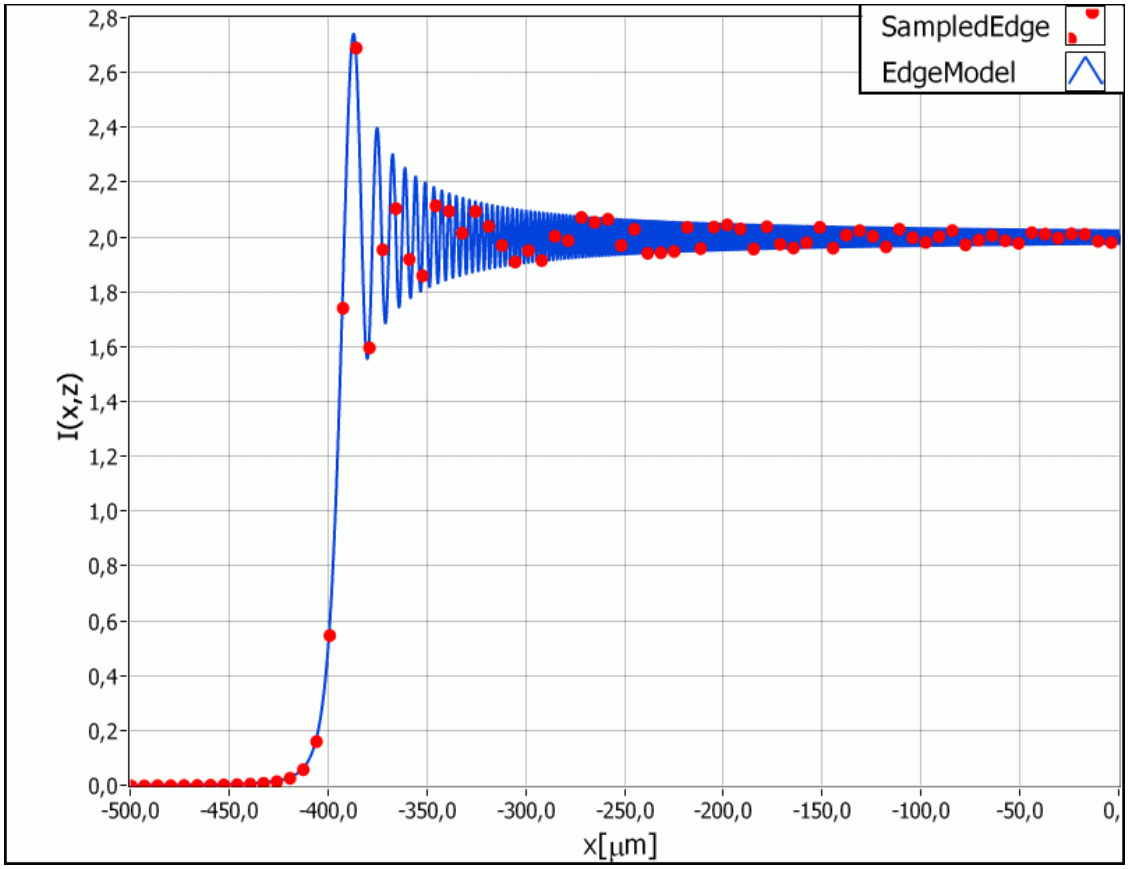


Obr. 5.1 Průběh polynomiální modelující funkce přechodové hrany (5-7)

5.2 Vliv vzorkování obrazu přechodové hrany CCD snímačem

5.2.1 Teoretický vliv vzorkování fyzikálního modelu

Jak bylo uvedeno výše, je předpokládáno použití kamery s čtvercovými světlocitlivými buňkami velikosti $6{,}7\,\mu\text{m}$. Pro základní představu vlivu CCD snímače lze předpokládat ideální vzorkování nekonečně tenkými pulzy vzdálenými od sebe právě o tuto vzdálenost. Jeden z možných výsledků vzorkování je uveden na obr. 5.2. V případě reálného procesu měření je situace opačná. Ze snímku jsou získány hodnoty jasu jednotlivých pixelů přechodové hrany a pro přesné určení subpixelové pozice hrany dle (4-99) je nejprve nutné proložit získanými body křivku odpovídající modelu přechodové hrany (4-112), respektive modelující funkci (5-7). Z obrázku je zřejmé, že od určitého kmitočtu zákmitů v propustné části předmětu může docházet k nedodržení vzorkovacího teorému [9] a tím k podvzorkování dat. Zároveň je z něj patrné, že

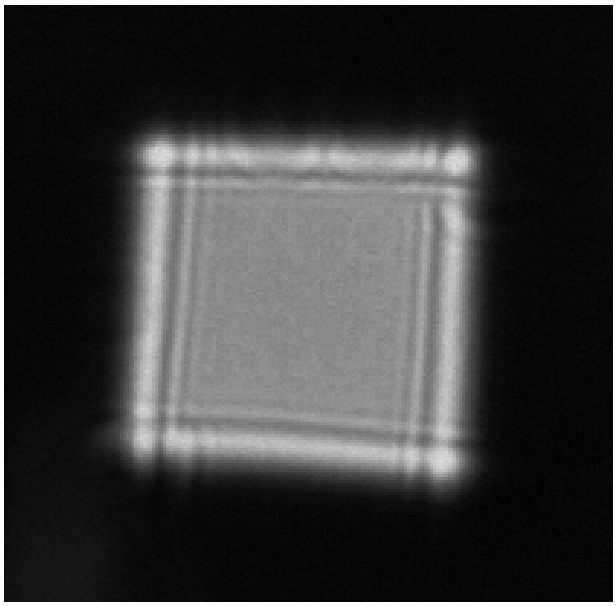


Obr. 5.2 Ideální vzorkování modelu přechodové hrany (4-112) s parametry $d' = 0{,}1875\,\text{m}$, $d = 0{,}04691\,\text{m}$ $f = 0{,}0375\,\text{m}$, $M = 4$, $\theta = 1.10^{-3}$ rad, snímačem s velikostí pixelu $6{,}7\,\mu\text{m}$

v tomto případě pixel s maximální hodnotou jasu není součástí náběžné hrany přechodu, ale naopak sestupné části prvního zákmitu v opticky propustné oblasti. V případě nevhodně zvoleného způsobu aproximace modelující funkce intenzitními body by mohlo dojít k nepřesnému určení pozice hrany. Na základě obr. 4.9 je možné usuzovat, že k podvzorkování bude docházet s větší pravděpodobností pro ostřejší obrazy. V důsledku toho jsou data snímaná v propustné části předmětu nevhodná pro hledání optimálního proložení modelu (4-112), respektive není vhodné je zařazovat do procesu modelování hrany (5-7). Hodnotu jasu odpovídající ustálené hodnotě v opticky propustné části předmětu lze získat průměrováním dostatečného souboru jasových hodnot z opticky propustné části přiměřeně vzdálené od přechodové hrany. Tato hodnota slouží k normování jasového průběhu přechodové hrany z obrazu do rozsahu hodnot modelující funkce (5-7) a její nepřesné určení může mít neblahý vliv na přesnost určení pozice hrany.

5.2.2 Průběh jasu přechodové hrany z obrazu získaného reálným telecentrickým optickým systémem s CCD kamerou

Na obr. 5.4 je zobrazen průběh jasových hodnot v jednotlivých pixelech reálné přechodové hrany ze snímku (viz obr. 5.3) získaného pomocí definované telecentrické optické soustavy a CCD kamery. Záměrně byl zvolen značně rozostřený[7] obraz, aby bylo možné lépe zobrazit některé důležité skutečnosti.



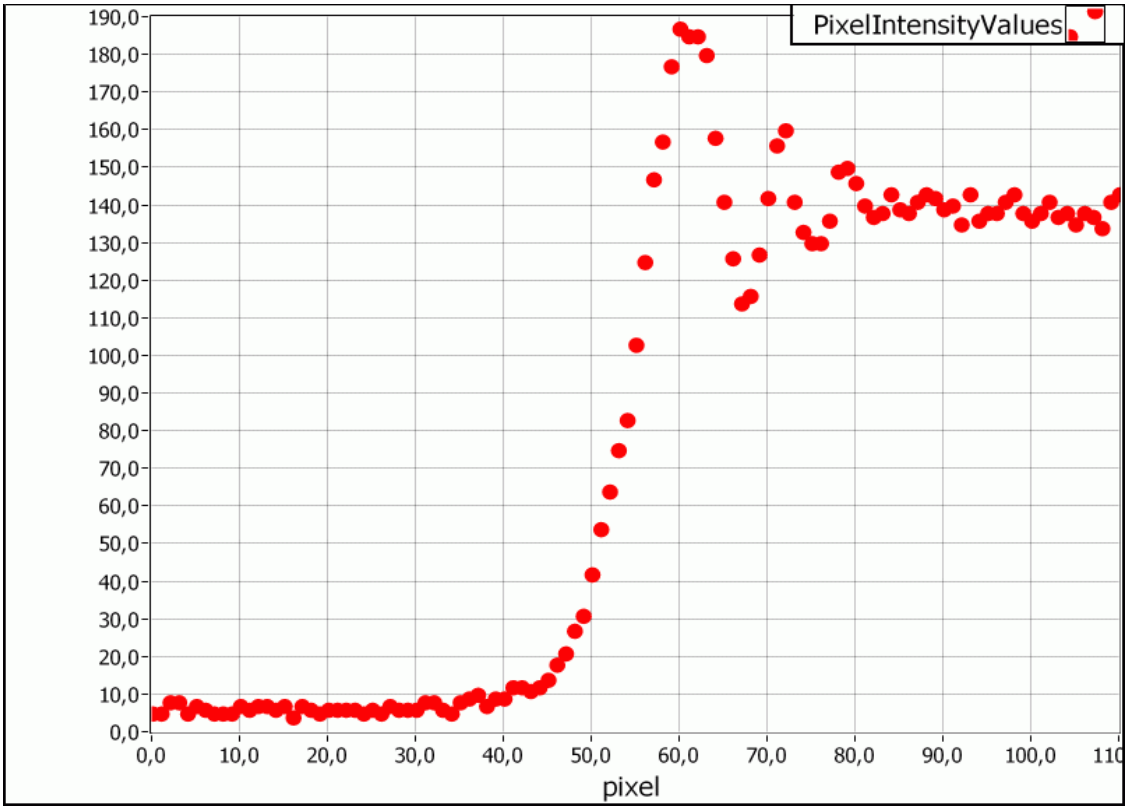
Obr. 5.3 Reálný snímek předmětu zájmu velikosti ($200\,\mu m$) při použití definované telecentrické soustavy a CCD kamery (úmyslně značně rozostřený)

[7] Metoda automatického ostření použitá ve vytvořeném měřicím systému pracuje s menším rozostřením obrazu. Teoreticky bylo prokázáno, že v definovaném rozsahu nemá rozostření obrazu negativní vliv na přesnost určení pozice hrany. V dalších částech práce je provedeno ověření této skutečnosti formou reálných měření etalonů při různých úrovních rozostření obrazu.

Reálný jasový profil získaný ze snímku na obr. 5.3 je zobrazen na obr. 5.4. Je zřejmé, že potvrzuje skutečnosti popsané při vzorkování syntetické přechodové hrany v předchozí kapitole

- *podvzorkování v opticky propustné části předmětu,*
- *možnost výpočtu ustálené hodnoty.*

Dále je z něj znatelný vliv aditivního šumu vznikajícího zejména tepelnou generací nosičů v CCD snímači. Projev aditivního šumu je významný především v části geometrického stínu, kde fyzikální model předpokládá monotónní, pozvolný náběh od hodnoty 0 (viz obr. 5.2). Oproti tomu v reálném jasovém přechodu výrazně kolísají hodnoty jasu v geometrickém stínu a proto nejsou vhodné pro přímou aproximaci modelující funkcí přechodové hrany. Relativní vliv aditivního šumu logicky klesá s hodnotou jasu generovaného primárními telecentrickými světelnými paprsky. Proto je žádoucí do procesu optimalizace aproximace modelující funkce přechodové hrany zahrnout pouze pixely s jasem vyšším než hodnota nezbytně nutná. Za nositele nezbytně nutné hodnoty jasu je přitom považován pixel s jasem bezprostředně nižším, než hodnota jasu odpovídající předpokládané pozici obrysového bodu předmětu zájmu dle (4-99).



Obr. 5.4 Reálný průběh hodnot jasu přechodové hrany v jednotlivých pixelech, získaný ze snímku sejmutého definovanou telecentrickou optickou soustavou a CCD snímačem s velikostí pixelu 6,7 μm

5.3 Metoda optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů přechodové hrany modelující funkcí

Z výše provedených analýz a teoretických odvození vyplývá nutnost aproximovat jasové hodnoty pixelů hranového přechodu pomocí z teorie vycházející funkce (4-112) založené na *Fresnelových integrálech*. *Fresnelovy integrály* jsou tzv. *vyšší transcendentní funkce*, tedy funkce, které nelze v konečném tvaru vyjádřit pomocí *elementárních funkcí*. Jak bylo dokázáno, na tvorbě obrazu přechodové hrany se podílí zejména hodnoty *Fresnelových integrálů* v intervalu $|x| \leq 1{,}5$ (viz kapitola 4.4). Pro daný rozsah byla odvozena modelující funkce hrany (5-7) využívající přesné polynomiální aproximace *Fresnelových integrálů* (5-1), (5-4) dle [13]. Z diskuze vlivu vzorkování optického pole v obrazové rovině CCD snímačem a poznatků z praxe byly vyvozeny apriorní informace pro návrh algoritmu optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů modelující funkcí (5-7). Tyto apriorní informace odůvodněně specifikují způsob výběru jasových hodnot (pixelů) hranového přechodu vhodných pro optimalizovanou aproximaci modelující funkcí. Pro odvození podoby vztahu (4-112), respektive (5-7) obsahujícího optimalizační parametry je vhodné opět vyjít z fyzikální reality. Ze vztahů (4-72), (4-69) a (4-70) lze po jednoduchém vytknutí psát

$$d_{X+} = \frac{b_2'}{\sqrt{a_2}}\left(\frac{a_2}{b_2'}\left(\frac{X}{2}\right) + x\right), \tag{5-13}$$

kde a_2 je nadále definováno vztahem (4-69) a

$$b_2' = \frac{k_0 f}{2(dz - df - fz)}. \tag{5-14}$$

Parametry a_2, b_2' jsou nezávislé na proměnné x, a proto lze po zavedení substituce

$$\kappa = \frac{b_2'}{a_2},\ \tau = \frac{a_2}{b_2'}\left(\frac{X}{2}\right), \tag{5-15}$$

přepsat vztah (5-13) do podoby

$$d_{X+} = \kappa(\tau + x). \tag{5-16}$$

Následně je možné přepsat vztah (5-7) jako

$$I_{M_edge}(x) = 0{,}25 * \left(\left(\frac{P_A(\kappa(\tau + x))}{Q_A(\kappa(\tau + x))}\right)^2 + \left(\frac{P_B(\kappa(\tau + x))}{Q_B(\kappa(\tau + x))}\right)^2\right). \tag{5-17}$$

Tento vztah ztělesňuje modelující funkci přechodové hrany určenou k optimalizované aproximaci pixelové přechodové hrany. κ, τ představují optimalizační parametry pro proces aproximace CCD snímačem navzorkované přechodové hrany modelující funkcí (5-17).

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

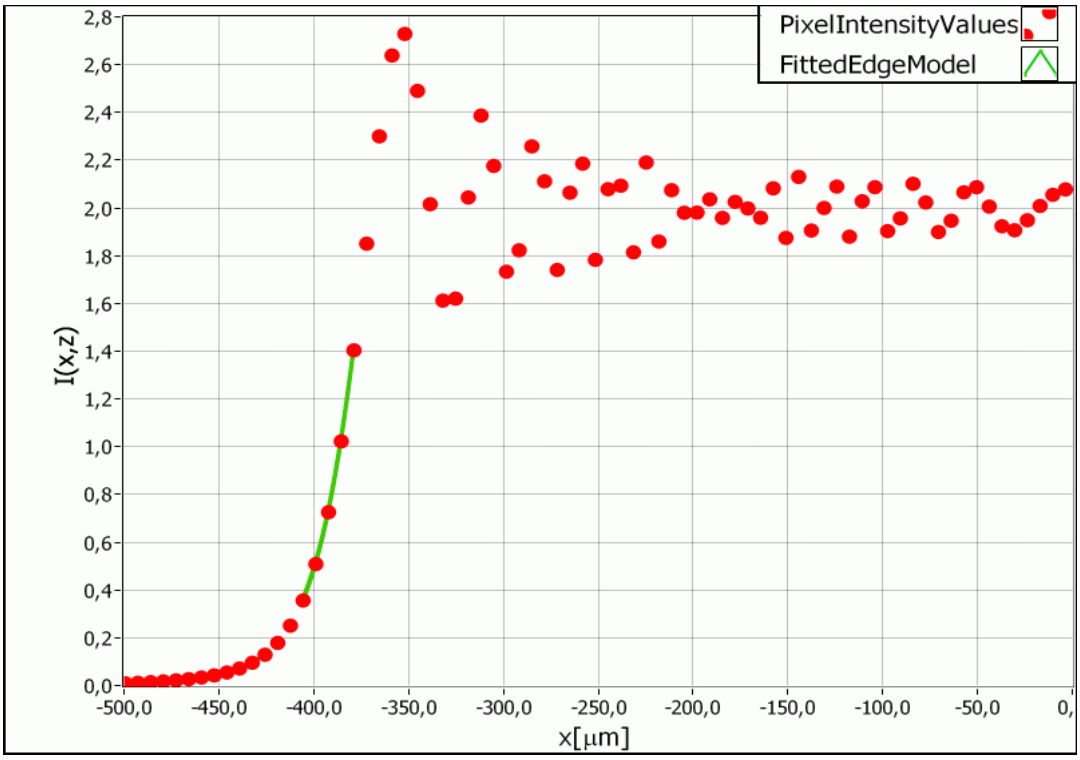
V následující kapitole je formou implementačních doporuční popsána strategie modelování reálné pixelové přechodové hrany modelující funkcí (5-17). Jednotlivá doporučení vycházejí z apriorních informací získaných při teoretických odvozeních, z výše uvedených závěrů řady diskuzí vlivu jednotlivých parametrů modelu zobrazení a z poznatků získaných testováním různých podob implementace aproximace jasových hodnot reálné přechodové hrany modelující funkcí (5-17).

- ***Přechodová hrana modelu (4-112) 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 (5-7), respektive (5-17) platnou pro rozsah argumentů dle (5-12).***
- ***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 (4-112) 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. 4.9, 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 (4-97). Tato hodnota je poté využitelná pro normování obrazových jasových hodnot hrany do rozsahu hodnot modelující funkce (5-17).***

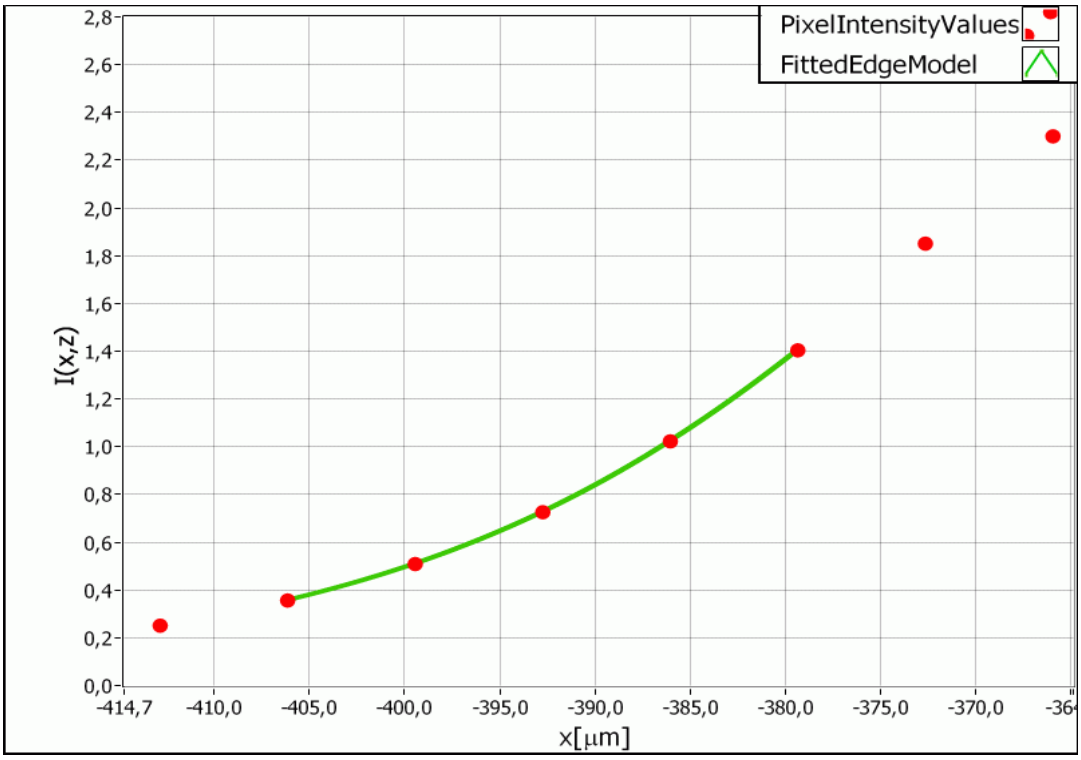
- ***Hodnoty jasu pro opticky nepropustnou část předmětu (geometrický stín) jsou vzhledem k vlastnostem reálné kamery, zejména tepelnému šumu, významně zatíženy vysokou relativní chybou. Z tohoto důvodu je vhodné vypustit tyto hodnoty ze souboru hodnot určených k aproximaci modelující funkcí přechodové hrany (5-17). 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 (4-99). Za nositele nezbytně nutné hodnoty jasu je přitom považován pixel s jasem bezprostředně nižším než hodnota odpovídající předpokládané pozici obrysového bodu předmětu dle (4-99). 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 (4-99). 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 je nutné vzít v úvahu změnu rozsahu parametru d_{X+} modelující funkce (5-17) a pro aproximaci použít pouze odpovídající úsek modelující funkce (viz obr. 5.1)[8].***

Algoritmus respektující uvedená doporučení byl implementován v programovacím jazyce LabView. Pro optimalizaci parametrů κ, τ modelující funkce přechodové hrany (5-17) byla použita interní LabView implementace *Levenberg-Marquardt* [15] optimalizačního algoritmu. Na obr. 5.5 je zobrazen výsledek optimalizované aproximace přechodové hrany, jejíž body byly získány vzorkováním modelu přechodové hrany (4-112) s parametry optické soustavy shodnými jako v případě obr. 4.15. Pozice odpovídající skutečné hraně předmětu se pro model před vzorkováním nacházela v hodnotě $-400\,\mu m$, přičemž při určení skutečné pozice obrysu předmětu v obraze podle vztahu (4-99) z proložené modelující funkce (5-17) je získána hodnota $-400{,}04\,\mu m$. 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. Výsledky testů se syntetickými daty zde nejsou prezentovány, neboť více vypovídající jsou výsledky testování s reálnými daty, které jsou diskutovány podrobně v dalších částech práce.

[8] Tento bod je vysoce implementačně závislý a je teoreticky možné najít optimalizační algoritmus provádějící úpravu rozsahu parametru modelující funkce automaticky.



Obr. 5.5 Výsledek optimalizované aproximace vzorkované odezvy modelu přechodové hrany (Obr. 4.15) modelující funkcí (5-17) pomocí navrženého algoritmu



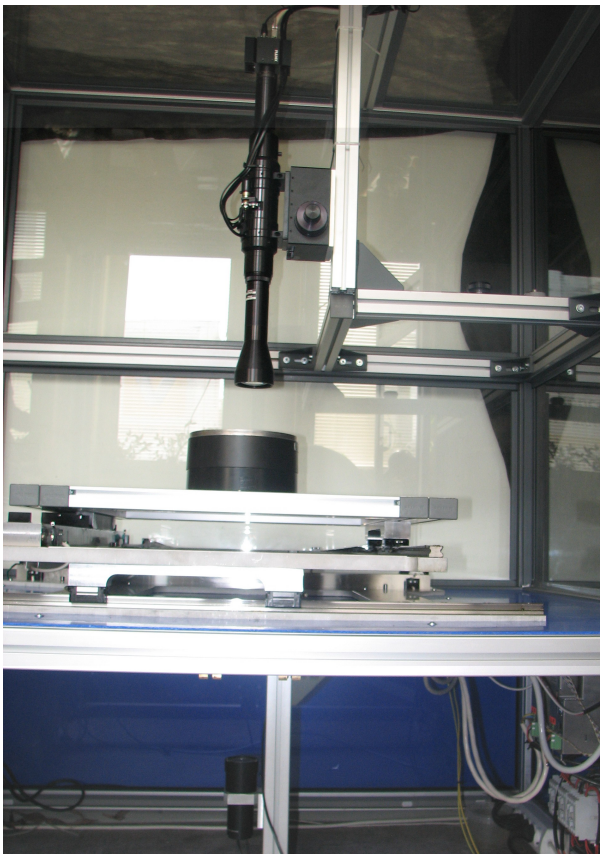
Obr. 5.6 Detail výsledku optimalizované aproximace vzorkované odezvy modelu přechodové hrany (Obr. 4.15) modelující funkcí (5-17) pomocí navrženého algoritmu

6 INTERAKTIVNÍ SYSTÉM TESTER2D - OVĚŘENÍ METODY MODELOVÁNÍ PŘECHODOVÉ HRANY A URČENÍ POZICE OBRYSU PŘEDMĚTU S REÁLNÝMI OBRAZOVÝMI DATY

Navržená metoda se stala stěžejní pro realizaci měřicí metody v měřicím systému **Tester2D** - ***Prototyp zařízení pro přesné mikrometrické testování prosévacích sít pro stavební a potravinářský průmysl***. Měřicí systém je zobrazen na obr. 6.1. Byl vyvíjen v rámci projektu *Ministerstva průmyslu a obchodu* ve spolupráci VUT v Brně a VUSH a. s. O průběhu vývoje měřicího systému a jeho jednotlivých částech pojednává řada článků autorského kolektivu, kterého byl autor disertační práce členem. Jedná se

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

například o publikace [35]-[48]. Měřicí systém obsahuje celou řadu zajímavých autorských řešení, konstrukčních i softwarových. Z konstrukčního hlediska jsou stěžejními prvky měřicího systému zejména *telecentrická optická soustava* [19], LED *kolimátor* [20], *CCD kamera Pulnix* [21] a *lineární motory* [28]. Pohled na tyto čtyři stěžejní prvky je umožněn v detailu na obr. 4.5. Ze softwarového hlediska se jedná především o *interaktivní uživatelské rozhraní*, *automatický systém ostření obrazu* dle požadavků měřicí metody, *kalibrační metodu měřicího systému*, *automatické řízení expozice obrazu pro dosažení optimálního rozložení histogramu*, *měřicí metodu detekce objektů a odpovídajících měřicích přímek v obraze* obsahující výše uvedenou *metodu modelování a detekce skutečné pozice obrysu předmětu*, *metodu řízení systému lineárních pojezdů křížového stolu na základě analýzy obrazu* a *statistické vyhodnocení naměřených výsledků dle požadavků příslušných norem* [23], [24], [25] a praxe [26]. Tyto části byly ve značné míře realizovány, případně v průběhu autorského výzkumu modifikovány autorem disertační práce. Vzhledem k tomu, že se jedná o algoritmizaci již známých metod a přístupů, nejsou v rámci disertační práce blíže prezentovány. V roce 2009 byl měřicí systém Tester2D akreditován národním akreditačním orgánem *ČIA* (viz příloha 1), pro *měření veličiny délky* v rozsahu $40\,\mu\text{m} - 20\,\text{mm}$. Mimo akreditaci bylo zařízení podrobeno mezilaboratornímu porovnávání pod záštitou *ČMI*, ve kterém vyhovělo stanoveným požadavkům (viz příloha 2).



Obr. 6.2 Detail zobrazovací části měřicího systému

6.1 Ověření přesnosti navržené metody modelování a detekce skutečné pozice obrysu předmětu na reálných obrazových datech

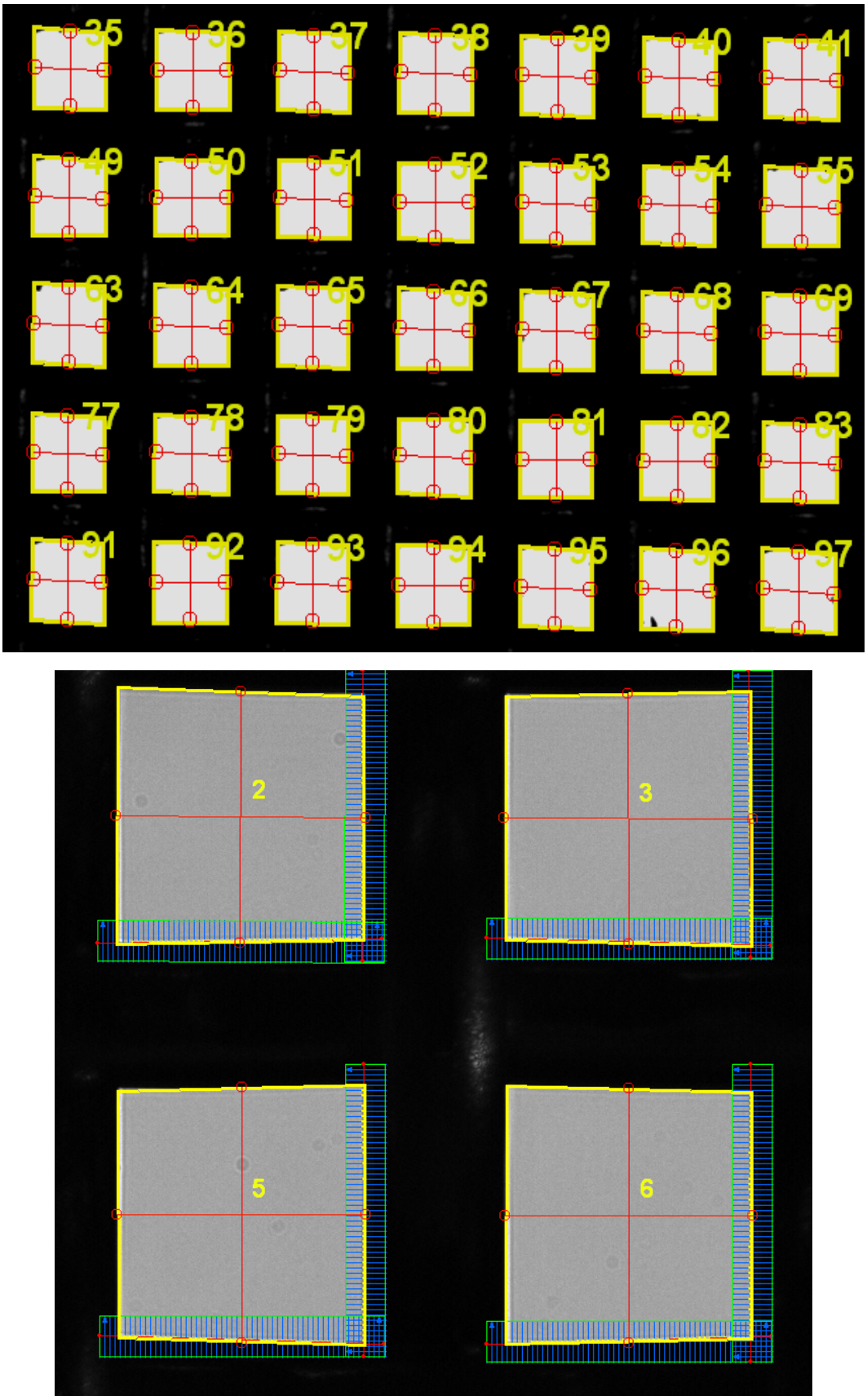
V rámci kapitoly 5 proběhlo ověření přesnosti navržené metody modelování hrany a identifikace skutečné pozice obrysu předmětu v obraze při použití ideálně vzorkovaných syntetických dat. Jak bylo uvedeno výše, v měřicím systému Tester2D je metoda modelovaní přechodové hrany a určení skutečné „subpixelové“ pozice obrysu předmětu součástí rozsáhlé měřicí metody skládající se z řady algoritmů zpracování obrazů. Tyto algoritmy mají za cíl připravit odpovídající, zpracováním nezkreslená data pro vytvořenou metodu modelování přechodové hrany. Jedná se především o následující algoritmy zpracování obrazů

- detekce předmětů zájmu,
- kalibrace souřadného systému obrazu,
- volba měřicích přímek,
- nalezení normály k hraně předmětu pro vyčtení jasových hodnot přechodové hrany,
- výpočet vzdálenosti mezi odpovídajícími, modelováním přechodových hran identifikovanými skutečnými (subpixelovými) pozicemi obrysových bodů.

Měřicí systém Tester2D umožňuje řadu možností vizualizace průběhu procesu měření. V rámci jednoho snímku je podle velikosti měřeného předmětu zájmu (oka síta) ve vyhodnocovaném obraze zobrazeno až několik desítek jednotlivých předmětů zájmu určených k měření. Pro dokreslení složitosti měřicí metody jsou na obr. 6.3 zobrazeny vybrané způsoby vizualizace výsledků procesu zpracování obrazu.

Pro ověření přesnosti metody modelování přechodové hrany a určení skutečné pozice obrysu předmětu s reálnými obrazovými daty je nutné použít tuto metodu v rámci již zmíněné komplexní měřicí metody, neboť není dostupný etalon definující pozici hrany předmětu v obraze, ale pouze *etalon délky* v podobě drátkového etalonu zobrazeného na obr. 6.4. Nositelem veličiny délky je v případě tohoto etalonu průměr jednotlivých drátků. Kalibrační list etalonu s uvedenými kalibrovanými hodnotami průměrů jednotlivých drátků je přiložen v příloze 3. Pro možnost porovnání výsledků byly použity snímky tohoto etalonu získané měřicím systémem Tester2D spolu s *kalibrační konstantou* určující přepočtový vztah $\mu m/pixel$. Tato kalibrační konstanta je získána komplexním kalibračním postupem, vycházejícím z precizní analýzy speciálního kalibračního obrazce při stejném nastavení parametrů optické soustavy, při kterém jsou následně snímány obrazy určené pro měření. Přesnost kalibračního postupu byla ověřena v průběhu akreditace měřicího systému (viz příloha 1). Výpočet nejistoty

určení kalibrační konstanty je přiložen ve formě materiálu akreditované laboratoře AKL-SÍTA, VUSH a.s. v příloze 4 (odstavec 2.1.5).



Obr. 6.3 Příklady vizualizace zpracování obrazu měřicím systémem Tester2D

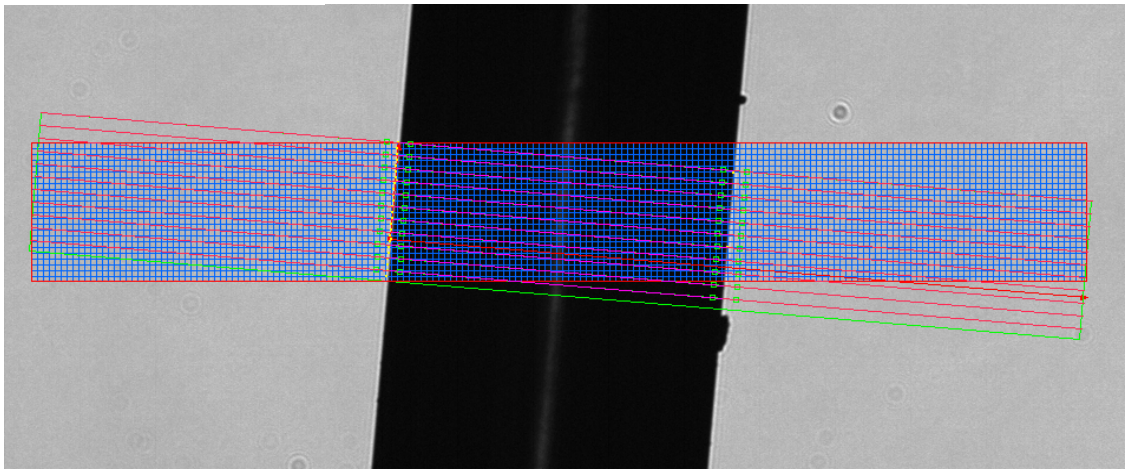
Obr. 6.4 Drátkový etalon délky definované průměrem drátků

6.1.1 Výsledky měření drátkového etalonu délky navrženou metodou detekce skutečné pozice obrysu předmětu na základě modelování přechodové hrany

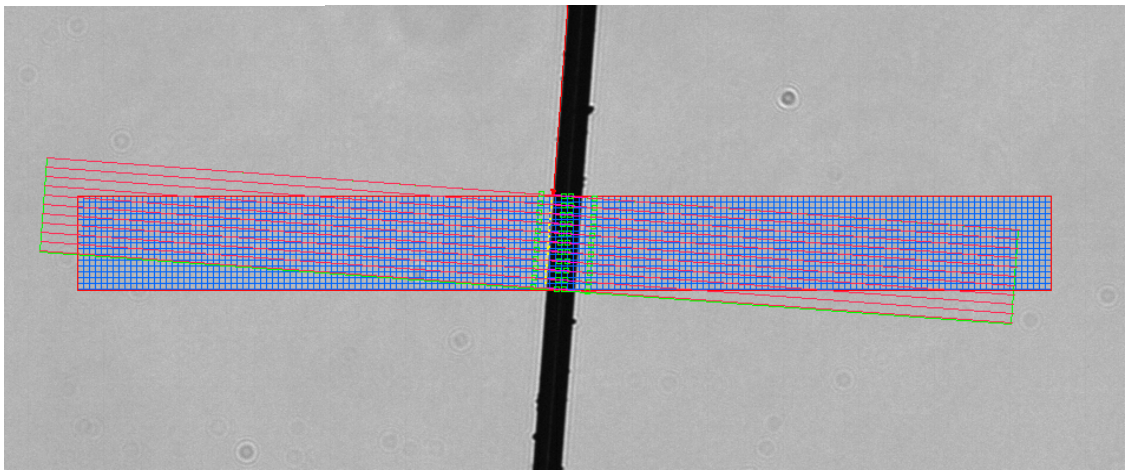
Pro ukázku ověření přesnosti byly vybrány dva průměry drátků etalonu délky a to hodnoty $620{,}5\,\mu m$ a $49{,}8\,\mu m$, přičemž tyto hodnoty jsou dle kalibračního listu (příloha 3) stanoveny s nejistotou měření $0{,}5\,\mu m$. Hodnota kalibrační konstanty pro přepočet délky v pixelech na délku v μm byla získaná při kalibraci měřicího systému Tester2D. Obrazy vybraných drátků z etalonu byly snímány za stejných parametrů optické soustavy (optické zvětšení), pro něž proběhla kalibrace. Hodnota kalibrační konstanty pro tyto parametry je rovna $2{,}198\,\mu m/pixel$ (viz příloha 4, kapitola 2.1.5, tabulka: Nejistota určení kalibrační konstanty Testeru2D). Pro ukázku nezávislosti přesnosti měřicí metody na optimalizaci parametrů zobrazení byly pro tuto kalibrační konstantu a jí odpovídající parametry nastavení optické soustavy změřeny oba etalony $620{,}5\,\mu m$ a $49{,}8\,\mu m$. Pro měření etalonu $49{,}8\,\mu m$ přitom existuje v rámci Testeru2D optimálnější nastavení optické soustavy a tím i optimálnější hodnota kalibrační konstanty ($0{,}895\,\mu m/pixel$).

Postup měření byl následující: Bylo sejmuto 10 obrázků, vždy po novém nastavení expozice a parametrů optické soustavy, kterým odpovídá kalibrační konstanta. V každém snímku bylo změřeno 11 hodnot průměru drátku ze stejné oblasti blízké jeho středu (oblast šířky přibližně $250\,\mu m$), která vizuálně vykazovala minimum nečistot (zrnek prachu). Náhled výstupu měřicí metody se zakreslenými měřicími

a) etalon 620,5 μm

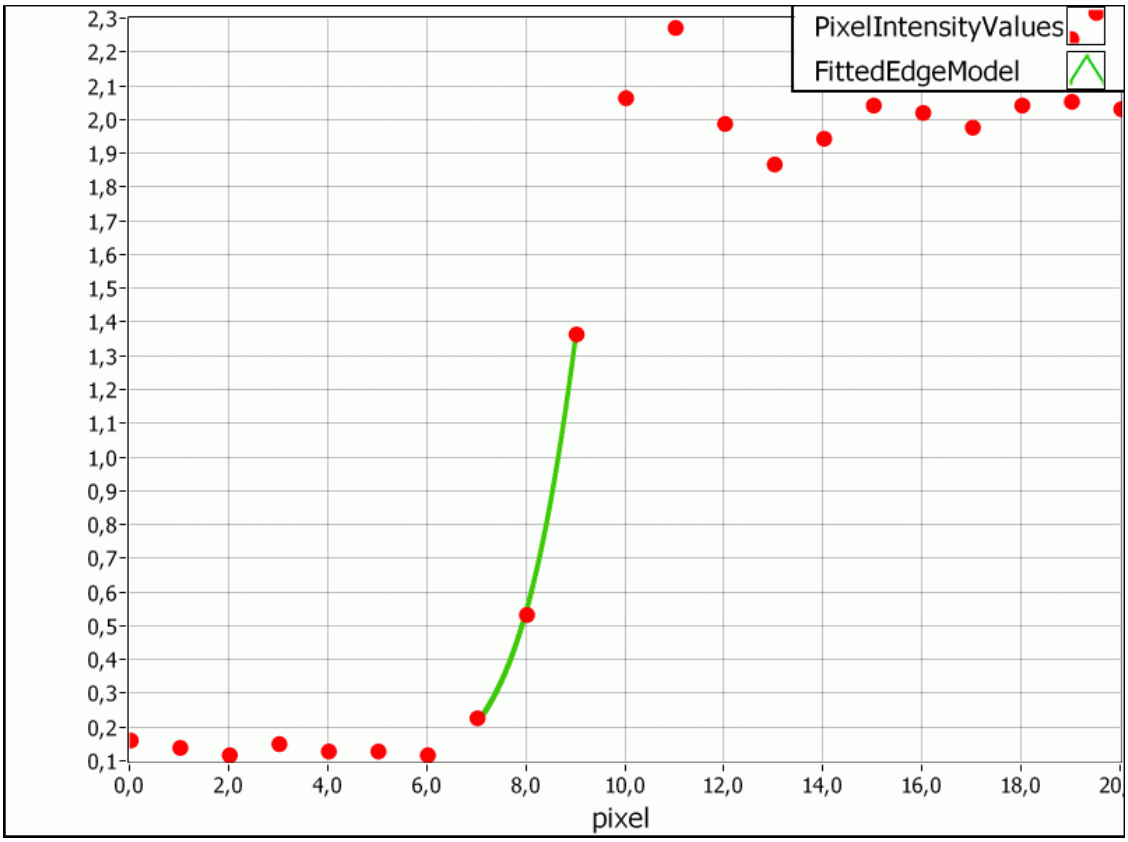


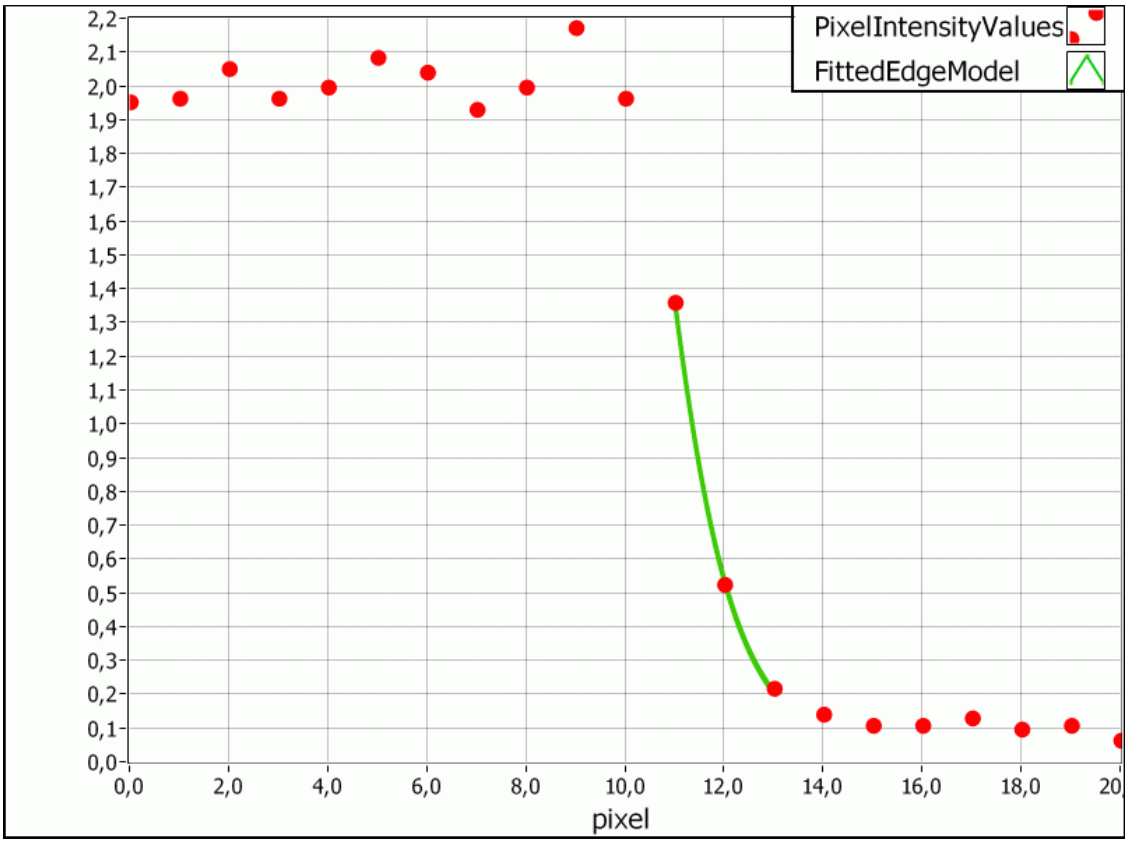
b) etalon 49,8 μm



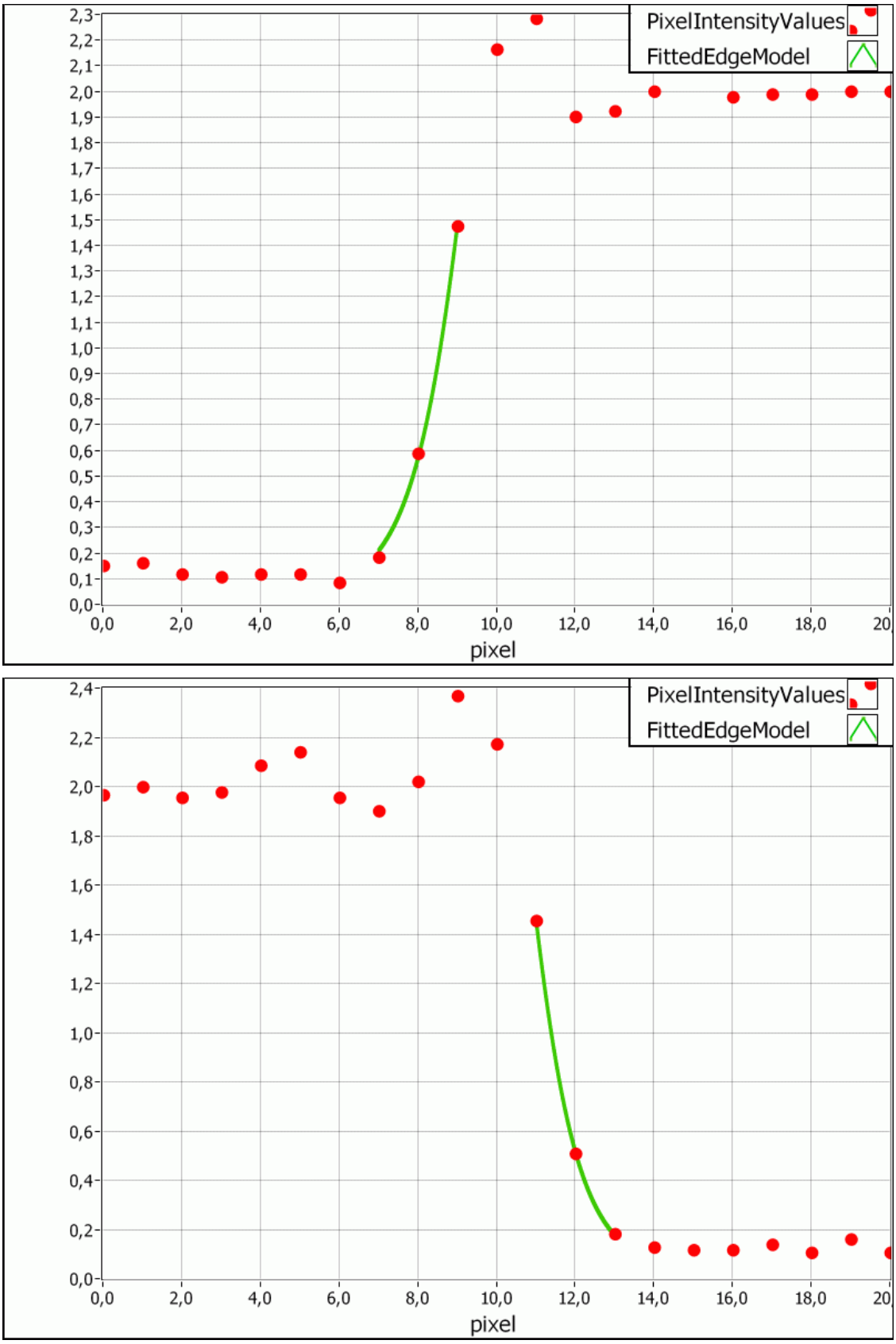
Obr. 6.5 Ukázka vyhodnocené oblasti měřených etalonů 620,5 μm a 49,8 μm v odpovídajícím měřítku zobrazení

přímkami, v rámci měřených oblastí, je zobrazen pro oba drátky ve stejném měřítku v podobě výřezů velikosti 950x400 pixelů. Ukázka výsledků aplikace navržené metody (kapitola 5.3.1) aproximace modelu přechodové hrany (5-17) reálnými jasovými přechody je uvedena na obr. 6.6 a obr. 6.7. Pro každou z 10 realizací byla zaznamenána hodnota mediánu naměřeného průměru drátkového etalonu a směrodatná odchylka z naměřeného souboru 11 hodnot. Výsledky takto zpracovaných 10 realizací pro každý etalon jsou uvedeny v tabulkách a příslušných grafech. Vyhodnocení naměřených hodnot spolu s jejich diskuzí je uvedeno v následující kapitole.





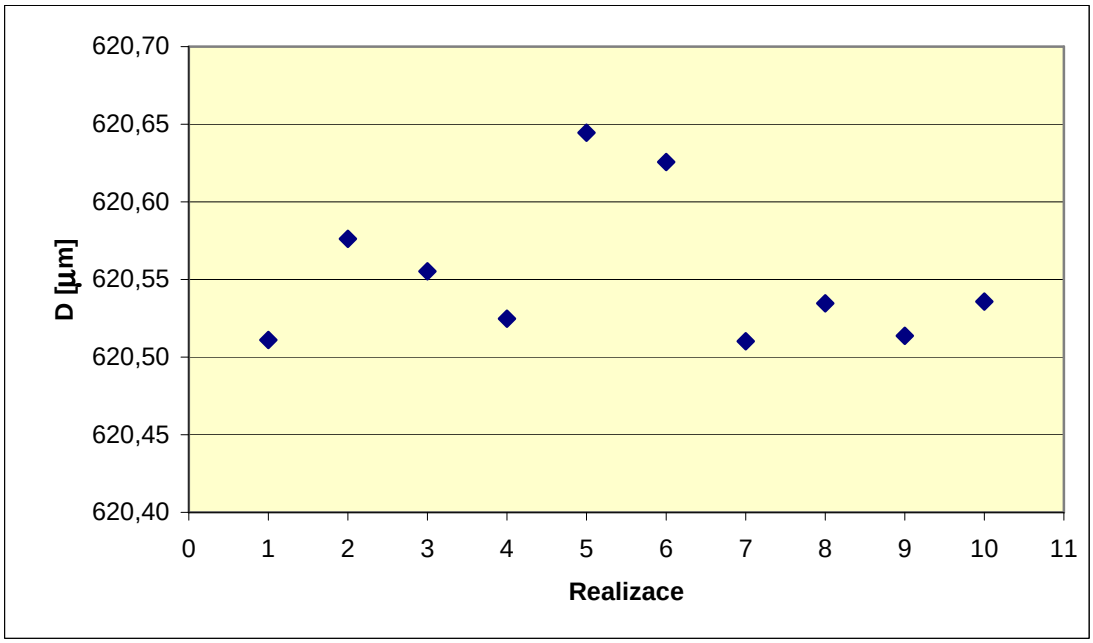
Obr. 6.6 Ukázka aplikace navržené metody aproximace modelu přechodové hrany (5-17) reálnými jasovými hodnotami při měření etalonu 620,5 μm



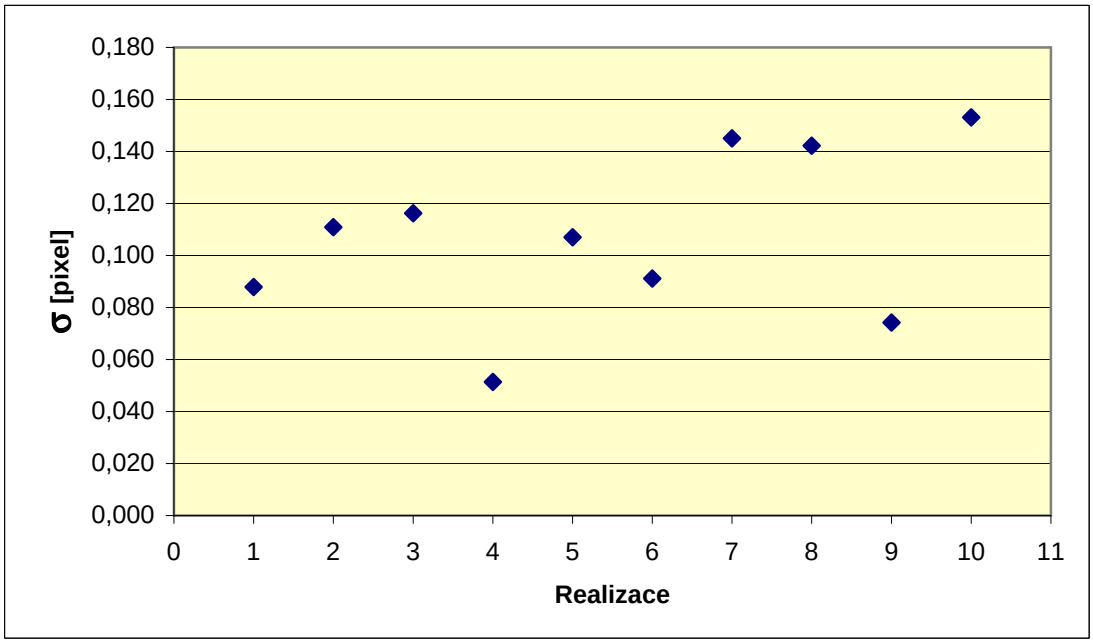
Obr. 6.7 Ukázka aplikace navržené metody aproximace modelu přechodové hrany (5-17) reálnými jasovými hodnotami při měření etalonu 49,8 μm

Tab. 6-1 Výsledky 10 realizací měření etalonu délky $620{,}5\,\mu m$ s udávanou nejistotou hodnoty etalonu $0{,}5\,\mu m$

Číslo realizace	D - hodnota průměr drátu		σ - směrodatná odchylka naměřených hodnot v rámci realizace	
	[µm]	[pixel]	[µm]	[pixel]
1	620,51	282,31	0,193	0,088
2	620,58	282,34	0,244	0,111
3	620,56	282,33	0,256	0,116
4	620,52	282,31	0,113	0,051
5	620,64	282,37	0,235	0,107
6	620,63	282,36	0,200	0,091
7	620,51	282,31	0,319	0,145
8	620,53	282,32	0,313	0,142
9	620,51	282,31	0,163	0,074
10	620,54	282,32	0,337	0,153



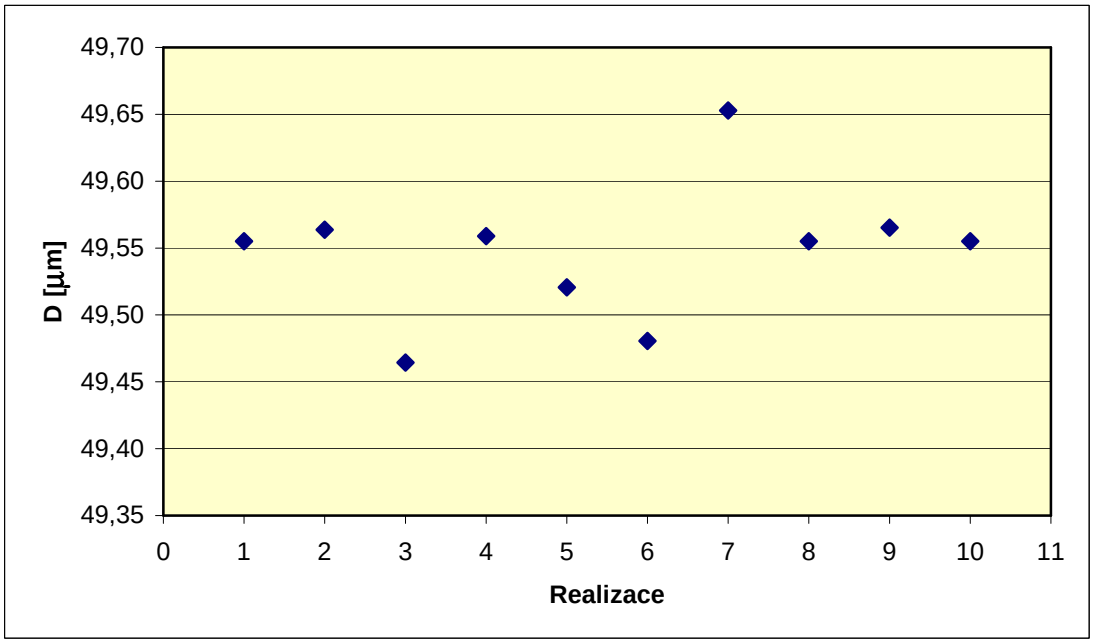
Obr. 6.8 Naměřené mediánové hodnoty průměru etalonu $620{,}5\,\mu m$



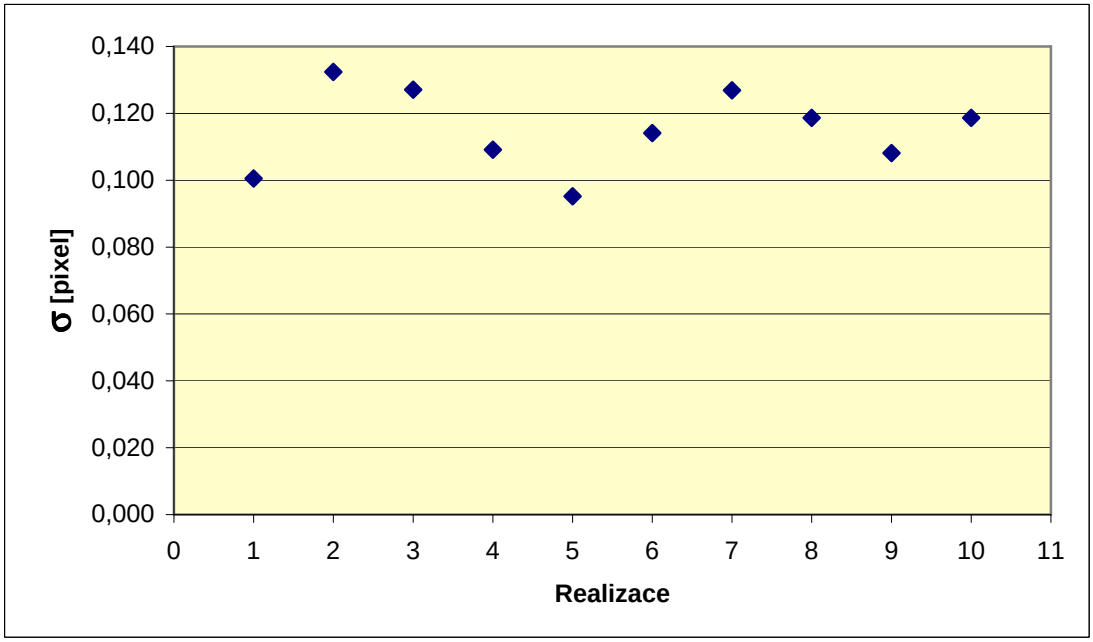
Obr. 6.9 Směrodatné odchylky v pixelech v rámci jednotlivých realizací při měření etalonu 620,5 μm

Tab. 6-2 Výsledy 10 realizací měření etalonu délky 49,8 μm s udávanou nejistotou hodnoty etalonu 0,5 μm

Číslo realizace	D - hodnota průměr drátu		σ - směrodatná odchylka naměřených hodnot v rámci realizace	
	[μm]	[pixel]	[μm]	[pixel]
1	49,56	22,55	0,221	0,101
2	49,56	22,55	0,291	0,132
3	49,46	22,50	0,279	0,127
4	49,56	22,55	0,240	0,109
5	49,52	22,53	0,209	0,095
6	49,48	22,51	0,251	0,114
7	49,65	22,59	0,279	0,127
8	49,56	22,55	0,261	0,119
9	49,57	22,55	0,238	0,108
10	49,56	22,55	0,261	0,119



Obr. 6.10 Naměřené mediánové hodnoty průměru etalonu 49,8 µm



Obr. 6.11 Směrodatné odchylky v pixelech v rámci jednotlivých realizací při měření etalonu 49,8 µm

6.1.2 Vyhodnocení a diskuze výsledků měření drátkových etalonů

Při pohledu na ukázky výsledků metody optimalizované aproximace reálných jasových hodnot modelem přechodové hrany (5-17) uvedené na obr. 6.6 a obr. 6.7 je zřejmé, že pro aproximaci byly zvoleny právě ty hodnoty, které ještě nejsou podvzorkovány a zároveň v oblasti malých hodnot jasu nejsou zatíženy vysokou relativní úrovní šumu. Pixely s normovanou úrovní jasu nad prahovou hodnotou stanovenou v rámci navržené metody jsou již vzhledem k průběhu aproximovaného modelu velice pravděpodobně podvzorkovány a jejich zahrnutí do procesu aproximace by vedlo ke vzniku chyby aproximace ve vztahu k pravděpodobné fyzikální realitě vzniku obrazu. Na základě těchto výsledků lze usuzovat na správnost definovaných doporučení (kapitola 5.3.1) pro optimální aproximaci modelující funkce přechodové hrany reálnými jasovými hodnotami.

Při vyhodnocení přesnosti naměřených hodnot jednotlivých etalonů je nutné připomenout velikost kalibrační konstanty $2{,}198\,\mu\text{m/pixel}$. Tato hodnota znamená, že pro případ, kdy dojde k chybě určení hrany o 0,5 pixelu u náběžné i sestupné hrany na dané měřicí přímce, výsledek měření bude zatížen chybou $2{,}198\,\mu\text{m}$. Z uvedeného vyplývají značné nároky na přesnost subpixelové detekce pozice obrysu předmětu, které je navržená metoda evidentně schopna dodržet.

Vyhodnocení naměřených hodnot etalonu 620,5 μm

Z tab. 6-1 je možno vyčíst několik souvislostí. V první řadě je to hodnota směrodatné odchylky 11 naměřených hodnot v rámci jedné realizace. Jak je patrné z grafu na obr. 6.9, kolísala hodnota směrodatné odchylky v rozmezí $0{,}051 - 0{,}153\,\text{pixelu}$. Toto kolísání v rámci jednoho souboru hodnot je dáno především přítomností mikroskopických nečistot (prachu aj.) na měřeném etalonu, jichž přítomnost je při bližším pohledu znatelná z obr. 6.5 a)[9]. Mimo nečistot zde hrají jistou roli i nerovnosti povrchu drátku. V případě tohoto typu etalonu není při kalibraci ČMI stanovena přesná poloha, ve které byl rozměr drátku měřený, je pouze známo, že měření probíhalo v oblasti středu etalonu. Z tohoto důvodu byl zvolen postup, který za výsledek realizace považuje naměřenou hodnotu odpovídající mediánu naměřeného souboru 11 hodnot. Zvolený způsob částečně eliminuje vliv opětovného nastavování měřené oblasti v rámci každé realizace. Naměřené hodnoty mediánů přes všechny realizace jsou zobrazeny v podobě grafu na obr. 6.8. Je z nich zřejmé, že všechny leží v rozsahu nejistoty měření uvedené pro etalon v jeho kalibračním listu ($620{,}5\,\mu\text{m}$ s nejistotou měření $0{,}5\,\mu\text{m}$, viz

[9] Vliv těchto nečistot se při měřeních reálných sít nasazených v průmyslu omezuje čištěním síta v ultrazvukové lázni. V praxi představuje ucpané oko síta menší problém, než oko síta s výrazně vyšším rozměrem než je daný jmenovitou velikostí ok síta. Příslušné normy [23], [24], [25] pro jednotlivé typy sít definují postup měření, minimální počet vyhodnocených otvorů a pozice, v nichž má být oko měřeno a způsob jakým mají byt výsledky statisticky zpracovány a vyhodnoceny.

příloha 3) a lze tedy říci, že naměřené hodnoty jsou reálné a vysoce přesné. Zajímavou z hlediska vyhodnocení naměřených hodnot mediánů přes všechny realizace je hodnota směrodatné odchylky mediánů, která je rovna $\sigma_{620,5} = 0{,}021\,\text{pixelu}$. Tato hodnota vypovídá o vysoké stabilitě a přesnosti metody optimalizované aproximace modelující funkcí přechodové hrany (5-17) a určení skutečné pozice obrysu dle (4-99).

Vyhodnocení naměřených hodnot etalonu 49,8 μm

Závěry k výsledkům měření tohoto etalonu jsou obdobné, jako tomu bylo pro etalon $620{,}5\,\mu\text{m}$. Jednotlivé naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 6-2 a zpracovány do podoby grafu na obr. 6.10 a obr. 6.11. I v případě tohoto etalonu leží všechny hodnoty mediánu jednotlivých realizací v mezích nejistoty kalibrace etalonu a nelze tedy usuzovat na jejich chybu vůči uvedené kalibrační hodnotě etalonu. Výsledek směrodatné odchylky hodnot mediánu přes jednotlivé realizace je pro tento etalon roven $\sigma_{49,8} = 0{,}022$ pixelu, tedy opět vynikající.

Souborné shrnutí výsledků

Jak bylo uvedeno výše, měření obou etalonů, které se od sebe rozměrově liší více jak 10x, probíhalo při nastavení optimálních parametrů optické soustavy měřicího systému Tester2D právě pro měření etalonu $620{,}5\,\mu\text{m}$. Tyto parametry optické soustavy (zejména zvětšení) tedy způsobily, že etalon $49{,}8\,\mu\text{m}$ byl v obraze reprezentován pouze přibližně 23 pixely. I přesto jsou výsledky měření obou etalonů zcela vyhovující. Dosažená přesnost mimo jiné vypovídá o kvalitě způsobu kalibrace systému Tester2D, neboť přesnost konstanty kalibrace $2{,}198\,\mu\text{m/pixel}$ nevnesla do výsledků žádné významné odchylky, ačkoliv se měřené etalony ve svém zobrazení od sebe lišily téměř o 260 pixelů.

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 (4-23). 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 (4-26). 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 sytému zobrazujícího definovaný předmět zájmu (viz obr. 4.1) na základě pravidel *Fourierovské optiky*. Výsledkem analýzy je vztah (4-83), 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 (4-86), (4-87). Model byl podroben detailní diskuzi parametrů, na základě níž byl odvozen vztah určující hodnotu intenzity (4-99) 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 parametru optické soustavy byly analyzovány z pohledu vlivů na odvozený vztah 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 (4-112) a provedena diskuze chyby této aproximace obr. 4.15, obr. 4.16. Fyzikální model přechodové hrany (4-112) 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 (5-1), (5-4) se zcela zanedbatelnou maximální chybou aproximace v řádu 1.10^{-16}. Pomocí této polynomiální aproximace *Fresnelových integrálů* byl z fyzikálního modelu přechodové hrany (4-112) odvozen vztah pro modelující funkci (5-17) určenou 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 (4-99).

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 z podoby průběhů reálných přechodových hran byla stanovena stěžejní doporučení charakterizující metodu optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů modelující funkcí přechodové hrany (5-17). Navržené zásady byly nejprve ověřeny proložením syntetických dat a určením dopadu aproximace na chybu detekce skutečné pozice hrany předmětu. Při práci se syntetickými daty byla chyba určení skutečné pozice obrysu předmětu shledána zcela zanedbatelnou (viz obr. 5.6).

Pro ověření přesnosti navržené metody s reálnými obrazovými daty bylo nejprve nutné tuto metodu algoritmizovat a začlenit do měřicího systému Tester2D. V úvodu 6. kapitoly je měřicí systém Tester2D představen a ve formě příloh jsou poskytnuty doklady o jeho akreditaci ČIA a o výsledcích mezilaboratorního porovnávání pod záštitou ČMI. V závěru práce je předložena ukázka výsledků dosažených navrženou metodou při měření etalonů délky ($620{,}5\,\mu m$; $49{,}8\,\mu m$). Výsledky měření etalonů délky jsou v práci statisticky zpracovány a podrobně diskutovány.

Z hlediska definovaných cílů disertační práce lze říci, že byly naplněny. Měřicí systém Tester2D byl v roce 2009 akreditován (viz příloha 1) pro měření geometrických rozměrů v rozsahu $40\,\mu m - 20\,mm$ s přesností až $0{,}1\,\mu m$. Byla odvozena fyzikálně podložená modelující funkce přechodové hrany předmětu zájmu (5-17) v podobě vhodné pro algoritmizaci. Byl stanoven způsob detekce přesné pozice obrysu předmětu zájmu v rámci modelující funkce přechodové hrany. Byla navržena metoda optimální aproximace reálných přechodových hran v obraze uvedenou modelující funkcí. Uvedená metoda byla implementována v programovacím jazyce LabView 6.1 a její přesnost ověřena. 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 [23], [24], [25] pro konkrétní typy průmyslových sít.

V průběhu odvozování fyzikálně podložené metody modelování hran byla také navržena tzv. „*metoda dvojité kalibrace*“ (*double calibration method*). Návrh této metody vychází z empirických výzkumů a zkušeností získaných v rámci prvotního testování přesnosti systému při použití různých typů obecných matematických subpixelových interpolací a aproximací přechodových hran. Princip metody je založen na jednoduché subpixelové interpolační metodě a přídavné kalibraci systému pro určování poměrné jasové pozice obrysu předmětu. Metoda poskytovala srovnatelné výsledky s výše uvedenou fyzikální metodou, ovšem byla specificky závislá nejen na uvedeném typu zobrazovacího sytému, ale též na specifických typech kalibračních etalonů a postupu kalibrace i měření. Z těchto důvodů pro ni nebylo možné vybudovat obecný teoretický základ, a proto není v rámci disertační práce prezentována.

Koncepce původního měřicího systému byla podrobně publikována ve formě konferenčních příspěvků členů řešitelského týmu a průběžných či závěrečných oponovaných zpráv o řešení projektu, viz např. [42], [43], [44], [45], [46]. 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].

8 LITERATURA

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[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 Meterology Third Edition*, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, 2002, ISBN 0-470-84300-4.

[3] BORN, M. , WOLF, E. *Principles of Optics, 6th ed.*, Pergamon Prss 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.piacton.com/, 2008.

[8] PULNiX. *TM-1320-15L Digital camera.* http://www.jai.com , 2008.

[9] JAN, J. *Číslicová 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, Fizmatgis, 1962, 1100s.

[11] BRYČKOV I. A., MARICEV O. I., PRUDNIKOV, A. P. *Tablicy neopredelennych 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.

[18] National Instruments: *LabView 6.1 Manuals* National Instuments Corporation 2001 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 nahttp://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.

[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 *VIIP*. 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 Lódž, 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., KOHOUTEK, 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. KOHOUTEK, 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., KOHOUTEK, 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., KOHOUTEK, M. Automatizované řízení polohovacího křížového stolu v dvojdimenzionálním prostoru. Oponovaná výzkumná zpráva k řešení projektu FD1849291.

[48] KOHOUTEK, 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] 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.

[50] 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.

[51] 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.

[52] HANÁK, P.; VRBA, K.; KOHOUTEK, M. Single-Output, High-Amperage Digitally Controlled Current Pulse Generator for Magnetic Therapy. In *Proceedings of 31th Telecommunications and Signal Processing conference.* Budapest, Asszisztencia Szervezo Kft. 2008. p. 1 - 4. ISBN 978-963-06-5487-6.

[53] ČÍKA, P.; KOHOUTEK, 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.; KOHOUTEK, 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.; KOHOUTEK, M. *Interaktivní aplikace pro digitální televizní vysílání.* FEKT VUT v Brně, Brno, ČR, FEKT VUT v Brně. 2008. p. 1 - 45.

[56] KOHOUTEK, 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.; KOHOUTEK, 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., KOHOUTEK, M. *Výzkum a vývoj experimentálního léčebného zařízení LMG-4 pro kombinovanou magnetickou a optickou terapii.* Brno. 2006. p. 1 - 15.

[59] KOHOUTEK, 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., KOHOUTEK, M., KOULA, I. *Výzkum a vývoj číslicově řízeného impulsního magnetického plošného pole.* Brno. 2004. p. 1 - 50.

PŘÍLOHA 1 – Osvědčení o akreditaci ČIA měřicího systému Tester2D

NÁRODNÍ AKREDITAČNÍ ORGÁN

Český institut pro akreditaci,
obecně prospěšná společnost
110 00 Praha 1 - Nové Město, Opletalova 41

vydává

OSVĚDČENÍ O AKREDITACI

č. 113 / 2009

pro

kalibrační laboratoř č. **2272**

Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s.
(IČ 26232511)
AKL-SÍTA
Hněvkovského 65, 617 00 Brno

Předmět akreditace:

Kalibrace zkušebních sít s třídící přepážkou z děrovaného plechu, drátěné tkaniny, případně jiných materiálů v rozsahu uvedeném v příloze tohoto osvědčení.

Jménem akreditované kalibrační laboratoře jedná Jiří Petlach a za správnost kalibračních listů odpovídají Jiří Petlach a Lucie Halabrinová.

Toto osvědčení o akreditaci vydal Český institut pro akreditaci, o.p.s. na základě posouzení splnění akreditačních kriterií podle

ČSN EN ISO/IEC 17025:2005

a po zjištění, že kalibrační laboratoř je odborně způsobilá objektivně a nezávisle vykonávat činnosti uvedené v rozsahu předmětu akreditace.

Adresát tohoto osvědčení je oprávněn používat při své činnosti v rozsahu tohoto osvědčení a po dobu jeho platnosti vedle svého názvu označení „akreditovaná kalibrační laboratoř č. 2272", pokud dodržuje veškeré příslušné předpisy vztahující se k činnosti akreditované kalibrační laboratoře, včetně předpisů vydaných Českým institutem pro akreditaci, o.p.s.

Prokáže-li se, že adresát tohoto osvědčení neplní akreditační kriteria rozhodná pro jeho vydání a závazky podmiňující akreditaci, může Český institut pro akreditaci, o.p.s. účinnost tohoto osvědčení pozastavit nebo osvědčení o akreditaci zrušit nebo změnit.

Toto osvědčení platí do: **28.02.2012**

a v plném rozsahu nahrazuje osvědčení o akreditaci vydané ČIA č. 136/2007 ze dne 28.02.2007

V Praze dne: 26.02.2009

Ing. Jiří Růžička, MBA
ředitel
Českého institutu pro akreditaci, o.p.s.

Poučení:
Proti tomuto osvědčení, pokud jde o rozsah předmětu akreditace, má adresát možnost podat písemné námitky do 10 dnů od jeho převzetí. Námitky nemají odkladný účinek.

©TISK VICTORIA SECURITY PRINTING a.s. PRAHA

Příloha č.: 1 ze dne: 26.2.2009
je nedílnou součástí
osvědčení o akreditaci č.: 113/2009 ze dne: 26.2.2009

Akreditovaný subjekt:

Výzkumný ústav stavebních hmot, a. s.
AKL-SÍTA
Hněvkovského 65, 617 00 Brno

Kalibrační listy podepisuje:

Jiří Petlach	vedoucí AKL-SÍTA
Lucie Halabrinová	zástupce vedoucího AKL-SÍTA

Obor měřené veličiny: **Délka**

Kalibrace: Nominální teplota pro kalibraci: (22 ± 5) °C

Pořadové číslo	Měřená veličina	Rozsah měřené veličiny	Nejlepší měřicí schopnost [±] [1]	Identifikace metody
1	Délka (Zkušební síta s třídící přepážkou z kovové tkaniny nebo jiné tkaniny)	(0,005 - 11,2) mm	0,8 µm	KP T1
2		(0,020 – 11,2) mm	0,8 µm	KP T2C
		(0,040 – 20,0) mm	0,6 µm	KP T2D
3		(11,2 – 125) mm	23 µm	KP T3
4	Délka (Zkušební síta s třídící přepážkou z děrovaného plechu)	(0,5 – 11,2) mm	3,2 µm	KP T2C
		(0,5 – 20,0) mm	2,0 µm	KP T2D
5		(0,5 – 11,2) mm	2,6 µm	KP P1A
6		2 mm	1,1 µm	KP P1B
		3,15 mm	1,1 µm	
		4 mm	1,1 µm	
		5 mm	1,1 µm	
		5,6 mm	1,1 µm	
		6,3 mm	1,1 µm	
		7,1 mm	1,1 µm	
		8 mm	1,1 µm	
		10 mm	1,1 µm	
		11,2 mm	1,1 µm	
7		(11,2 – 125) mm	23 µm	KP P2

[1] vyjádřená obdobně jako nejistota v souladu s požadavky dokumentu EA 4/02 při k = 2

Český institut pro akreditaci, o.p.s. NÁRODNÍ AKREDITAČNÍ ORGÁN * 1 *

Příloha č.: 1 ze dne: 26.2.2009
je nedílnou součástí
osvědčení o akreditaci č.: 113/2009 ze dne: 26.2.2009

Akreditovaný subjekt:

Výzkumný ústav stavebních hmot, a. s.
AKL-SÍTA
Hněvkovského 65, 617 00 Brno

Měřené přístroje či zařízení:

(v souladu s výše uvedeným přehledem měřených veličin a jejich rozsahu měření mohou být měřeny následující typy přístrojů či zařízení, nejistoty uvedené na kalibračním listě budou dány nejistotou daného přístroje či zařízení zvýšenou o příslušnou schopnost měření laboratoře pro příslušnou měřenou veličinu a její rozsah měření)

Pořadové číslo	Typ měřeného přístroje či zařízení
1 - 3	Zkušební síta s třídící přepážkou z drátěné tkaniny nebo jiných matriálů
4 - 7	Zkušební síta s třídící přepážkou z děrovaného plechu

Český institut pro akreditaci, o.p.s.
NÁRODNÍ AKREDITAČNÍ ORGÁN
1

PŘÍLOHA 2 – Osvědčení a zpráva o dvoustranném mezilaboratorním porovnávání systému Tester2D, realizovaném pod záštitou ČMI

ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT

Český metrologický institut, Úsek legální metrologie – referát MPZ

Z 7002

O S V Ě D Č E N Í

O ÚČASTI V DVOUSTRANNÉM MEZILABORATORNÍM POROVNÁVÁNÍ ZKOUŠEK

číslo 0318-OV-C3082-07

Předmět dvoustranného mezilaboratorního porovnání zkoušek:

MĚŘIDLA DÉLKY – ZKUŠEBNÍ SÍTA

Provedeno: 31.10.2007

Označení porovnání: **11-082-07**

Držitel osvědčení:

Výzkumný ústav stavebních hmot, a. s.

Hněvkovského 30/65, 617 00 Brno

Výsledek

Na základě měření provedeného dne 31.10.2007 a následného vyhodnocení uvedeného v přiložené Zprávě o dvoustranném mezilaboratorním porovnávání zkoušek číslo 0318-ZV-C3082-07 účastník

v y h o v ě l

stanoveným požadavkům pro toto dvoustranné mezilaboratorní porovnávání zkoušek.

Datum vystavení: 31.12.2007

Český metrologický institut -3-

RNDr. Simona K l e n o v s k á
vedoucí referátu MPZ

Ing. Jindřich P o š v á ř
odborný ředitel pro legální metrologii

Výtisk číslo : (1) 2 3 4

Z 7002

Zpráva

o dvoustranném mezilaboratorním porovnávání zkoušek

MĚŘIDLA DÉLKY
ZKUŠEBNÍ SÍTA

Organizátor zkoušek: **Český metrologický institut**
Úsek legální metrologie – referát MPZ
Okružní 31
638 00 Brno

Vypracoval: RNDr. Simona Klenovská
organizační garant MPZ

Spolupracoval: Ing. Václav Duchoň
odborný garant MPZ

Schválil: Ing. Jindřich Pošvář
odborný ředitel pro legální metrologii

Český metrologický institut
Okružní 31
638 00 Brno
-9-

Vydal: Český metrologický institut
Úsek legální metrologie – referát MPZ

Brno, 19.12.2007

Rozdělovník:

Účastník DMPZ	1 x	(výtisk číslo 1)
ČMI	3 x	(výtisky číslo 2 až 4)

Organizaci dvoustranného mezilaboratorního porovnávání zkoušek (dále DMPZ) zabezpečil Úsek legální metrologie (dále ÚLM).

Účastník DMPZ:

název: **Výzkumný ústav stavebních hmot, a. s.**

adresa: Hněvkovského 30/65, 617 00 Brno

Zkoušené měřidlo: zkušební síta, výrobce VÚSH, typ standard průměr 200 mm, výrobní čísla 22235, 22236, 22237, 22238, velikost otvorů 0,063 mm, 2 x 2 mm, 2 mm, 2,2 x 20 mm.

Kalibrační list účastníka: č. 1015-2007, 1019-2007 ze dne 27.06.2007, 1013-2007, 1014-2007, 1016-2007, 1017-2007, 1018-2007, 1020-2007 ze dne 31.10.2007.

Metoda, postup měření účastníka: kalibrační postup KP T2C a kalibrační postup KP T2D.

Referenční laboratoř: ČMI, Oblastní inspektorát Brno, Oddělení délky.

Kalibrační list referenční laboratoře: č. 6033-KL-B394-07 a č. 6033-KL-B395-07 ze dne 14.11.2007, č. 6033-KL-B396-07 a č. 6033-KL-B397-07 ze dne 25.11.2007.

Metoda, postup měření referenční laboratoře: postup č. 633-MP-C102.

Vyhodnocení výsledků měření je zpracováno v souladu s dokumentem ISO/IEC Guide 43:

Pro matematické vyhodnocení byl použit vzorec : $E_n = \frac{x_{lab} - x_{ref}}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}}$, kde :

x_{lab} - hodnota uvedená účastníkem DMPZ, U_{lab} - nejistota hodnoty x_{lab},
x_{ref} - referenční hodnota, U_{ref} - nejistota referenční hodnoty.

V případě, že $|E_n| \leq 1$, je měření hodnoceno jako **vyhovující** (označeno A), tzn. odchylka hodnoty uvedené účastníkem od referenční hodnoty je menší nebo rovna $\pm \sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}$.

V případě, že $|E_n| > 1$, je měření hodnoceno jako **nevyhovující** (označeno N).

Tabulka výsledků hodnocení naměřených hodnot z kalibračních listů je uvedena v příloze.

Hodnocení:	Počet hodnot celkem	32
	Počet přijatelných hodnot celkem	32
	v %	100

Hodnocení obsahové stránky kalibračních listů není obsahem této zprávy.

Závěr: Účastník dvoustranného mezilaboratorního porovnávání zkoušek

s p l n i l

požadavky stanovené pro dvoustranné mezilaboratorní porovnávání zkoušek v daném rozsahu a je mu vydáno Osvědčení o účasti v dvoustranném mezilaboratorním porovnávání zkoušek číslo 0318-OV-C3082-07.

Příloha: ke Zprávě o vyhodnocení dvoustranného mezilaboratorního porovnání číslo 0318-ZV-C3082-07

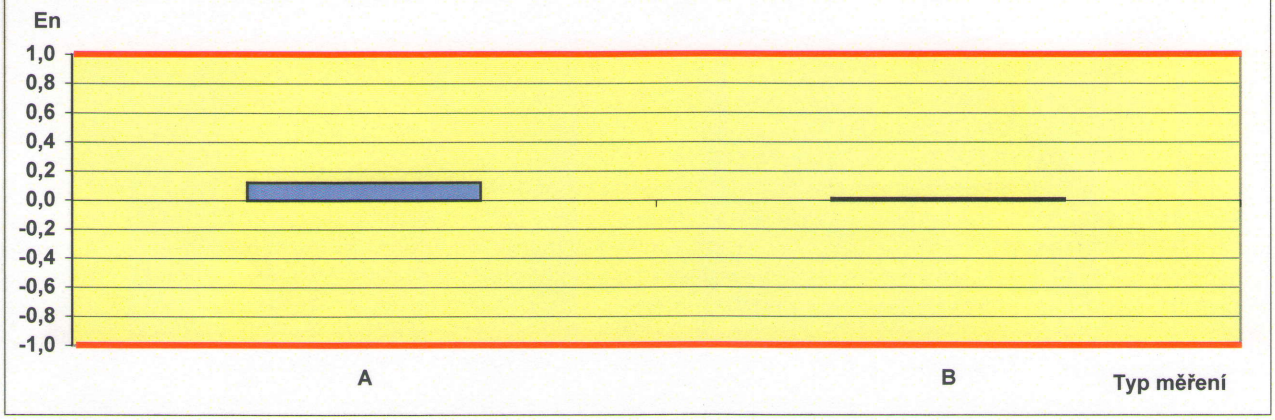
Měřidlo:	Zkušební síto						
Výrobce:	VÚSH						
Typ:	standard - průměr 200 mm						
Výrobní číslo:	22235						
Jmen. rozměr:	0,063 mm						
Etalon:	kamerový měřič Tester 2D						
Typ měření	**xlab [mm]**	**Ulab [mm]**	**xref [mm]**	**Uref [mm]**	**xlab-xref [mm]**	**En**	**Hodnocení**
A	0,0641	0,0007	0,0639	0,0015	0,0002	**0,121**	**A**
B	0,0632	0,0007	0,0632	0,0015	0,0000	**0,000**	**A**

Celkový počet měření:	**2**
Počet vyhovujících výsedků (A):	**2**
Počet nevyhovujících výsedků (N):	**0**
Úspěšnost v %:	**100,0**

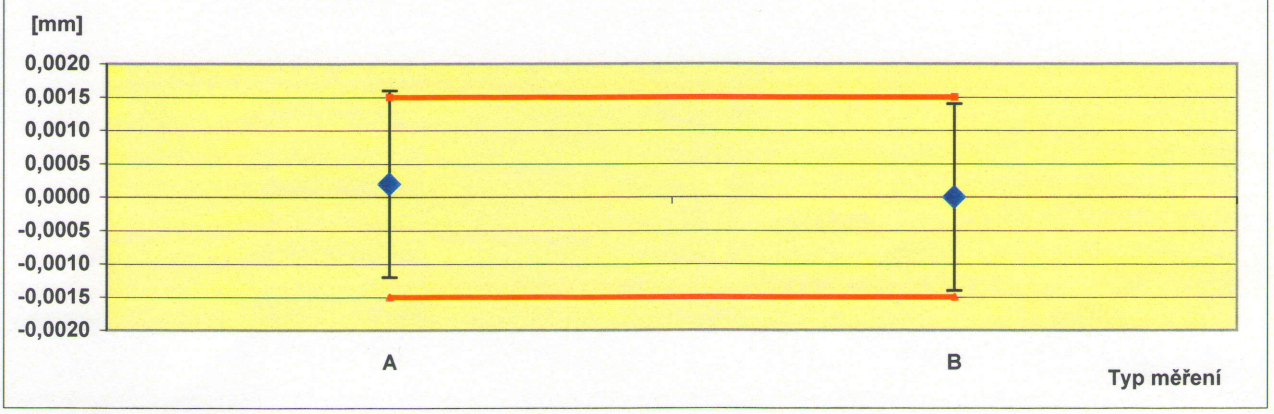
Legenda:	
xlab, xref	naměřená hodnota
Ulab, Uref	nejistota měření

Poznámka: Typ měření A značí ve směru osnovy, typ měření B značí ve směru útku.

Závislost hodnot En



Odchylky od referenčních hodnot v pásmu referenčních nejistot



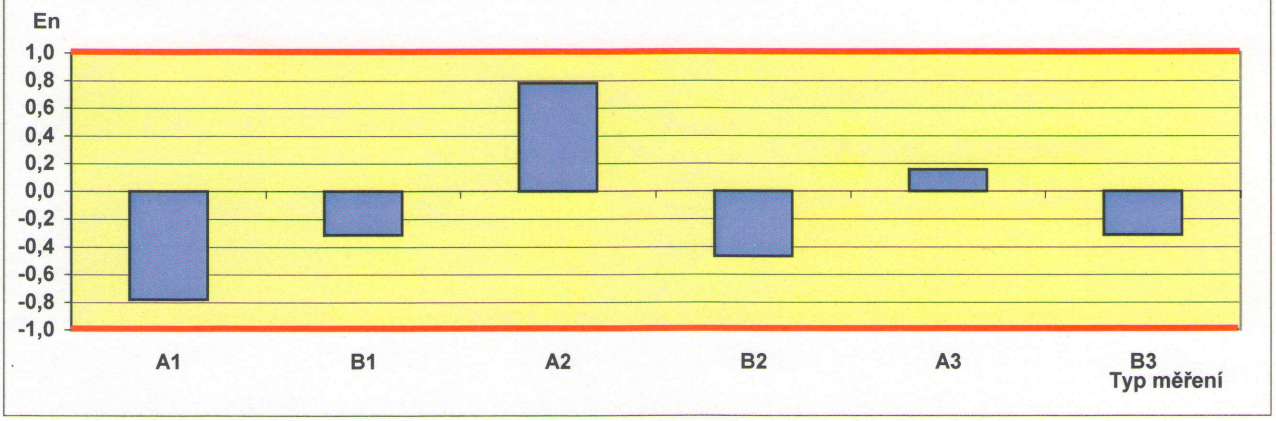
Měřidlo:	Zkušební síto						
Výrobce:	VÚSH						
Typ:	standard - průměr 200 mm						
Výrobní číslo:	22236						
Rozměr:	2 mm (čtvercové otvory)						
Etalon:	kamerový měřič Tester 2D						
Typ měření	**xlab [mm]**	**Ulab [mm]**	**xref [mm]**	**Uref [mm]**	**xlab-xref [mm]**	**En**	**Hodnocení**
A1	1,998	0,004	2,003	0,005	-0,005	**-0,781**	A
B1	1,994	0,004	1,996	0,005	-0,002	**-0,312**	A
A2	1,971	0,004	1,966	0,005	0,005	**0,781**	A
B2	1,975	0,004	1,978	0,005	-0,003	**-0,469**	A
A3	1,990	0,004	1,989	0,005	0,001	**0,156**	A
B3	1,987	0,004	1,989	0,005	-0,002	**-0,312**	A

Celkový počet měření:	6
Počet vyhovujících výsedků (A):	6
Počet nevyhovujících výsedků (N):	0
Úspěšnost v %:	100,0

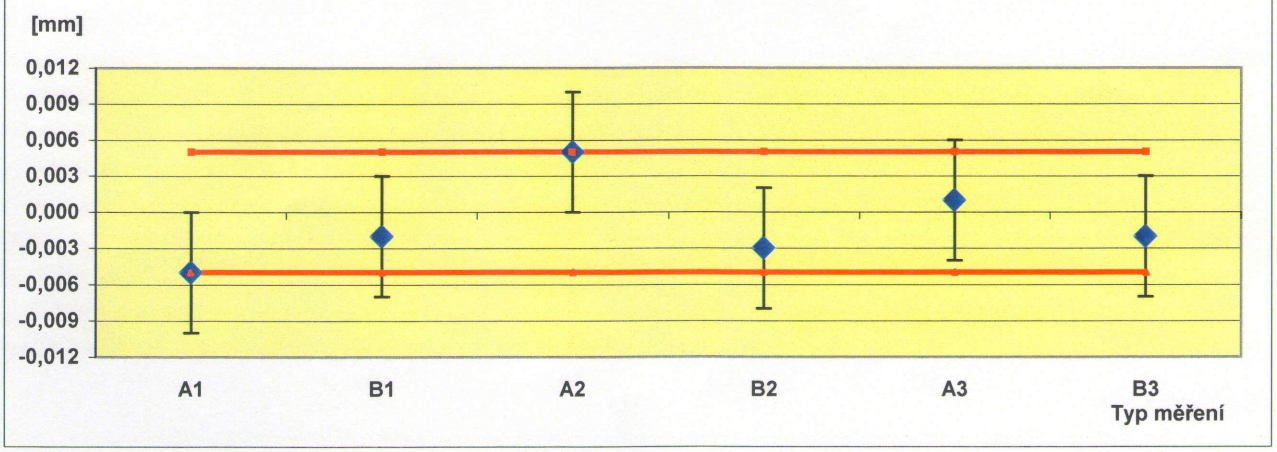
Legenda:	
xlab, xref	naměřená hodnota
Ulab, Uref	nejistota měření

Poznámka: Typ měření A značí ve směru A, typ měření B značí ve směru B. Číslo 1 představuje maximální hodnotu otvoru, č. 2 minimální hodnotu otvoru a č. 3 průměrnou hodnotu otvorů.

Závislost hodnot En



Odchylky od referenčních hodnot v pásmu referenčních nejistot



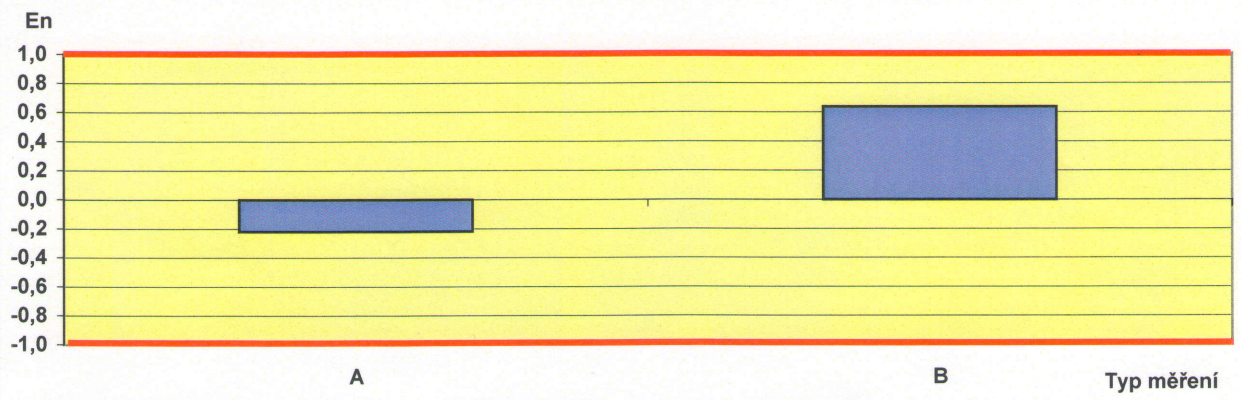
Měřidlo:	Zkušební síto						
Výrobce:	VÚSH						
Typ:	standard - průměr 200 mm						
Výrobní číslo:	22237						
Jmen. rozměr:	2,000 mm						
Etalon:	kamerový měřič Tester 2D						
Typ měření	**xlab [mm]**	**Ulab [mm]**	**xref [mm]**	**Uref [mm]**	**xlab-xref [mm]**	**En**	**Hodnocení**
A	2,0131	0,0033	2,0139	0,0015	-0,0008	**-0,221**	**A**
B	2,0174	0,0033	2,0151	0,0015	0,0023	**0,634**	**A**

Celkový počet měření:	**2**
Počet vyhovujících výsedků (A):	**2**
Počet nevyhovujících výsedků (N):	**0**
Úspěšnost v %:	**100,0**

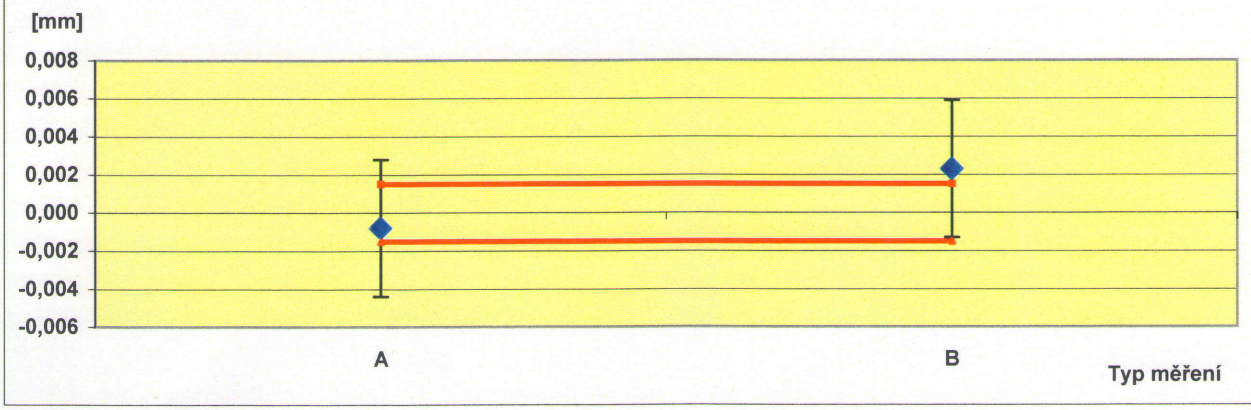
Legenda:	
xlab, xref	naměřená hodnota
Ulab, Uref	nejistota měření

Poznámka: Typ měření A značí ve směru osnovy, typ měření B značí ve směru útku.

Závislost hodnot En



Odchylky od referenčních hodnot v pásmu referenčních nejistot



Příloha: ke Zprávě o vyhodnocení dvoustranného mezilaboratorního porovnání číslo 0318-ZV-C3082-07

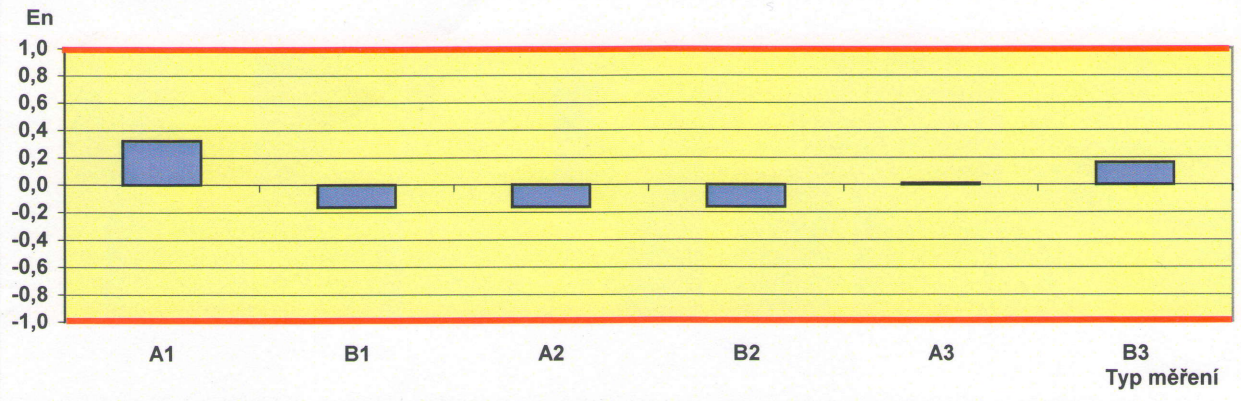
Měřidlo:	Zkušební síto						
Výrobce:	VÚSH						
Typ:	standard - průměr 200 mm						
Výrobní číslo:	22238						
Rozměr:	2,2 x 20 mm (podélné otvory)						
Etalon:	kamerový měřič Tester 2D						
Typ měření	**xlab [mm]**	**Ulab [mm]**	**xref [mm]**	**Uref [mm]**	**xlab-xref [mm]**	**En**	**Hodnocení**
A1	2,227	0,006	2,225	0,002	0,002	**0,323**	**A**
B1	20,091	0,006	20,092	0,002	-0,001	**-0,161**	**A**
A2	2,207	0,006	2,208	0,002	-0,001	**-0,162**	**A**
B2	20,066	0,006	20,067	0,002	-0,001	**-0,162**	**A**
A3	2,216	0,006	2,216	0,002	0,000	**0,000**	**A**
B3	20,079	0,006	20,078	0,002	0,001	**0,162**	**A**

Celkový počet měření:	6
Počet vyhovujících výsledků (A):	6
Počet nevyhovujících výsledků (N):	0
Úspěšnost v %:	100,0

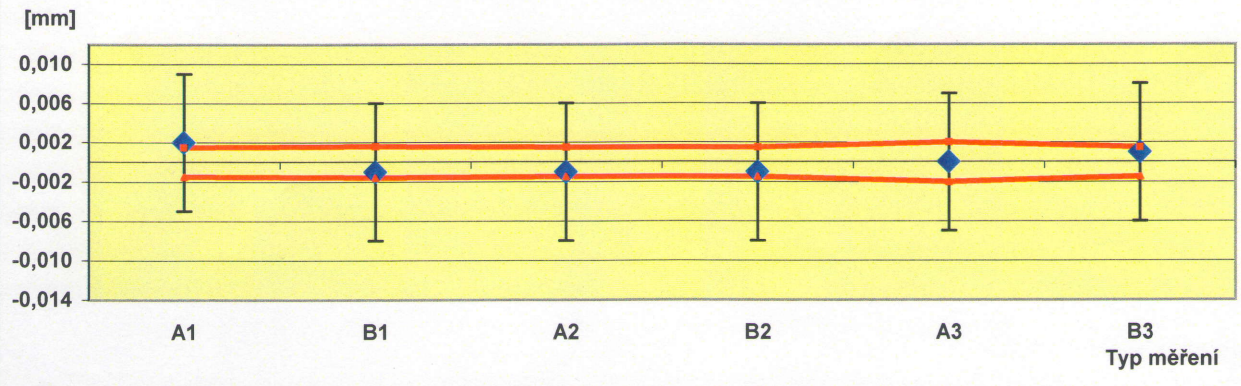
Legenda:	
xlab, xref	naměřená hodnota
Ulab, Uref	nejistota měření

Poznámka: Typ měření A značí ve směru šířky, typ měření B značí ve směru délky. Číslo 1 představuje maximální hodnotu otvoru, č. 2 minimální hodnotu otvoru a č. 3 průměrnou hodnotu otvorů.

Závislost hodnot En



Odchylky od referenčních hodnot v pásmu referenčních nejistot



PŘÍLOHA 3 – Kalibrační list drátkových etalonů

Český metrologický institut
Okružní 31, Brno, 638 00
Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, Brno, 638 00
Kalibrační laboratoř č. 2202
akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s.

K 2202

KALIBRAČNÍ LIST

č. 6033-KL-D216-07

Datum vystavení : 5. červen 2007

ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT Oblastní inspektorát BRNO 60

.....

Ing. Václav Duchoň,
vedoucí oddělení délky

Zákazník	:	VUSTAH, a.s. Hněvkovského 65, 617 00 Brno
Měřidlo	:	Sada etalonových drátků 6 ks
Výrobce	:	-
Identifikační číslo	:	-
Rozsah	:	dle listu č. 2
Etalon	:	

Název	*Identif. č.*	*Číslo KL*
délkoměr SIP 1002 M	1103	6033-KL-L047-06

Podmínky měření : Teplota vzduchu v laboratoři (20 ± 0,3) °C

Nejistota měření : U = 0,0005 mm

Uvedená rozšířená nejistota je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k=2, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95 %. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA4/02.

Metoda měření : Měření se uskutečnilo podle kalibračního postupu č. 633-MP-C029.

Kalibrační list (KL) nesmí být bez písemného svolení kalibrační laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu stran. Změny a doplňky mohou být provedeny pouze laboratoří, která dokument vystavila. Výsledky měření platí jen pro měřidlo uvedené v KL.

Výsledky měření :

Naměřené průměry drátků [mm] :

č.1	**1,5000**
č.2	**0,7251**
č.3	**0,6205**
č.4	**0,3352**
č.5	**0,1002**
č.6	**0,0498**

Kalibraci provedl : Ing. Václav Duchoň

Dne : 5. 6. 2007

ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT
Oblastní inspektorát Brno
Okružní 31
638 00 BRNO
633

PŘÍLOHA 4 – Výpočet nejistot měření pro Tester2D

Výzkumný ústav stavebních hmot, a. s.
AKL – SÍTA
Hněvkovského 30/65, 617 00 Brno

Stanovení nejistot měření při kalibraci sít

Související dokument č. 17

Vypracoval:	Jiří Petlach	.....
Schválil:	Jiří Petlach	.....
Odpovědnost za aktualizaci:	Jiří Petlach	
Platnost od data:	3. února 2006	
Počet vyhotovení:	2	
Rozdělovník:	1. vedoucí AKL - SÍTA 2. pracovníci AKL - SÍTA	
Výtisk č.	1	
Celkový počet stran:	34	
Vydání:	2.	

Stanovení nejistot měření při kalibraci sít AKL-SÍTA	Kapitola: 0 List: 1 Celkem stran: 2 Výtisk č.: 1 Nahrazuje: 03.02.2006
Název kapitoly: Seznam revizí a změn	Datum vydání: 05.02.2008 Kontroloval:

0. SEZNAM REVIZÍ A ZMĚN

Kapitola/List	Datum změny nebo revize	Důvod změny nebo revize	Změnu/revizi Schválil/opravil
celý SD	29. 8. 2005	Nový výpočet nejistoty pro nové měřidlo - digitální posuvné měřítko. Přečíslovány listy a celkový počet stran	
celý SD	3. 2. 2006	Nový výpočet nejistoty pro rozšířený kalibrační postup KP T2C. Přečíslovány listy a celkový počet stran	
	5. 2. 2008	Nový výpočet nejistoty měření pro TESTER2D	

1. ROZBOR NEJISTOT MĚŘENÍ

1.1 MĚŘIDLA A MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ POUŽÍVANÉ PŘI KALIBRACI A PŘI STANOVENÍ NEJISTOT MĚŘENÍ SÍT

I. Čárkové měřítko (HEO)

II. Měřicí drátky

III. Kalibrační obrazce S1-S8

IV. Abbeho komparátor

V. Posuvná měřítka

VI. Kontrolní trny

VII. Laserový měřič sít – LMS 98

VIII. Kamerový měřič TESTER2D

Tyto měřidla a měřicí zařízení se používají v různých kombinacích podle:

1. druhu třídicí přepážky
2. velikosti měřených otvorů

1.2 KOMBINACE POUŽITÝCH MĚŘIDEL A MĚŘICÍCH ZAŘÍZENÍ PRO RŮZNÉ VELIKOSTI OTVORŮ A RŮZNÉ TŘÍDICÍ PŘEPÁŽKY

Typ přepážky	Velikost otvorů [mm]	Měřidla a měř. zařízení
Tkaniny	0 – 11,2 0,020 – 11,2 0,040 – 20 11,2 – 125	I. IV. II. VII. II. III. VIII. V.
Plechy	0,5 – 11,2	I. IV.
	0,5 – 11,2	II. VII.
	0,5 – 11,2 11,2 - 125	II. III. VIII. V. VI.

1.3 PŘEHLED NEJISTOT PŘI MĚŘENÍ

1. nejistota kalibrace komparátoru
2. nejistota měření na komparátoru
3. nejistota měření měřicích drátků
4. nejistota kalibrace drátu

5. nejistota měření kontrolního trnu
6. nejistota měření posuvným měřítkem
7. nejistota měření kontrolním trnem
8. nejistota kalibrace LMS 98
9. nejistota měření tkaniny na LMS 98
10. nejistota měření trnu na LMS98
11. nejistota měření děrovaného plechu na LMS98
12. nejistota kalibrace TESTER2D
13. nejistota měření tkaniny na TESTERu2D
14. nejistota měření plechu na TESTERu2D

1.4 VLASTNÍ STANOVENÍ NEJISTOT

1.4.1 Členění výpočtu nejistot měření podle typu třídicí přepážky a velikosti otvorů

1.4.1.1 Třídicí přepážka z tkaniny (nebo kovové tyče kruhového průřezu)

a) 0 – 11,2 mm
1. Nejistota kalibrace komparátoru
2. Nejistota měření na komparátoru
3. Nejistota měření měřicích drátků
4. Nejistota kalibrace drátu (otvoru)

b) 0,020 – 11,2 mm
1. Nejistota kalibrace LMS 98
2. Nejistota měření tkaniny na LMS 98

c) 11,2 – 125 mm
1. Nejistota měření kontrolního trnu posuvným měřítkem
2. Nejistota měření posuvným měřítkem

d) 0,040 – 11,2 mm

1. Nejistota kalibrace TESTERu2D
   - nejistota určení kalibrační konstanty (přepočtená přes počet pixelů reálně odpovídající měřené velikost otvoru síta na délku v μm
   - nejistota nastavení zoomu objektivu
   - nejistota určení komparační úrovně hrany (rozdíl mezi správnou a měřenou hodnotou měřícího drátku/trnu
2. Nejistota měření drátku (trnu) TESTERem2D
3. Nejistota měření tkaniny TESTERem2D

1.4.1.2 Třídicí přepážka z perforovaného plechu

a) 0,5 – 11,2 mm

1. Nejistota kalibrace komparátoru
2. Nejistota měření na komparátoru
3. Nejistota měření kontrolního trnu
4. Nejistota kalibrace otvoru

b) 0,5 – 11,2 mm

1. Nejistota kalibrace LMS98
2. Nejistota měření trnu na LMS98
3. Nejistota měření děrovaného plechu na LMS98

c) 0,5 – 20 mm

1. Nejistota kalibrace TESTERu2D
   - nejistota určení kalibrační konstanty (přepočtená přes počet pixelů reálně odpovídající měřené velikost otvoru síta na délku v μm
   - nejistota nastavení zoomu objektivu
   - nejistota určení komparační úrovně hrany (rozdíl mezi správnou a meřenou hodnotou měřícího drátku/trnu
2. Nejistota měření děrovaného plechu na TESTERu2D

d) 0,5 – 11,2 mm

1. Nejistota měření kontrolním trnem

e) 11,2 – 125 mm

1. Nejistota měření kontrolního trnu posuvným měřítkem
2. Nejistota měření posuvným měřítkem

1.4.2 Rovnice pro výpočet nejistot

a) Nejistota kalibrace komparátoru

$u_{K.K.} = \sqrt{(u_A^2 + u_B^2)} = \sqrt{[(\sigma\sqrt{n})^2 + u_E^2]}$

kde. u_E – nejistota etalonu z kalibračního listu

b) Nejistota měření na komparátoru

$u_K = \sqrt{[u_{K\cdot K}^2 + (\delta_{MAX} / \sqrt{3})^2]}$

kde: δ_{MAX} = ø absolutních chyb měření

c) Nejistota měření měřicích drátků (kontrolního trnu)

$u_{M.D.} = \sqrt{[(\sigma_{M.D.} / \sqrt{n})^2 + (\delta / \sqrt{3})^2 + u_K^2 + u_M^2]}$

$u_T = \sqrt{[(\sigma_T / \sqrt{n})^2 + (\delta / \sqrt{3})^2 + u_K^2 + u_M^2]}$

kde u_M – nejistota měření měřicích drátků (kontrolního trnu) z kalibračního listu

d) Nejistota kalibrace drátu (otvoru)

$u_{K.D.} = \sqrt{[(\sigma_D / \sqrt{n})^2 + u_K^2]}$

$u_{K.O.} = \sqrt{[(\sigma_O / \sqrt{n})^2 + u_K^2]}$

e) Nejistota měření na LMS

$u_{LMS} = \sqrt{[(\sigma_{LMS} / \sqrt{n})^2 + u_{K.O.}^2 + u_{RZ}^2]}$

kde: $u_{RZ} = 0{,}5 / \sqrt{3}$ (RZ – rozsah zadání na LMS – 0,5 μm)

f) Nejistota výsledku na LMS

$U = \sqrt{[u_{LMS}^2 + (A / \sqrt{3})^2]}$

kde: A – Z/10 nebo 2,5 μm, podle toho, která hodnota je nižší

g) Nejistota měření kontrolního trnu posuvným měřítkem

$u_{T.P.M.} = \sqrt{[(u_A^2 + u_B^2]}$

$u_A = \sigma / \sqrt{n}$

$u_B = \sqrt{[\, u_E^2 + L^2\, \alpha^2\, u_{\Delta t}^2 + L^2\, u_{\Delta\alpha}^2\, u_{\Delta T}^2 + (\delta / \sqrt{3})^2 + u_M^2]}$

kde: $u_E = \delta / \sqrt{3} = 20 / \sqrt{3}$

u_M = nejistota měření kontrolního trnu z kalibračního listu

L = měřená velikost otvoru

$u_t = 4 / \sqrt{3}$ rozdíl teplot posuvného měřítka a síta

$u_T = \delta T_{MAX} / \sqrt{3}$ výkyvy teploty v místnosti

$u = \delta_\alpha / \sqrt{3}$

h) Nejistota měření posuvným měřítkem

$u_{P.M.} = \sqrt{[u_{T.P.M.}^2 + (\sigma / \sqrt{n})^2]}$

i) Nejistota měření kontrolním trnem

$u_{K.T.} = \sqrt{[\, u_M^2 + L^2\, \alpha^2\, u_{\Delta t}^2 + L^2\, u_{\Delta\alpha}^2\, u_{\Delta T}^2 + (\delta / \sqrt{3})^2)}$

kde: u_M = nejistota měření kontrolního trnu z kalibračního listu

δ = rozdíl mezi skutečnou velikostí průměru kontrolního trnu a požadovanou normovou velikostí otvoru

j) Nejistota kalibrace LMS 98

$u_{K.LMS98} = \sqrt{[(\sigma_{M.D.} / \sqrt{n})^2 + (\delta / \sqrt{3})^2 + u_S^2 + u_M^2]}$

k) Nejistota měření tkaniny na LMS 98

$u_{LMS98} = \sqrt{[(\sigma_{LMS98} / \sqrt{n})^2 + u_{HS}^2 + u_{K.LMS98}^2]}$

kde: u_M = nejistota měření měřicích drátků z kalibračního listu

u_S = nejistota daná citlivostí měřicího čidla

u_{HS} = nejistota daná hloubkou ostrosti

l) Nejistota měření trnu na LMS98

$u_{T.LMS98} = \sqrt{[(\sigma_{T.LMS98} / \sqrt{n})^2 + (\delta / \sqrt{3})^2 + u_M^2 + u_{K.LMS98}^2]}$

kde: u_M = nejistota měření trnu z kalibračního listu

m) Nejistota měření děrovaného plechu na LMS98

$u_{P.LMS98} = \sqrt{[(\sigma_{P.LMS98} / \sqrt{n})^2 + u_{HS}^2 + u_{T.LMS98}^2]}$

kde: u_{HS} = nejistota daná hloubkou ostrosti)

n) Nejistota kalibrace Testeru2D

$u_{K.Tester2D} = \sqrt{[(\sigma_{KO} / \sqrt{n})^2 + (\delta / \sqrt{3})^2 + (\sigma_{MD}/\sqrt{n}) + u_{E(obr)}^2 + u_{E(dr)}^2]}$

kde: σ_{KO} = směrodatná odchylka kalibrace z kalibračního obrazce × počet pixelů připadající na měřenou velikost otvoru

δ = rozdíl skutečné a měřené velikosti drátků/trnů z KL

o) Nejistota měření tkaniny na Testeru2D

$u_{Tester2D} = \sqrt{[(\sigma_{O.Tester2D} / \sqrt{n})^2 + u_{K.Tester2D}^2]}$

p) Nejistota měření děrovaného plechu na Testeru2D

$u_{Tester2D} = \sqrt{[(\sigma_{O.Tester2D} / \sqrt{n})^2 + u\delta_T^2 + u_{K.Tester2D}^2]}$

kde: $u\delta_T$ = nejistota z výkyvů teplot v místnosti

Vysvětlivky k rovnicím výpočtu nejistot:

u_A - nejistota typu A

u_B - nejistota typu B

u_E - nejistota etalonu z kalibračního listu

u_K - nejistota měření na komparátoru

$u_{M.D.}$ - nejistota měření měřicích drátků

u_T - nejistota měření kontrolního trnu

u_M - nejistota měření měřicích drátků (kontrol. trnu) z kalibračního listu

$u_{K.D.}$ - nejistota kalibrace drátu

$u_{K.O.}$ - nejistota kalibrace otvoru

u_{LMS} - nejistota měření na LMS

U - nejistota výsledku na LMS

u_{RZ} - nejistota z rozsahu zadání na LMS

$u_{T.P.M.}$ – nejistota měření kontrolního trnu posuvným měřítkem

$u_{P.M.}$ - nejistota měření posuvným měřítkem

$u_{\Delta t}$ - nejistota z rozdílu teplot posuvného měřítka (resp. kontrolního trnu) a síta

$u_{\Delta\alpha}$ - nejistota z rozdílu tepelné roztažnosti posuvného měřítka (resp. kontrolního trnu) a síta

$u_{\Delta T}$ - nejistota z výkyvů teplot v místnosti

$u_{K.T.}$ – nejistota měření kontrolním trnem

u_S – nejistota daná citlivostí měřicího čidla

u_{HS} – nejistota daná hloubkou ostrosti

$u_{K.LMS98}$ – nejistota kalibrace LMS 98

$u_{T.LMS98}$ – nejistota měření trnu na LMS98

$u_{P.LMS98}$ – nejistota měření děrovaného plechu na LMS 98

$u_{K.Tester2D}$ – nejistota kalibrace Testeru 2D

$u_{D.Tester2D}$ – nejistota měření drátků (trnů) na Testeru 2D

$u_{O.Tester2D}$ – nejistota měření otvoru síta (tkanina/plech) na Testeru2D

2.1.5 Velikost otvoru 0,040 – 20 mm na TESTERu2D (TKANINA i PLECH)

Tabulka : Nejistota určení kalibrační konstanty Testeru 2D (prováděna změna zoomu)

Zvětšení/velikost otvoru [µm]	ø kalibrační konstanty n - měření (µm na 1pix)	σ konstanty × počet pixelů na 1 otvor měřené vzdálenosti [µm]
40	0,895	0,00
63	0,939	0,00
125	1,236	0,11
250	1,903	0,07
500	2,198	0,19
1000	4,023	0,13
2000	7,228	0,87
4000	8,890	1,78
8000	14,733	4,34
11200	14,733	2,13
20000	25,247	5,20

Tabulka : Měření drátků a trnů na Testeru2D (zjištění vlivu určení hrany a ostření)

Zvětšení / velikost otvoru [µm]	Správná velikost drátku / trnu z KL	Ø měření drátků	σ [µm]	δ [µm]
45	49,8	49,8	0,04	+0,00
125	100,2	99,9	0,30	-0,26
250	335,2	334,2	1,13	-0,97
500	620,5	619,5	0,35	-1,04
1000	1500,3	1499,2	0,91	-1,06
2000	2091,0	2091,3	1,36	+0,33
4000	3871,0	3869,3	3,32	-1,37
8000	7810,0	7813,3	1,87	+3,34
20000	11431,0	11436,5	9,44	+5,45

Výpočet nejistoty kalibrace Testeru2D:

$$u_{K.Tester2D} = \sqrt{[(\sigma_{KO} / \sqrt{n})^2 + (\sigma_{MD}/\sqrt{2}) + (\delta / \sqrt{3})^2 + u_{E(obr)}{}^2 + u_{E(dr)}{}^2]}$$

Velikost otvoru :	Nejistota kalibrace :	pro k=2:
40 µm	0,29 µm	0,6 µm
63 µm	0,34 µm	0,7 µm
125 µm	0,43 µm	0,9 µm
250 µm	0,90 µm	1,8 µm
500 µm	1,12 µm	2,3 µm
1000 µm	1,16 µm	2,4 µm
2000 µm	1,95 µm	3,9 µm
4000 µm	2,30 µm	4,6 µm
8000 µm	3,68 µm	7,4 µm
11200 µm	4,44 µm	8,9 µm
20000 µm	5,32 µm	10,7 µm

Tabulka : Opakované měření jednoho otvoru u sít na Testeru2D

Nominální velikost otvoru [µm]	45 tkani	125 tkani	250 tkani.	500 tkani	1000 tkani	2000 tkani	4000 plech	8000 plech	20000 plech
σ [µm]	0,22	1,13	0,62	0,96	2,0	3,02	3,3	9,47	11,25

Příklad výpočtu nejistoty měření na Testeru2D:

$$u_{Tester2D} = \sqrt{[(\sigma_{O.Tester2D} / \sqrt{n})^2 + u\delta_T{}^2 + u_{K.Tester2D}{}^2]}$$

Rozšířená nejistota měření :

Velikost otvoru :	Nejistota měření U (pro pokrytí 95% - k=2) :
40 µm	0,6 µm
63 µm	0,8 µm
125 µm	1,2 µm
250 µm	1,9 µm
500 µm	2,4 µm
1000 µm	2,5 µm
2000 µm	4,2 µm
4000 µm	5,3 µm
8000 µm	8,3 µm
11200 µm	11,7 µm
20000 µm	15,1 µm

2.3 ROZŠÍŘENÁ NEJISTOTA U PŘI MĚŘENÍ SÍT PRO P = 0,95 (k = 2)

Třídicí přepážka z tkaniny		
Velikost otvoru [µm]	U [µm]	Měřicí zařízení
0 – 32	1,1	komparátor
40	0,6	Tester2D
≤ 63	0,8	Tester2D
≤ 125	1,2	Tester2D
≤ 250	1,9	Tester2D
≤ 500	2,4	Tester2D
≤ 1000	2,5	Tester2D
≤ 2000	4,2	Tester2D
≤ 4000	5,3	Tester2D
≤ 8000	8,3	Tester2D
≤ 11200	11,7	Tester2D
≤ 20000	15,1	Tester2D
20 – 56	1,0	LMS 98
63 – 450	1,4	LMS 98
500 – 1800	2,5	LMS 98
2000 – 4000	3,6	LMS 98
4500 – 11200	5,9	LMS 98
4000 – 11200	2,8	komparátor
11200 – 125000	23,0	posuvné měřítko analog.
11200 – 125000	40,3	posuvné měřítko digitál.
Třídicí přepážka z perforovaného plechu / tyčová síta		
Velikost otvoru [mm]	U [µm]	Měřicí zařízení
0,5 – 11,2	2,8	komparátor
≤ 1000	2,5	Tester2D
≤ 2000	4,2	Tester2D
≤ 4000	5,3	Tester2D
≤ 8000	8,3	Tester2D
≤ 11200	11,7	Tester2D
≤ 20000	15,1	Tester2D
0,5 - 1,8	3,9	LMS 98
2,0 - 4,0	4,7	LMS 98
4,5 - 11,2	6,6	LMS 98
1,5; 2; 3,15; 4; 5; 5,6; 6,3; 7,1; 8; 10; 11,2	2,6 2,6	kontrolní trn kontrolní trn
11,2 – 125 11,2 – 125	23,0 40	posuvné měřítko analog. posuvné měřítko digitál.

3. STANOVENÍ NEJLEPŠÍ SCHOPNOSTI MĚŘENÍ (NSM)

3.1 ČLENĚNÍ VÝPOČTU NSM PODLE TYPU TŘÍDICÍ PŘEPÁŽKY A VELIKOSTI OTVORŮ SÍTA

3.1.1 Třídicí přepážka z drátěné tkaniny

a) 0 – 11,2 mm
1. Nejistota kalibrace komparátoru
2. Nejistota měření na komparátoru
3. Nejistota měření měřicích drátků

b) 0,020 – 11,2 mm
1. Nejistota kalibrace LMS98
2. Nejistota měření na LMS 98 bez odchylky způsobené hloubkou ostrosti

c) 11,2 – 125 mm
1. Nejistota měření kontrolního trnu posuvným měřítkem

d) 0,040 – 20,0 mm
1. Nejistota kalibrace TESTERu2D
   - nejistota určení kalibrační konstanty (přepočtená přes počet pixelů reálně odpovídající měřené velikost otvoru síta na délku v µm
   - nejistota nastavení zoomu objektivu
2. Nejistota měření tkaniny TESTERem2D

3.1.1.1 Třídicí přepážka z perforovaného plechu

a) 0,5 – 11,2 mm
1. Nejistota kalibrace komparátoru
2. Nejistota měření na komparátoru
3. Nejistota měření kontrolního trnu
4. Nejistota kalibrace otvoru

f) 0,5 – 11,2 mm
1. Nejistota kalibrace LMS98
2. Nejistota měření trnu na LMS98
3. Nejistota měření na LMS 98 bez odchylky způsobené hloubkou ostrosti

g) 0,5 – 20 mm

1. Nejistota kalibrace TESTERu2D

   - nejistota určení kalibrační konstanty (přepočtená přes počet pixelů reálně odpovídající měřené velikost otvoru síta na délku v µm

   - nejistota nastavení zoomu objektivu

2. Nejistota měření děrovaného plechu na TESTERu2D

g) 0,5 – 11,2 mm

1. Nejistota měření kontrolním trnem

h) 11,2 – 125 mm

1. Nejistota měření kontrolního trnu posuvným měřítkem

3.2 VÝPOČET NSM

3.2.1 Třídicí přepážka z drátěné tkaniny

3.2.1.1 Velikost otvoru 0 – 0,032 mm

Výpočet jako nejistota měření měřicího drátku ø 0,0498 mm

$u_{49,8} = \sqrt{[\sigma_{49,8} / \sqrt{n})^2 + (\delta / \sqrt{3})^2 + u_K^2 + u_M^2]}$

$u_{49,8} = 0,\ 0,3607\ \mu m$

$U_{49,8} = 2\ .\ u_{49,8} = 0,8\ \mu m$

3.2.1.2 Velikost otvoru 4 – 11,2 mm

Výpočet jako nejistota měření kontrolního trnu ø 11,2 mm

$u_{11,2} = \sqrt{[\sigma_{11,2} / \sqrt{n})^2 + (\delta / \sqrt{3})^2 + u_K^2 + u_M^2]}$

$u_{11,2} = 1,2850\ \mu m$

$U_{11,2} = 2\ .\ u_{11,2} = 2,6\ \mu m$

3.2.1.3 Velikost otvoru 0,032 – 4 mm

Výpočet jako nejistota měření na LMS (příklad pro otvor 0,032 mm)

$u_{LMS} = \sqrt{[(\sigma_{LMS} / \sqrt{n})^2 + u_{32}^2 + u_{RZ}^2]}$

$u_{LMS} = 0,4666\ \mu m$

$U_{32} = 2 \cdot u_{LMS} = 1{,}0$ µm

$U_{32} - U_{56} = 1{,}0$ µm

$U_{63} - U_{125} = 1{,}2$ µm

$U_{140} - U_{900} = 1{,}4$ µm

$U_{1000} - U_{1800} = 1{,}8$ µm

$U_{2000} - U_{4000} = 3{,}2$ µm

3.2.1.4 Velikost otvoru 0,020 – 11200 mm

Výpočet jako nejistota měření na LMS 98 bez odchylky způsobené hloubkou ostrosti (příklad pro otvor 11,2 mm)

$u_{LMS98} = \sqrt{[(\sigma_{LMS98}/\sqrt{n})^2 + u_{K.LMS98}^2]}$

$u_{LMS98} = 0{,}3814$

$U_{20} - U_{11200} = 2 \cdot u_{LMS98} = 0{,}8$ µm

3.2.1.5 Velikost otvoru 0,020 – 20 mm

Výpočet jako nejistota měření na TESTERu2D při dokonalém zaostření = minimální (kolmá) přechodová hrana

$u_{K.NMSTester2D} = \sqrt{[(\sigma_{KO} / \sqrt{n})^2 + u_{E(obr)}^2]}$

kde: σ_{KO} = směrodatná odchylka kalibrace z kalibračního obrazce × počet pixelů připadající na měřenou velikost otvoru

$u_{NMS.Tester2D} = \sqrt{[(\sigma_{O.Tester2D} / \sqrt{n})^2 + u\delta_T^2 + u_{K.NMSTester2D}^2]}$

Nejlepší měřící schonost :

Velikost otvoru :	Nejistota měření U (pro pokrytí 95% - k=2) :
40 µm	0,4 µm
63 µm	0,4 µm
125 µm	1,0 µm
250 µm	1,1 µm
500 µm	2,0 µm
1000 µm	2,0 µm
2000 µm	3,6 µm
4000 µm	4,1 µm
8000 µm	7,0 µm
11200 µm	9,5 µm
20000 µm	12,2 µm

3.2.2 Třídicí přepážka perforovaného plechu / tyčová síta

3.2.2.1 Velikost otvoru 0,5 – 11,2 mm (Abbého komparátor)

Výpočet jako nejistota měření kontrolního trnu ø 11,2 mm

3.2.2.2 Velikost otvoru 0,5 - 11,2 mm (LMS 98)

Výpočet jako nejistota měření síta z děrovaného plechu na LMS98 bez odchylky způsobené hloubkou ostrosti.

$u_{P.LMS98} = \sqrt{[(\sigma_{P.LMS98} / \sqrt{n})^2 + u_{T.LMS98}^2]} = \sqrt{[(0{,}000309/\sqrt{10})^2 + 1{,}578^2]} = 1{,}58\ \mu m$

$U_{500-11200} = 2 \times 1{,}58 = 3{,}2\ \mu m$

3.2.2.3 Velikost otvoru 0,5 – 20,0 mm (TESTER2D)

Výpočet nejistoty je shodný s postupem pro výpočet tkaniny viz kap. 3.2.1.5

3.2.2.4 Velikost otvoru 11,2 – 125 mm

Výpočet jako nejistota měření kontrolního trnu 11,2 mm posuvným měřítkem

a) Analogové posuvné měřítko

$u_{T.\,P.\,M.} = \sqrt{[\,u_E^2 + L^2\,\alpha^2\,u_{\Delta t}^2 + L^2\,u_{\Delta\alpha}^2\,u_{\Delta T}^2 + (\sigma/\sqrt{n})^2] + (\delta/\sqrt{3})^2 + u_M^2]}$

$u_{11429} = 11{,}3\ \mu m$

$u_{11429} = 2\,.\,u_{11429} = 22{,}6\ \mu m$

b) Digitální posuvné měřítko

$u_{T.\,P.\,M.} = \sqrt{[\,u_E^2 + L^2\,\alpha^2\,u_{\Delta t}^2 + L^2\,u_{\Delta\alpha}^2\,u_{\Delta T}^2 + (\sigma/\sqrt{n})^2] + (\delta/\sqrt{3})^2 + u_M^2]}$

$u_{11431} = 20{,}0\ \mu m$

$u_{11431} = 2\,.\,u_{11431} = 40{,}0\ \mu m$

3.2.2.5 Velikost otvoru 0,5 – 11,2 mm (kontrolní trny)

Výpočet jako nejistota měření kontrolním trnem bez hodnoty δ

$u_{K.\,T.} = \sqrt{(\,u_M^2 + L^2\,\alpha^2\,u_{\Delta t}^2 + L^2\,u_{\Delta\alpha}^2\,u_{\Delta T}^2)}$

Pro ø trnů 1,5; 2; 3,15; 4; 5; 5,6; 6,3; 7,1; 8; 10; a 11,2 mm je U = 1,1 μm

3.3 NEJLEPŠÍ SCHOPNOST MĚŘENÍ VELIKOSTI OTVORŮ SÍT PRO P=0,95 (k=2)

Měřená veličina nebo měřený přístroj či zařízení	Rozsah měření [μm]	Nejlepší schopnost měření [μm]	Identifikace metody Poznámky (měřicí zařízení)
Síto s třídicí přepážkou z drátěné tkaniny	0 - 32	0,8	komparátor Abbého
	≤ 63	0,4	Tester2D
	≤ 250	1,1	Tester2D
	≤ 1000	2,0	Tester2D
	≤ 2000	3,6	Tester2D
	≤ 4000	4,1	Tester2D
	≤ 8000	7,0	Tester2D
	≤ 11200	9,5	Tester2D
	≤ 20000	12,2	Tester2D
	0,020 – 11200	0,8	LMS 98
	4000 – 11200	2,6	komparátor Abbého
	11200 - 125000	23	posuvné měř.analog.
	11200 - 125000	40	posuvné měř.digitální
Síto s třídicí přepážkou z perforovaného plechu / tyčová síta	0,5 - 11200	2,6	komparátor Abbého
	≤ 1000	2,0	Tester2D
	≤ 2000	3,6	Tester2D
	≤ 4000	4,1	Tester2D
	≤ 8000	7,0	Tester2D
	≤ 11200	9,5	Tester2D
	≤ 20000	12,2	Tester2D
	0,5 - 11200	3,2	LMS 98
	1,5; 2; 3,15; 4; 5; 5,6; 6,3; 7,1; 8; 10; 11,2	1,1 1,1	kontrolní trn kontrolní trn
	11200 - 125000 11200 - 125000	23 40	posuvné měř.analog. posuvné měř.digitální

Vysvětlivky:

l_E – délka hlavního etalonu z kalibračního listu

δl – délka měřená komparátorem

δl_d – korekce na ohyb drátu

δl_O – měření otvoru komparátorem

l_x – velikost otvoru

δl_t – korekce na rozhraní kov – vzduch

δl_{OL} – měření otvoru na laserovém měřiči sít (LMS)

δl_{CL} – korekce na maximální odchylku LMS

l_{MD} – průměrná tloušťka měřicích drátků z kalibračního listu

l_S – citlivost měřicího čidla LMS 98

l_{HS} – odchylka způsobená hloubkou ostrosti LMS 98

δl_{LMS98} – průměrná tloušťka měřicích drátků měřená laserovým měřičem sít LMS 98

$\delta l_{O.LMS98}$ – měření otvoru tkaniny na LMS 98

$\delta l_{P.LMS98}$ – měření otvoru plechu na LMS 98

δ_t – rozdíl teplot měřidla a měřeného předmětu

δ_T – maximální výkyvy teploty okolí

l_{PM} – nejistota měřené délky posuvným měřítkem z kalibračního listu

l_{KT} – velikost kontrolního trnu z kalibračního listu

δl_{KT} – korekce na maximální odchylku měření kontrolního trnu posuvným měřítkem

$\delta l_{OPM.}$ – měření otvoru posuvným měřítkem

$\delta_{\Delta l}$ – korekce na maximální rozdíl velikosti kontrolního trnu a normové odchylky otvoru

l_{KO} – délka vzdálenosti středů v kalibračním obrazci

$\delta l_{OTesteru2D}$ – opakované měření 1 otvoru Testerem2D

Curriculum Vitae

Jméno:	Ing. Michal Kohoutek
Narozen:	7. 1. 1981 v Brně
Kontakt:	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 Větřáku 463, Jedovnice, Obor: Automatizační technika.

Praxe:

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