

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Měření rozměrů a pozic objektů s využitím CCD snímače

Measurement of dimensions and positions of objects by the use of the CCD sensor

Autoreferát disertační práce

Ing. Ondřej Zelinka, DiS.

Studijní program: P 2612 Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612V045 Technická kybernetika

Pracoviště: Ústav mechatroniky a technické informatiky
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
Technická univerzita v Liberci

Školitel: Ing. Milan Kolář, CSc.

Rozsah disertační práce

Počet stran: 117

Počet obrázků: 63

Počet vzorců: 81

Počet příloh: 3

Abstrakt

V práci je komplexně řešena problematika měření pomocí optického „thru-beam“ mikrometru s CCD snímačem. V první části práce je implementováno a na základě provedených měření porovnáno několik obecných metod pro dosažení subpixelového rozlišení. Následně je navržen vlastní algoritmus pro výpočet pozice hrany jasového profilu se subpixelovým rozlišením založený na komparační metodě. Součástí práce je popis odvození rozhodovací hladiny komparační metody z teorie Fresnelovy difrakce na nepropustné polorovině. Pro ověření vlastní implementace algoritmu v obvodu FPGA je navržena metodika zjištění chyby měření na pracovním rozsahu pomocí mikrometrických lineárních posuvů. Výsledky tohoto měření jsou dále použity pro potřeby kalibrace. Závěrem je na fyzicky realizovaném vzorku zařízení proveden soubor měření, na jehož základě je vyhodnocena souhrnná nejistota měření a zhodnoceny dosažené výsledky.

Klíčová slova: optický mikrometr, difrakce, bezkontaktní měření, CCD snímač, laserová dioda

Abstract

There is a complex solution of problems with measurement by optical “thru-beam” micrometer with CCD sensor. In the first part of this work it is implemented several universal methods for achievement of subpixel resolution. These methods are compared on the basis of executed measurements. Subsequently there is an algorithm designed for calculation of position of the edge in the brightness profile with subpixel resolution based on comparative method. As the part of the work there is a description of inference decision level of comparative method from Fresnel’s theory of diffraction by half plane. There is a procedure designed for verification of the algorithm implemented in FPGA circuit. This procedure employs two motorized micrometer linear stages for reference gauge pin positioning. Results of this measurement are used for calibration of designed micrometer in its measuring range. Finally on a physical realized sample of optical “thru-beam” micrometer it is executed collection of measurement, on its basis it is determined a final measurement uncertainty and achieved results are evaluated.

Keywords: optical micrometer, diffraction, non-contact measurement, CCD sensor, laser diode

Obsah

Abstrakt	3
Abstract	3
Obsah	4
Úvod	5
1 Současný stav.....	6
1.1 Optický mikrometr s CCD přijímačem.....	7
2 Cíle práce	9
3 Vlastní řešení	10
3.1 Detekce hrany objektu z jasového profilu CCD snímače	10
3.1.1 Výběr vhodné metody vyhodnocení pozice hrany	10
3.1.2 Modifikovaná metoda lineární interpolace	17
3.2 Difrakce světla na hraně objektu.....	19
3.2.1 Fresnelova difrakce na obdélníkovém otvoru	20
3.3 Určení chyby měření v pracovním rozsahu senzoru.....	23
3.3.1 Chyba měření po implementaci kalibrace	24
3.4 Vyjádření nejistoty měření	25
Závěr	26
Použitá literatura	27
Vlastní publikace	28

Úvod

Bezkontaktní měření rozměrů a pozic objektů je dnes častým požadavkem v mnoha průmyslových odvětvích. K často používaným měřidlům v této oblasti patří optické „thru-beam“ mikrometry, které lze použít pro automatizované měření statických i pohybujících se objektů. Největší výhodou této metody měření je samozřejmě absence fyzického kontaktu s měřeným materiálem a výrazně větší robustnost měření v porovnání s dnes hojně používanými kamerovými systémy, které pracují s odraženým světlem. Lze jimi například měřit i součásti z mechanicky snadno deformovatelných materiálů, jejichž charakter vylučuje použití klasických kontaktních metod. Nejširší oblast využití představují výrobní linky používané v rozmanitých odvětvích, od potravinářského průmyslu přes průmysl strojní, a konče např. výrobou cigaret.

Běžně komerčně dostupná zařízení tohoto typu, jejichž přesnost měření se pohybuje v řádu jednotek μm , používají pro vyhodnocení měření tzv. externí kontrolér. Ten zastává řídicí funkci v celém měřicím systému a díky svému velmi vysokému výpočetnímu potenciálu umožňuje aplikaci složitých algoritmů, které slouží k určení měřené pozice z digitalizovaného signálu obrazového snímače. Kontrolér také poskytuje svou hardwarovou kapacitu pro uživatelská rozhraní (displej, RS232, RS485, Ethernet atd.) a realizaci množství podpůrných funkcí (kalibrace měřených hodnot, nastavení offsetů, hlídání minim a maxim, nastavení měřicích módů atd.).

Existuje velké množství průmyslových aplikací, ve kterých by bylo výhodnější použít samostatné měřicí hlavy, která by v sobě měla všechny podstatné funkce implementované (především výpočetní algoritmy a řízení jednotlivých obvodů). Taková měřicí hlava by byla schopná dodávat změřené hodnoty bez použití komplikovaného kontroléru. Odeslání změřených hodnot, nastavení měřicího módu a případně jiných parametrů by bylo možné provádět přes komunikační rozhraní z nadřazeného systému, který je ve většině aplikací k dispozici např. ve formě PLC. Obdobná koncepce je bohužel používána pouze u optických mikrometrů s řádově nižší přesností než jsou zmíněné jednotky μm . Případná absence kontroléru může podstatně snížit nároky na využitý prostor. Komunikační rozhraní může být připojeno přímo do nadřazeného systému. V neposlední řadě může použití samostatné měřicí hlavy výrazně snížit pořizovací náklady měřicího systému. Z výše uvedených důvodů byla tato perspektivní problematika zvolena jako téma disertační práce.

1 Současný stav

Pojem optický mikrometr je běžně používaný pro různá měřicí zařízení, která se však svou konstrukcí a funkcí velmi liší. V této práci, související s měřením rozměrů a pozic objektů, budou popisovány tzv. „thru-beam“ optické mikrometry. Princip funkce těchto optických mikrometrů spočívá v osvětlení měřeného objektu kolimovaným svazkem paprsků (obr. 1). Objekt z části zastíněný svazek paprsků dopadá na přijímač (projekční metoda). V principu jsou používány dva způsoby vyhodnocení informace z přijímače – dva druhy optických detektorů. Pro jednoduché, ale velmi rychlé, měření bývá kolimovaný svazek paprsků soustředěn pomocí čočky na fotodiodu. Velikost objektu, případně pozice hrany je v tomto případě měřena pomocí množství světla dopadajícího na fotodiodu. Přesnějším a výrazně univerzálnějším způsobem je použití řádkových CCD nebo CMOS snímačů. Pomocí řádkových snímačů lze získat z paprsků dopadajících na přijímač mnohem více informací o měřených objektech než s použitím fotodiody. Vyhodnocení těchto informací je však výrazně komplikovanější než určení velikosti zastíněné části svazku v mikrometrech s fotodiodou.

Prvním kritériem pro dělení optických mikrometrů je tedy druh použitého detektoru – fotodioda nebo řádkový snímač. Druhým nejvýznamnějším kritériem pro rozdělení optických mikrometrů je zdroj světla (konstrukce vysílače). Jsou používány laserové nebo svítivé diody (LED).

Na hodnoty parametrů udávané různými výrobci má významný vliv mnoho aspektů – velikost měřicího rozsahu, vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem, vzdálenost mezi měřeným objektem a přijímačem, charakter měřeného objektu, průměrování výstupních hodnot atd. Každý výrobce má pro různé typy mikrometrů stanoveny vlastní podmínky, při jejichž dodržení jsou jím udané parametry platné. Z tohoto důvodu mohou uvedené parametry mikrometrů sloužit pouze k orientačnímu porovnání jednotlivých hardwarových koncepcí.

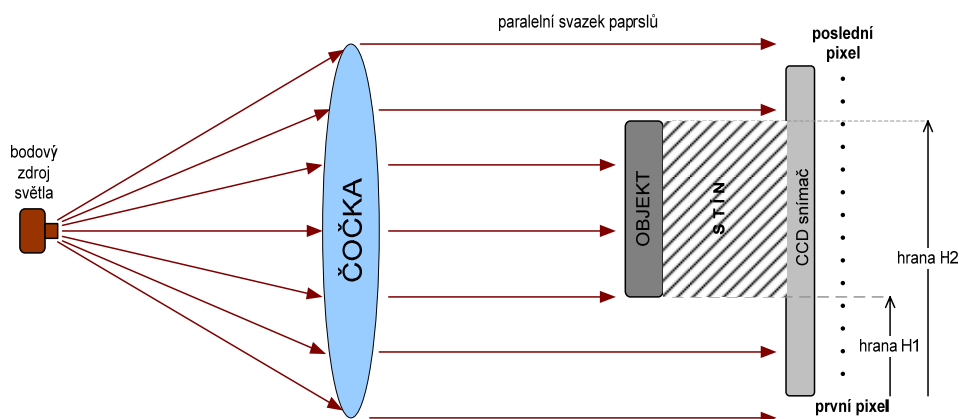
V konstrukci optických mikrometrů je obecným trendem použití samostatných měřicích hlav, které je třeba připojit do tzv. kontroléru. Součástí měřicí hlavy je vysílač a přijímač. Vysílač obsahuje světelný zdroj a kolimační optiku. Součástí přijímače bývá řádkový snímač, obvody pro předzpracování signálu a případně další optické komponenty eliminující nedostatky kolimovaného svazku paprsků vysílače. Kontrolér obsahuje hardware pro výpočet pozic hran, ovládací prvky a výstupní periferie (displej, RS232, RS485, Ethernet, reléové výstupy, analogové výstupy, atd.). Kontroléry často umožňují připojení většího počtu měřicích hlav. Na trhu jsou ale dostupné i mikrometry určené přímo k začlenění do měřicích systémů bez rozměrných a komplikovaných kontrolérů, tato koncepce bývá použita pro mikrometry s fotodiodou.

1.1 Optický mikrometr s CCD přijímačem

Měření rozměrů s využitím řádkového CCD snímače a světelného zdroje si lze představit jako mnoho optických závor seřazených vedle sebe s konstantní vzdáleností, kde by každé optické závoře odpovídal jeden pixel na řádkovém CCD.

Pozice (hrana) objektu není na profilu jasů jednotlivých pixelů snímače čitelná jednoznačně – světlo/tma. Hrana stínu objektu na CCD mění svůj jas plynule, především vlivem ohybu světla na hraně objektu. Strmost hrany závisí na vzdálenosti objektu od CCD. Z informace o pořadí jednotlivých pixelů a jejich jasů je pak možné určit pozice hran, případně rozměry objektů před CCD. Pro každé měření je rozhodující především přesnost, se kterou potřebujeme určit danou fyzikální veličinu, a možný rozsah, ve kterém se tato veličina bude pohybovat (měřicí rozsah). Způsob určení pozic hran z jasového profilu CCD je podstatný pro dosažitelnou přesnost měření, výpočetní náročnost a potřebný hardware.

Měření rozměrů pomocí lineárního CCD snímače můžeme dále rozdělit na dvě skupiny podle charakteru světla dopadajícího na CCD [1]: bodový zdroj světla (např. laserová dioda) nebo zdroj paralelních paprsků (bodový zdroj světla v ohnisku čočky, viz obr. 1). Při použití bodového zdroje světla umístěného v ohnisku čočky je objekt osvětlen paralelním svazkem paprsků, výsledek měření potom není závislý na vzdálenosti objektu od CCD snímače. Z výsledného profilu intenzit jasů pixelů na CCD zmizí perspektiva. Detail náběžné hrany jasového profilu lineárního CCD podle obr. 1 je možné vidět na obr. 9 v kapitole 3.1.2.



obr. 1 Kolimovaný svazek

V souvislosti s grafy průběhů jasů na řádkovém CCD snímači v následujícím textu chápeme pojem *pixel* jako diskrétní bod na řádkovém CCD snímači, který má své pořadové číslo, pro daný snímek mu přísluší konkrétní hodnota jasu a jeho pozice je dána pozicí středu pixelu CCD snímače. Osa x těchto grafů je tvořena pořadovými čísly jednotlivých pixelů. Reálnou velikost fyzicky existujícího pixelu představuje vzdálenost mezi dvěma sousedními pixely grafu. Z pořadových čísel n a velikosti pixelu p lze potom jednoduše určit vzdálenost odpovídající libovolnému počtu

sousedících pixelů (úseku na ose x). V práci bude též velmi často použit pojem *subpixel*, který lze chápat obdobně, pouze s tím rozdílem, že postrádá svůj fyzicky existující protějšek. Ten si můžeme pouze představit v podobě pixelu, jehož velikost je zlomkem velikosti původního, fyzicky existujícího pixelu. Pořadová čísla subpixelů budou označena n_s . Subpixelové rozlišení je používáno v aplikacích, ve kterých je rozlišení použitých snímačů nedostatečné. Hodnoty jasů jednotlivých subpixelů bývají různými metodami (např. interpolací) vypočítávány z hodnot jasů pixelů snímače. Osu y zmiňovaných grafů může v závislosti na použitém způsobu vyhodnocení CCD signálu tvořit převodníkem digitalizovaná hodnota relativního jasů I , nebo její doplněk I_d , který si definujeme:

$$I_d = 2^{n_b} - I \quad [-] \quad (1.1)$$

kde n_bpočet bitů AD převodníku [-].

Bude-li tedy v této práci zmíněn pojem jas, bude se jednat vždy o relativní hodnotu jasů vyjádřenou pomocí AD převodníku digitalizované hodnoty. Se zvyšující se propracovaností použité metody zpracování informace z pixelů na hraně bude stoupat i výpočetní náročnost a velikost potřebného hardwaru. Existuje mnoho metod k určení hran se subpixelovým rozlišením aplikovaných především na 2D a 3D obrazy:

- komparační metody (intenzita jednotlivých bodů je porovnávána s nastavenou rozhodovací úrovní, pro zvýšení rozlišení je následně použita interpolace),
- metody využívající vlastností 1. a 2. derivace (1. derivace nabývá v místě hrany maxima/minima, 2. derivace prochází v bodě hrany nulou, použití hranových operátorů – Robertsův, Sobelův, Prewittové, Laplaceův atd.) [2], [3],
- fotometrická interpolace (spočívá v nahrazení reálné hrany ideální hranou tak, aby byly plochy ohraničené ideální a reálnou hranou shodné) [4].

Většina těchto metod využívá ideálního modelu hrany (jednotkový skok) a pomocí něho určuje reálnou hranu se subpixelovým rozlišením [5]. Zmíněné metody jsou používány především pro 2D a 3D obraz, často vyžadují vysoký výpočetní výkon. Pokud je třeba detekovat hrany se subpixelovým rozlišením v reálném čase, bez vysokých nároků na hardware, je třeba přistoupit k méně náročným způsobům, případně ke zjednodušení sofistikovaných metod, za cenu snížení přesnosti, odolnosti proti šumu, reprodukovatelnosti měření atd. Pro zvýšení efektivnosti celé aplikace je třeba přizpůsobit zvolenou metodu druhu použitého hardwaru.

Při průzkumu současného stavu dané problematiky nebyla v dostupných zdrojích nalezena vhodná implementace subpixelového rozlišení použitelná k detekci hran v reálném čase při dodržení minimálních požadavků na hardware.

2 Cíle práce

Na základě průzkumu současného stavu dané problematiky je cílem práce dosažení co možná nejlepších parametrů optického „thru-beam“ mikrometru (rozlišení alespoň 1 μm , přesnost $\pm 10 \mu\text{m}$ a frekvence měření 2 kHz) s využitím jednoduchého hardwaru. Tento cíl je možné rozdělit do dvou základních bodů:

- nalezení optimálního algoritmu pro určení rozměrů a pozic objektů „projekční“ metodou tak, aby byly zachovány minimální nároky na použitý hardware,
- posouzení vlivu jednotlivých komponent měřicího řetězce na dosažené výsledky a případné přizpůsobení těchto komponent.

Dosažení špičkových parametrů měřicího zařízení použitím náročných výpočetních algoritmů a složité hardwarové konfigurace není cílem. Jednodušší senzor malých rozměrů může nabídnout mnohonásobně širší oblast použití než komplikované zařízení i za cenu jistého snížení přesnosti měření. Měřicí senzory vyvíjené velkými zahraničními firmami jsou často velmi složité a pracují na hranici dosažitelných parametrů. Dosažení obdobných parametrů při zachování výrazně nižších nároků na hardware bude přínosem pro širokou oblast technických aplikací bezkontaktního měření rozměrů.

3 Vlastní řešení

V této části práce bude nejdříve popsáno několik metod pro detekci hrany se subpixelovým rozlišením. Budou navrženy a vzájemně porovnány implementace jednotlivých obecných metod. Na základě provedených měření bude vybrán jeden z navržených algoritmů pro realizaci do hradlového pole. Pro ověření funkce do hradlového pole implementovaného algoritmu a pro následnou kalibraci bude navržen postup pro určení linearitu měření pozice hrany v pracovním rozsahu. V dalším kroku bude na základě zjištěných odchylek změřených hodnot od ideálních implementována do hradlového pole kalibrace měření. Závěrem bude z dostupných údajů vyjádřena výsledná nejistota měření realizovaného měřicího zařízení.

3.1 Detekce hrany objektu z jasového profilu CCD snímače

Pro velkou výhodu paralelní činnosti mnoha procesů, rychlost a synchronnost jednotlivých událostí byl jako jádro řídicí části senzoru zvolen FPGA obvod. Jeho další výhodou jsou již dnes běžně implementované bloky s dedikovanou funkcí určené pro podporu operací digitálního zpracování signálu – sčítačky, násobičky, akumulátory atd. Tyto bloky jsou proto nazývány DSP bloky. Tato práce se tedy bude dále zabývat měřením rozměrů pomocí senzoru založeného na FPGA obvodu a způsoby jak v této aplikaci využít jeho předností a obejít nedostatky. Zdrojem signálu obsahujícího obrazovou informaci bude řádkový CCD snímač. V FPGA obvodu bude na digitalizovaný CCD signál aplikován implementovaný algoritmus, jehož výstupem budou změřené pozice hran.

3.1.1 Výběr vhodné metody vyhodnocení pozice hrany

V této kapitole bude stručně popsán způsob detekce hrany v profilu jasu snímače několika různými metodami. Na základě zhodnocení dosažených výsledků bude jeden z testovaných způsobů detekce pozice hrany vybrán a přizpůsoben pro vlastní realizaci v hradlovém poli.

Filtrace CCD jasového profilu

V jasovém profilu CCD snímače získaném z AD převodníku je obsažen nežádoucí šum. Na velikosti tohoto šumu má svůj podíl samotný světelný zdroj [6], komponenty v cestě světelných paprsků, elektronické součástky použité k zachycení jasového profilu, případně jeho vyhodnocení. Aby byl vliv zmíněného nežádoucího šumu na výsledky měření minimalizován, je třeba digitalizované jasy jednotlivých pixelů vhodným způsobem filtrovat. Jako vhodný typ filtru byl vybrán klouzavý

průměr. Jeho výhodou je jednoduchá implementace (nízká spotřeba logických elementů hradlového pole) a dobré potlačení šumu při zachování rychlé odezvy [7]. Jasy jednotlivých pixelů v aktivní oblasti CCD vyjádříme vektorem doplnků jasů I_d (viz kapitola 1.1). Klouzávy průměr jasového profilu definujeme vztahem:

$$I_{dMA}(n) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} I_d(n-i) \quad (3.1)$$

kde

$I_{dMA}(n)$ představuje doplněk jasu n -tého pixelu po filtraci [-],

$I_d(n)$ doplnková hodnota jasu pixelu v aktivní oblasti CCD [-],

M počet vzorků pro vyjádření průměru [-],

n pořadové číslo pixelu na CCD (1, ..., N) [-],

N počet aktivně použitých pixelů snímače [-].

Metody detekce hrany využívající vlastností 1. a 2. derivace

Tyto metody určují polohu hrany na základě detekce inflexního bodu v jasovém profilu CCD snímače [8], [9]. První derivace nabývá v místě hrany (inflexního bodu) minima nebo maxima, druhá derivace prochází v tomto bodě nulou. Místo derivací je v případě jasového profilu reprezentovaného vektorem hodnot použito diferencí [8].

$$D_e(n) = \frac{I_d(n) - I_d(n-G)}{G} \quad (3.2)$$

kde

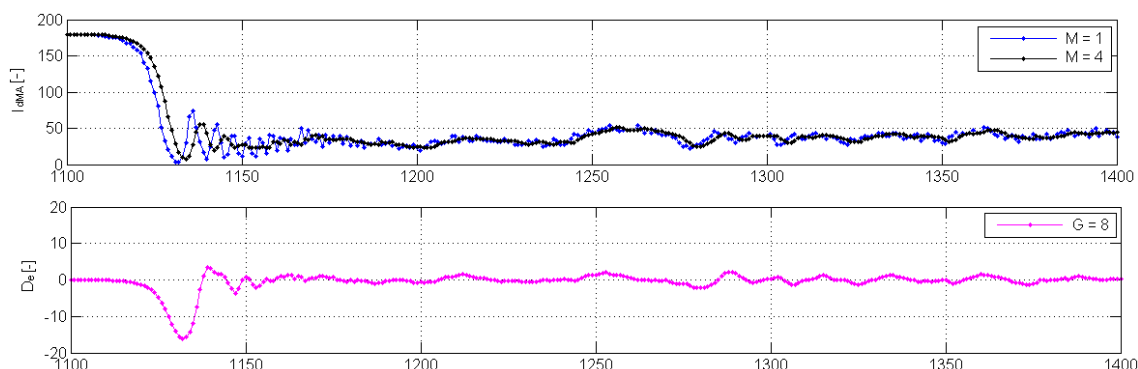
$D_e(n)$ difference jasů pixelů [-],

G krok pro určení diferencí, $G \in \{1, \dots, 5\}$, [-],

n pořadové číslo pixelu, $n = 1 + G, \dots, N$, [-],

N počet využitých pixelů CCD snímače [-].

Na obr. 2 je ukázán průběh diferencí vypočítaných dle vztahu (3.2). Z jasového profilu filtrovaného filtrem typu klouzávy průměr jsou vypočítány difference ($G = 8$).



obr. 2 Vliv volby hodnoty kroku G pro výpočet diferencí

Pro detekci sestupné hrany se subpixelovým rozlišením je třeba nejdříve nalézt pozici hrany s jednopixelovým rozlišením. Hledejme tuto pozici jako minimální hodnotu difference D_e (viz obr. 2) určené podle vztahu (3.2). Hledáme tedy takové P_p , pro které platí:

$$D_e(P_p) = \min \quad (3.3)$$

kde P_p pozice hrany s rozlišením na jednotky pixelů [-].

Následně je v blízkém okolí tohoto pixelu proložena polynomiální funkce a pozice hrany se subpixelovým rozlišením je určena z jejího minima případně těžiště (centroidu). Pro případ výběru této metody detekce hrany k implementaci do hradlového pole bylo realizováno subpixelové rozlišení výpočtem centroidu špičky (z hodnot D_e na obr. 2) pomocí váženého průměru dle vztahu:

$$P_s = \frac{R \sum_{n=P_p-4}^{P_p+4} I_{dMA}(n) \cdot n}{\sum_{n=P_p-4}^{P_p+4} I_{dMA}(n)} \quad (3.4)$$

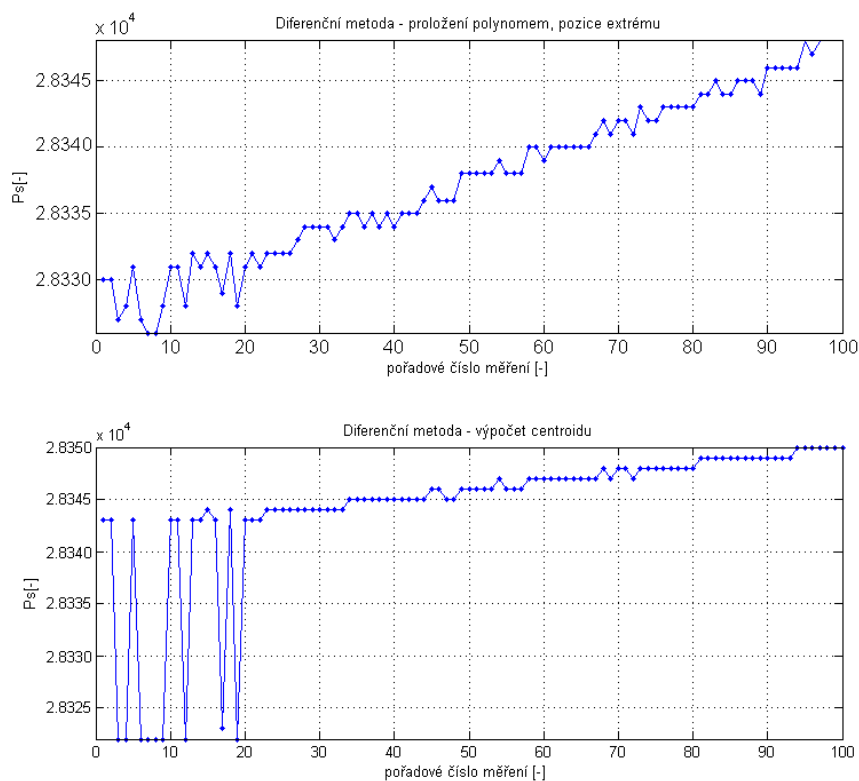
kde

P_s pozice hrany se subpixelovým rozlišením [-],

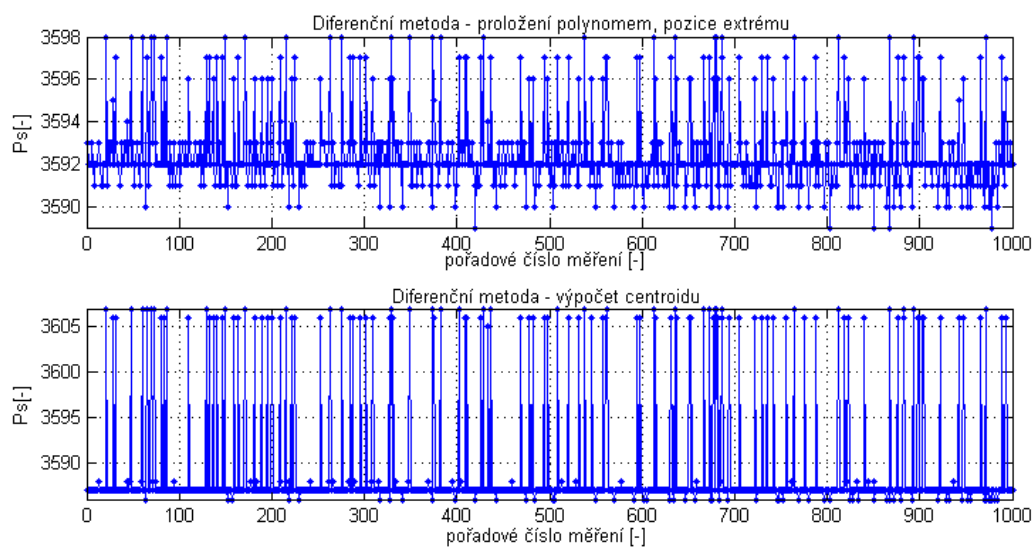
R koeficient subrozlišení [-].

Na obr. 3 je ukázán podstatný rozdíl ve výsledcích měření při použití proložení polynomem a při výpočtu centroidu přímo z diferencí jasů. Výpočetní algoritmy byly na jasový profil aplikovány offline. Mezi uložením jednotlivých jasových profilů pro výpočet byl prováděn mikrometrickým posuvem pohyb měřené hrany vždy přibližně o 0,1 μm . Takto byla testována schopnost jednotlivých výpočetních metod reagovat na změny pozice hrany s dostatečně malým krokem

Na obr. 4 jsou znázorněny výsledky měření se shodně nastavenými parametry výpočtu pozice hrany jako při výpočtu hodnot na obr. 3. Tyto výpočty pozic hran jsou provedeny na datech získaných s měřenou hranou staticky umístěnou blízko začátku aktivní oblasti CCD snímače. Hrana měřeného objektu tedy nemění svojí pozici, jak tomu bylo u předešlého měření postupně posouváné hrany, ale je statická.



obr. 3 Měření postupně posouváné hrany, diferenční metoda



obr. 4 Opakovaná měření statické hrany, diferenční metoda

Fotometrická interpolace

Další možností jak dosáhnout detekce hrany se subpixelovým rozlišením je využití tzv. fotometrické interpolace, publikované např. v [4]. Podstata této metody spočívá v nahrazení reálné hrany ideální hranou tak, aby byly jimi ohraničené plochy shodné. Výpočet je prováděn s filtrovaným průběhem hrany $I_{dMA}(n)$. Vztah pro

výpočet pozice hrany se subpixelovým rozlišením P_s vyjadřuje takovou pozici hrany, pro kterou jsou plochy S_{ideal} a S_{real} shodné (viz obr. 5):

$$P_s = R \cdot n_{f0} + R \frac{\sum_{n=n_{f0}}^{n_{f1}} I_{dMA}(n) - I_{d0}}{I_{d1} - I_{d0}} \quad (3.5)$$

kde

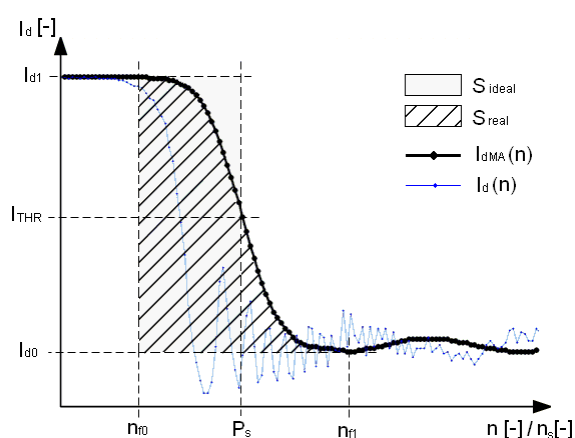
n_{f0} ... pořadové číslo prvního pixelu pro výpočet (spodní mez) [-],

n_{f1} ... pořadové číslo posledního pixelu pro výpočet (horní mez) [-],

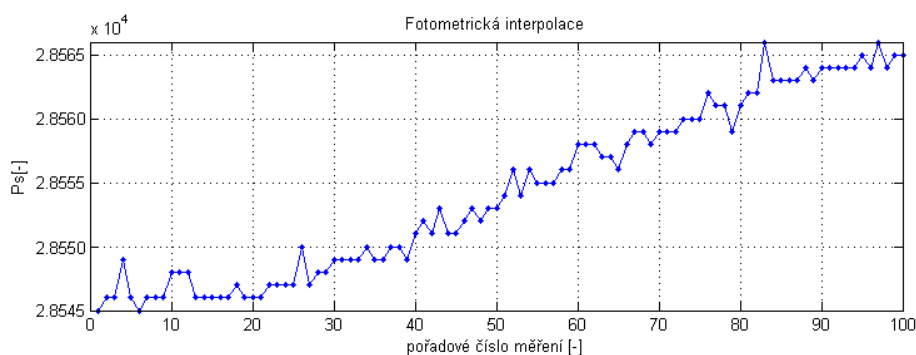
I_{d0} ... horní limit jasu (průměrná hodnota sousedních pixelů v okolí n_{f0}) [-],

I_{d1} ... spodní limit jasu (průměrná hodnota sousedních pixelů v okolí n_{f1}) [-].

Pouze při individuálním nastavení jednotlivých parametrů výpočtu pro konkrétní změřená data bylo dosaženo výsledků srovnatelných s ostatními testovanými metodami. Na obr. 6 je graf pozice postupně posouvané hrany vypočítané pomocí fotometrické interpolace ze stejných dat jako v ukázce diferenční metody (obr. 3). Fotometrická interpolace vykazuje menší odchylky během prvních dvaceti měření než při výpočtu pozice hrany pomocí centroidu špičky v průběhu diferencí jasů. Bohužel šum při opakovaném měření statické hrany byl ve většině případů vyšší než u ostatních metod (běžně 5 a více subpixelů, při $R = 32$).



obr. 5 Fotometrická interpolace na reálně změřeném průběhu hrany



obr. 6 Měření postupně posouvané hrany, fotometrická interpolace

Komparační metoda

Komparační metoda využívá k detekci hrany tzv. rozhodovací hladiny, se kterou jsou porovnávány jasy jednotlivých pixelů. Na základě porovnání hodnoty jasu pixelu a rozhodovací hladiny je rozhodnuto o přítomnosti respektive nepřítomnosti objektu.

Pro nalezení pozice hrany se subpixelovým rozlišením je nejprve nutné nalézt hranu s rozlišením na jednotky pixelů CCD snímače. Pro nalezení náběžné hrany potom hledáme pixel s pořadovým číslem n_a , jež splňuje podmínku:

$$(I_d(n_a - 1) < I_{THR}) \cap (I_d(n_a) \geq I_{THR}) \quad (3.6)$$

kde I_{THR} horizontální rozhodovací hladina relativního jasu [-].

Pozici hrany odpovídá pixel $P_p = n_a$. Subpixelového rozlišení je možné dosáhnout různými druhy interpolace mezi pixely. Jako první způsob interpolace bylo testováno proložení pixelů na hraně polynomem. Druhým výpočetně podstatně méně náročným způsobem je proložení přímky mezi sousední pixely $P_p - 1$ a P_p , viz například publikace [4], [8]. Pozice hrany se subpixelovým rozlišením potom odpovídá:

$$P_s = R \cdot P_p + R \frac{I_{THR} - I_d(P_p - 1)}{I_d(P_p) - I_d(P_p - 1)} \quad (3.7)$$

kde

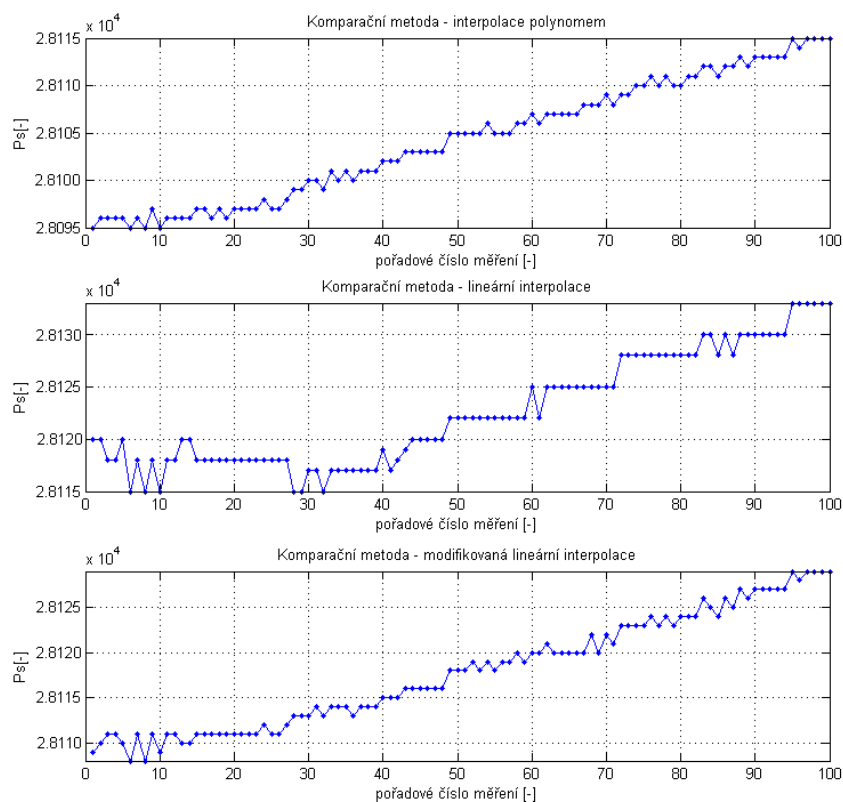
$I_d(P_p)$ doplňková hodnota intenzity pixelu P_p [-],

$I_d(P_p - 1)$ doplňková hodnota intenzity pixelu zleva sousedícího s P_p [-].

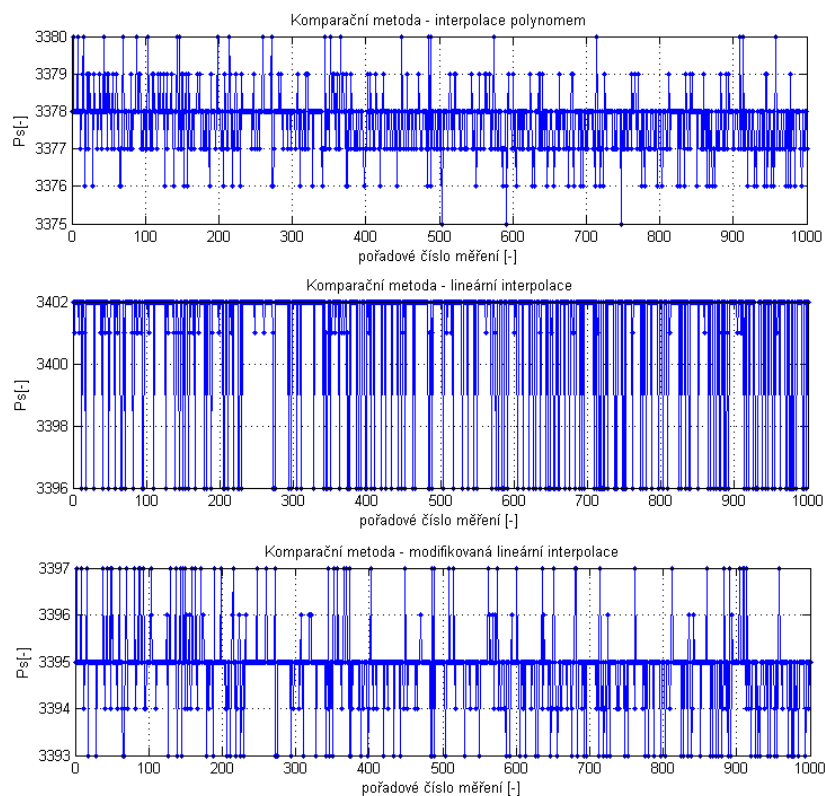
Na obr. 7 jsou znázorněny grafy měření postupně posouvané statické hrany s využitím komparační metody oběma výše popsány způsoby. Z grafu závislosti pozice vypočítané pomocí lineární interpolace na pořadovém čísle měření je vidět, že pouhé proložení přímky mezi dva sousední pixely není pro vysoký koeficient subrozlišení $R = 32$ dostačující. Tento způsob implementace komparační metody nevykázal schopnost s dostatečným rozlišením reagovat na změny pozice měřené hrany.

Na obr. 8 jsou zobrazeny vypočítané pozice hrany při měření statického objektu. Při proložení hrany polynomem je absolutní hodnota šumu vypočítané hrany 5 subpixelů. Skokové změny v grafu hodnot vypočítaných pomocí proložení přímky mezi dva sousední pixely opět ukazují na pro tento způsob implementace příliš vysoký koeficient subrozlišení. V porovnání s grafem, kde je použito interpolace polynomem, má graf pro použitou lineární interpolaci výrazně schodovitý průběh.

Pro zvýšení odolnosti proti šumu a efektivního dosažení koeficientu subrozlišení $R = 32$ při zachování nízkých výpočetních nároků, byla navržena tzv. *modifikovaná metoda lineární interpolace*. Její podrobný popis je obsahem kapitoly 3.1.2.



obr. 7 Měření postupně posouvané hrany, komparační metoda



obr. 8 Opakované měření statické hrany, komparační metoda

Výběr vhodné metody

Při testování metody využívající vlastností 1. derivace bylo nutné vhodně zvolit koeficient G pro výpočet diferencí. Při příliš nízkém koeficientu G docházelo k chybné detekci hrany v místě difrakčních proužků, vysoký koeficient G způsoboval nevhodné rozšíření špičky do oblasti difrakčních proužků. Vhodná volba koeficientu G byla závislá na zvoleném koeficientu filtru typu klouzavý průměr.

Ani metoda fotometrické interpolace se pro tento typ aplikace neukázala jako výhodná především pro její citlivost na volbu koeficientů a velikost dosaženého šumu staticky měřené hrany (běžně 10 subpixelů). Za další nevýhodu této metody je možné považovat nutnost použití vysokých koeficientů M filtru typu klouzavý průměr.

Při testování komparační metody nebyla zjištěna taková citlivost na volbu parametrů jako u ostatních metod. Při proložení hrany polynomem bylo dosaženo nízkého šumu (běžně 3 subpixely pro oblast CCD snímače osvětlenou středovou částí paprsků vysílače) staticky měřené hrany i dobré schopnosti efektivně využít vysokého koeficientu subrozlišení. Pro implementaci do hradlového pole byla navržena modifikovaná metoda lineární interpolace, která prokázala dostatečnou schopnost využití vysokého koeficientu subrozlišení, srovnatelnou velikost šumu při měření statické hrany i robustnost proti drobným nečistotám na optických plochách (algoritmy byly testovány se subrozlišením 1/8 až 1/32 pixelu CCD).

3.1.2 Modifikovaná metoda lineární interpolace

Při porovnání obecných metod se pro danou aplikaci ukázala jako nejvhodnější komparační metoda. Bylo nutné algoritmus lineární interpolace modifikovat tak, aby se svými výsledky přiblížil k osvědčené interpolaci polynomem, a přesto byly zachovány nízké výpočetní nároky algoritmu. Pro interpolaci přímky mezi body na hraně jasového profilu byl s ohledem na pozdější implementaci do FPGA obvodu vyjádřen obecný vztah:

$$P_S = \frac{I_{THR}(P_P) \cdot R + \left(\sum_{i=P_p+v(1)}^{P_p+v(r+s)} \frac{I(i)-I(i-G)}{G} \cdot \sum_{i=P_p+v(1)}^{P_p+v(r+s)} i \cdot R - \sum_{i=P_p+v(1)}^{P_p+v(r+s)} I(i) \cdot R \right) \cdot \frac{1}{r+s}}{\sum_{i=P_p+v(1)}^{P_p+v(r+s)} \frac{I(i)-I(i-G)}{G}} \quad (3.8)$$

kde

r koeficient určující spodní mez výběrového vektoru okolních pixelů [-],

s koeficient určující horní mez výběrového vektoru (počet použitých okolních pixelů potom je $(r + s + 1)$) [-],

P_p souřadnice x nalezená s jednopixelovým rozlišením dle podmínky (3.6) [-],

R koeficient subrozlišení [-],

G krok pro určení diferencí (směrnic) ze vztahu (3.2) [-],

$I(i)$ i -tý prvek vektoru jasů jednotlivých pixelů [-],
 $I_{THR}(P_p)$... rozhodovací hladina v bodě P_p [-],
 P_s nalezená pozice hrany se subrozlišením $1/R$ [-].

Výběrový vektor okolních pixelů hrany splňující podmínku (3.6) má obecně tvar:

$$\mathbf{v} = (-r, -(r-1), \dots, 0, \dots, (s-1), s) \quad (3.9)$$

Z velkého množství provedených měření byly nalezeny parametry obecného vztahu (3.8), se kterými je dosaženo velmi dobrých výsledků při nízkých nárocích na počet potřebných logických elementů hradlového pole. Při použití pěti okolních pixelů je (pro rozlišení $1/8$ pixelu) po úpravách (3.8) výsledkem výraz ($r = 2, s = 2, R = 8, G = 1$):

$$P_s = \frac{thr + k \cdot x - y}{k} = \frac{2(-4 \cdot sum_y + sum_k \cdot sum_x + 16 \cdot thr)}{sum_k} \quad (3.10)$$

kde

sum_x součet pořadových čísel 4 pixelů (vynechán levý krajní),
 sum_y součet jasů 4 pixelů (vynechán levý krajní),
 sum_k součet směrnic 4 vnitřních úseků mezi pěti body,
jako směrnice jsou brány rozdíly jasů dvou sousedních pixelů,
 thr rozhodovací úroveň pro hranu určenou s jednopixelovým rozlišením.

Na obr. 9 je ukázka interpolace hrany přímkou podle vztahu (3.10). Pro zvýšení odolnosti proti šumu je v tomto případě zvolen souměrný výběrový vektor ($r = s = 2$) okolních pixelů ve tvaru:

$$\mathbf{v} = (-2, -1, 0, 1, 2) \quad (3.11)$$

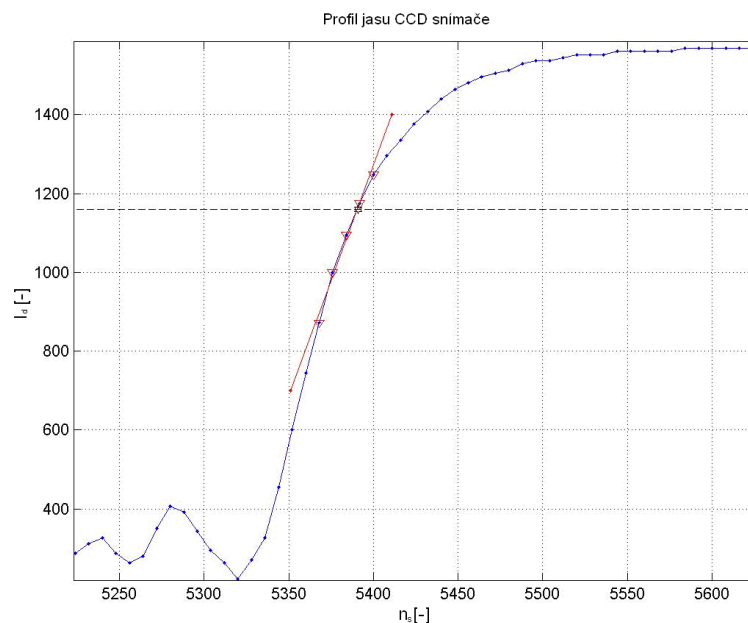
Vzdálenost hrany od prvního pixelu CCD určíme:

$$x_s = P_s \cdot \frac{p}{R} \quad (3.12)$$

kde

x_s pozice hrany vztahená k začátku aktivní oblasti CCD [μm],
 P_s výsledek ze vztahu (3.10) [-],
 p velikost pixelu použitého CCD [μm],
 R koeficient subrozlišení [-].

Pro použitý CCD snímač s velikostí pixelu $p = 14 \mu\text{m}$ odpovídá vyhodnocená pozice $x_s = 9434,25 \mu\text{m}$.

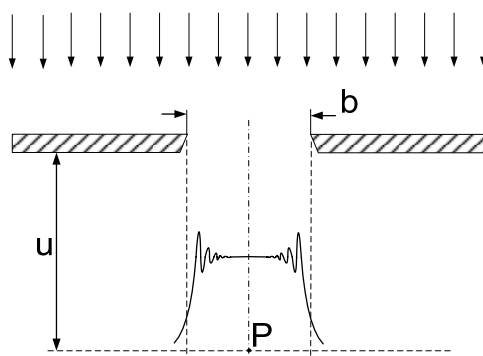


obr. 9 Aproximace hrany přímkou

3.2 Difrakce světla na hraně objektu

Obecně jsou rozlišovány dva druhy difrakce: Fresnelova a Fraunhoferova [10]. Pro principiální pochopení rozdílů mezi oběma druhy difrakce si představme štěrbinu o šířce b osvětlenou rovinnou vlnou a rovinu pozorování ve vzdálenosti u od štěrbiny dle obr. 10. Fresnelovou difrakcí rozumíme rozložení světla v rovině pozorování v konečné vzdálenosti u za štěrbinou o šířce b . Fraunhoferova difrakce je speciální druh Fresnelovy difrakce vzniklý při splnění podmínky:

$$b \ll \sqrt{u \cdot \lambda} \quad (3.13)$$



obr. 10 Fresnelova difrakce na štěrbině

V této práci je uvažována rovina pozorování (CCD přijímač) v malé vzdálenosti od stínítka. Svazek osvětlující objekt je kolimovaný (v ideálním případě rovinná vlna). Z důvodu velmi malých vzdáleností roviny pozorování od měřených objektů („velmi

malých“ zde chápáno v neprospěch podmínky pro Fraunhoferovu difrakci (3.13)) se budeme dále zabývat pouze difrakcí Fresnelovou, která bezprostředně souvisí s řešeným problémem.

3.2.1 Fresnelova difrakce na obdélníkovém otvoru

Algoritmus určení pozice hrany diskutovaný v kapitole 3.1.2 je založený na výpočtu pozice průsečíku interpolované hrany a horizontální rozhodovací úrovně. Absolutní pozice hrany je tedy závislá na volbě rozhodovací úrovně. Ukažme si zde alespoň základní vztah, na jehož základě je v disertační práci pomocí Fresnelovi teorie difrakce popsáno odvození teoreticky správné rozhodovací hladiny.

Jinými slovy řečeno, je nalezena aproximace vztahu pro relativní intenzitu záření v rovině pozorování při difrakci na nepropustné polorovině I_{rel} obsaženou v následujícím vztahu:

$$\frac{\psi(x, y, z)}{\psi_r(x, y, z)} = \sqrt{I_{rel}(x, y, z)} \exp[j\phi(x, y, z)] \quad (3.14)$$

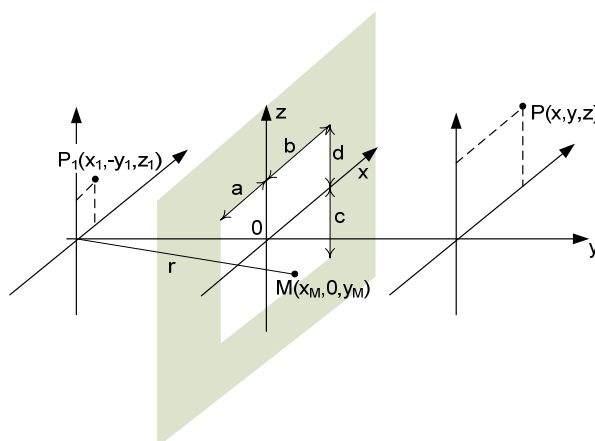
kde

$\psi(x, y, z)$ vlna v bodě $P(x, y, z)$ roviny pozorování $y = \text{konst.} > 0$,

$\psi_r(x, y, z)$ vlna, která by byla v bodě $P(x, y, z)$, kdyby nebylo do cesty vlnění od zdroje vloženo žádné stínítko, tzv. nerušená vlna,

$I_{rel}(x, y, z)$ relativní intenzita v bodě P roviny pozorování (vztažená k intenzitě, která by do tohoto bodu dopadala při absenci stínítka),

$\phi(x, y, z)$ fáze vztažená k fázi vlny ψ_r .



obr. 11 Prostorové uspořádání pro popis Fresnelovy difrakce na obdélníkovém otvoru

Ze vztahu (3.14), Fresnelova difrakčního integrálu a Fresnelovi aproximace kulové vlny je možné (viz [11]) vyjádřit hledanou relativní intenzitu v rovině stínítka vztahem:

$$\begin{aligned}
I_{rel} = \frac{1}{4} \{ & [C(v_b) - C(v_a)]^2 [C(u_d) - C(u_c)]^2 \\
& + [S(v_b) - S(v_a)]^2 [S(u_d) - S(u_c)]^2 \\
& + [C(v_b) - C(v_a)]^2 [S(u_d) - S(u_c)]^2 \\
& + [S(v_b) - S(v_a)]^2 [C(u_d) - C(u_c)]^2 \} \quad (3.15)
\end{aligned}$$

kde

$$v_a = \sqrt{\frac{k y_1 + y}{\pi y_1 y} \left(\frac{x_1 y + x y_1}{y_1 + y} - a \right)} \quad (3.16)$$

$$v_b = \sqrt{\frac{k y_1 + y}{\pi y_1 y} \left(\frac{x_1 y + x y_1}{y_1 + y} - b \right)} \quad (3.17)$$

$$u_c = \sqrt{\frac{k y_1 + y}{\pi y_1 y} \left(\frac{z_1 y + z y_1}{y_1 + y} - c \right)} \quad (3.18)$$

$$u_d = \sqrt{\frac{k y_1 + y}{\pi y_1 y} \left(\frac{z_1 y + z y_1}{y_1 + y} - d \right)} \quad (3.19)$$

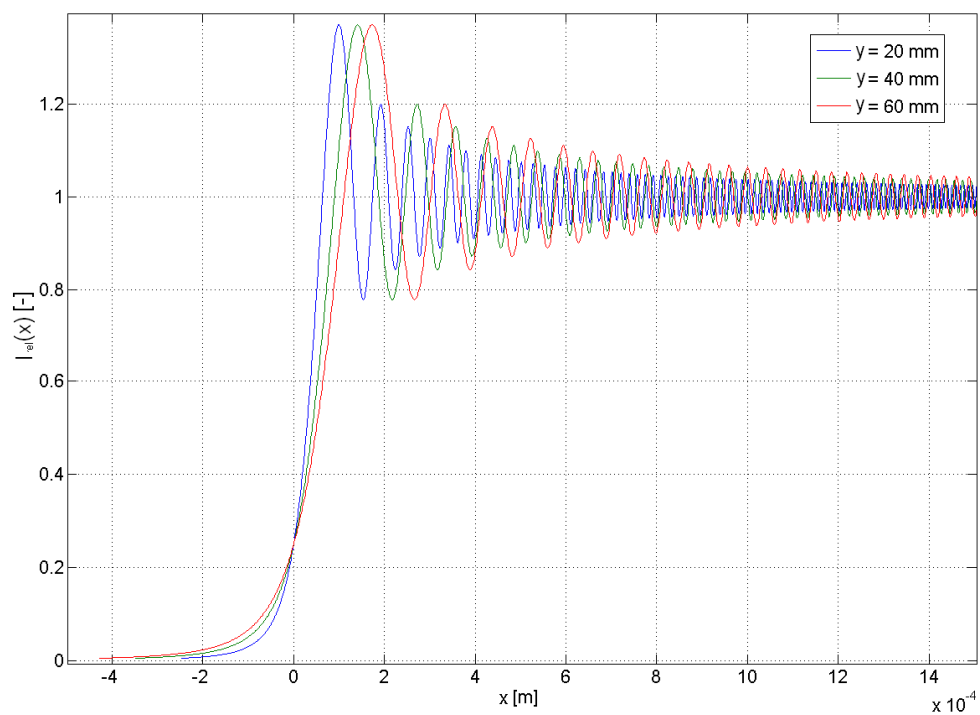
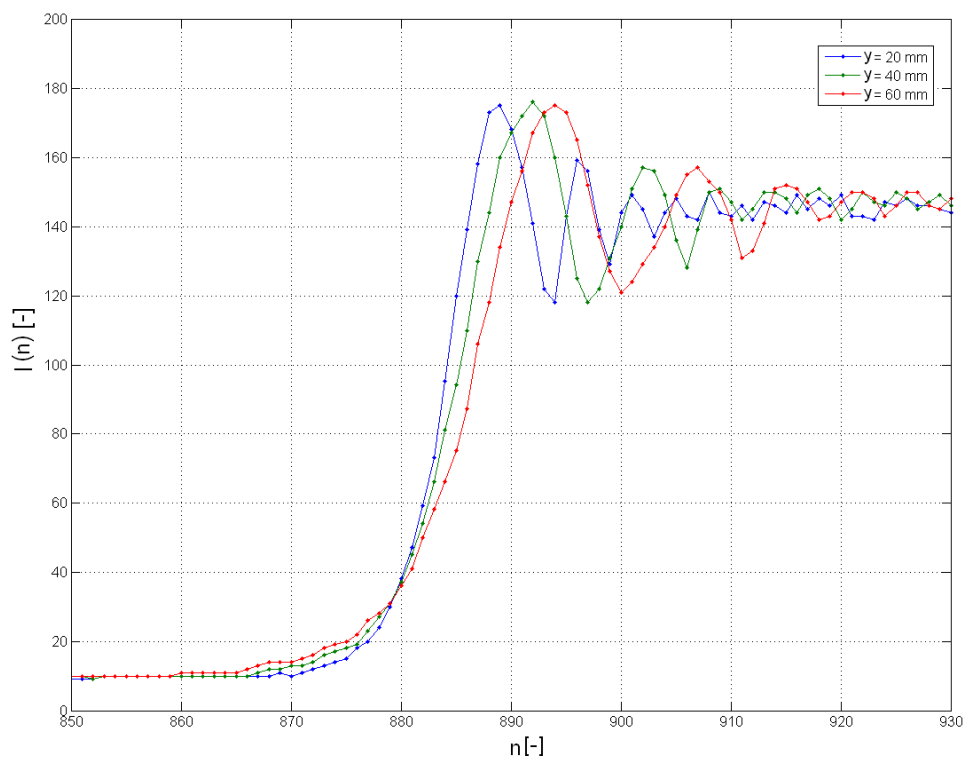
Vztah (3.15) je vyjádření relativní intenzity dopadající do roviny stínítka při difrakci na obdélníkovém otvoru vztažené k intenzitě při absenci stínítka. Je třeba vyjádřit tento vztah pro prostorové uspořádání, které lépe odpovídá řešené úloze, tedy difrakci na nepropustné polorovině. Po dosazení hodnot $v_a = v_a$, $v_b = -\infty$, $u_c = \infty$, $u_d = -\infty$ do vztahu (3.15) lze vyjádřit:

$$I_{rel}(v_a) = \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{1}{2} + C(v_a) \right]^2 + \left[\frac{1}{2} + S(v_a) \right]^2 \right\} \quad (3.20)$$

kde $C(v_a)$ a $S(v_a)$ jsou tzv. Fresnelovi integrály. K numerickému vyjádření Fresnelových integrálů $C(v_a)$ a $S(v_a)$ ve vztahu (3.20) použijeme různých aproximací (viz [11]) volených podle velikosti proměnné v_a . Pro zobrazení závislosti $I_{rel}(x)$ je třeba přepočítat hodnotu v_a dle vztahu (3.21) vycházejícího z (3.16).

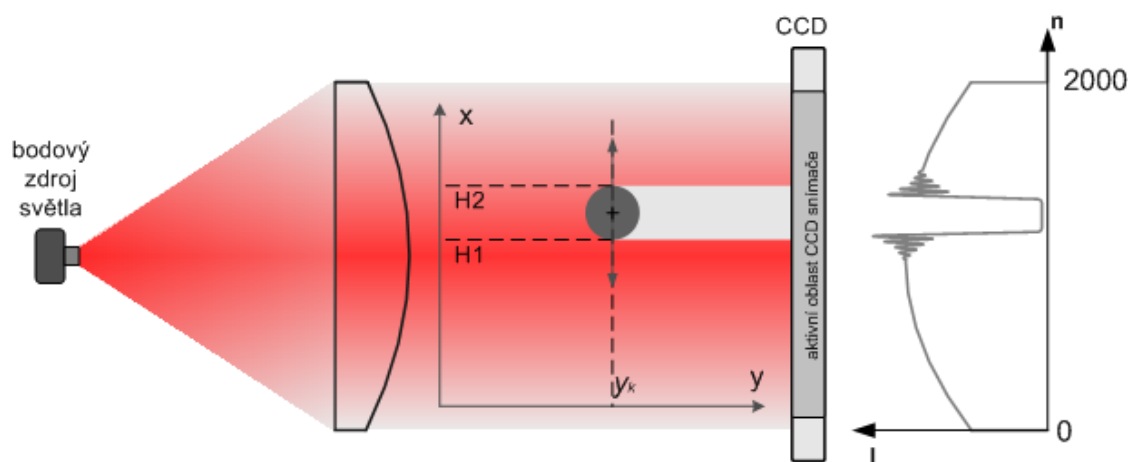
$$x = v_a \sqrt{\frac{\pi}{k} y \left(1 + \frac{y}{y_1} \right)} + a + (a - x_1) \frac{y}{y_1} \quad (3.21)$$

Na obr. 12 je znázorněno několik teoretických průběhů závislosti $I_{rel}(x)$ pro tři různé vzdálenosti stínítka od roviny pozorování ($\lambda = 670$ nm, $y_1 = 10$ m, $x_1 = a = 0$). Na obrázku obr. 13 jsou pro porovnání zobrazeny reálně naměřené průběhy. Naměřené hodnoty z velké části odpovídají teoretickým průběhům.

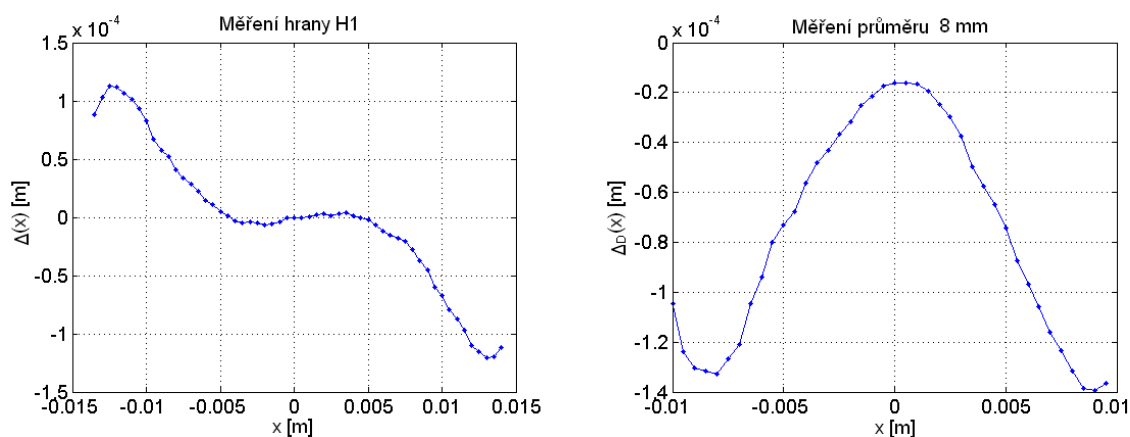
obr. 12 Teoreticky průběh závislosti $I_{rel}(x)$ pro různé vzdálenosti y obr. 13 Naměřené hodnoty $I(n)$ pro různé vzdálenosti y

3.3 Určení chyby měření v pracovním rozsahu senzoru

Podle uspořádání na obr. 14 bylo provedeno určení chyby měření při pohybu objektu ve směru osy x (jako referenční polohovací zařízení byl použit lineární mikrometrický posuv). Jedná se o měření prováděné při konstantní vzdálenosti objektu od vysílače a přijímače, tedy při zachování souřadnice y (obr. 14). V ideálním případě by se změna polohy měřeného objektu v souřadnici y neměla projevit na senzorem určené poloze v ose x . Ale je zřejmé, že především vlivem nežádoucích vlastností kolimovaného svazku paprsků vysílače může být pohyb měřeného objektu v ose y zdrojem významných nepřesností v měření. Vyhodnocením provedených měření byl zjištěn průběh chyby měření pozice hrany a průměru (obr. 15). Zjištěný průběh chyby měření je způsoben především nežádoucími vlastnostmi použité kolimační čočky (tzv. sférickou aberací, viz [12], [13]). Zjištěný průběh chyby byl následně použit pro potřeby kalibrace. Aplikace kalibračních konstant byla implementována do obvodu FPGA.



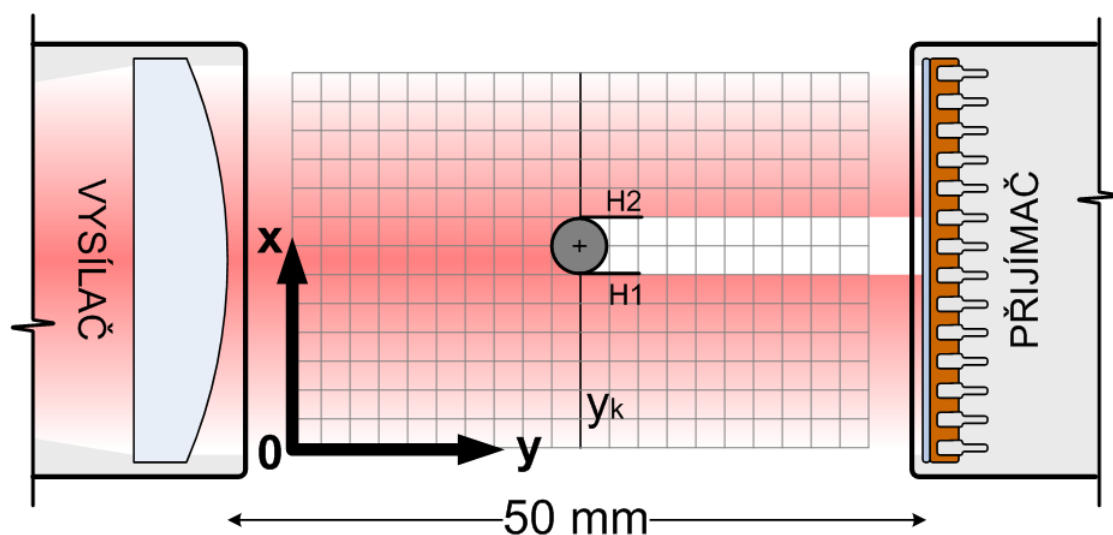
obr. 14 Měření chyby v pracovním rozsahu senzoru



obr. 15 Průběh chyby při měření hrany $H1$ a průměru 8 mm

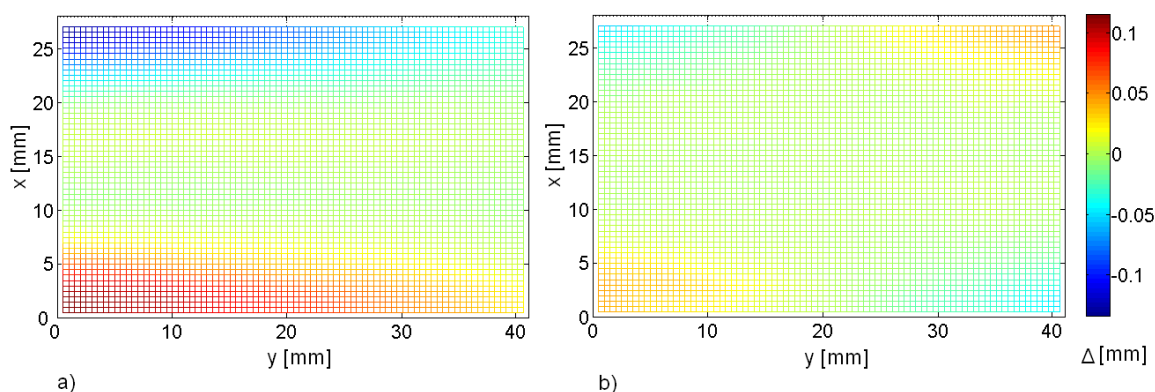
3.3.1 Chyba měření po implementaci kalibrace

Kalibrace implementovaná způsobem zmíněným v předchozí kapitole bere v úvahu pohyb objektu pouze v konstantní vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem. Vzdálenost objektu mezi vysílačem a přijímačem je při měření neznámá, její nežádoucí vliv tedy nelze v tomto případě minimalizovat. Otázkou je, jak významný vliv bude mít odchýlení měřeného objektu ve směru osy y od vzdálenosti, pro kterou byla provedena kalibrace. Pro posouzení této závislosti bylo provedeno množství měření. Při nich byl objekt postupně umístěn do všech bodů zvolené matice v ploše xy (54×81 hodnot s krokem $0,5$ mm), jak je naznačeno na obr. 16. Pohyb objektu v osách x a y byl zajištěn pomocí dvou navzájem kolmo orientovaných lineárních posuvů s garantovanou přesností $1,5$ μm .



obr. 16 Uspořádání pro měření se změnou vzdálenosti objektu

Průběh chyby měření s kalibrací a bez kalibrace je znázorněn na obr. 17 (hodnoty jsou reprezentovány barvou bodů). Z tohoto obrázku je zřejmé, že výše popsany postup kalibrace vede k významnému snížení chyby měření provedených v ploše xy .



obr. 17 Porovnání chyb pro měření: a) bez kalibrace, b) s kalibrací

3.4 Vyjádření nejistoty měření

Jako výchozí podklad pro určení výsledné nejistoty bylo provedeno dvacet po sobě následujících měření v rovině xy . Výstupem z těchto měření je dvacet matic $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2 \dots \mathbf{X}_{20}$, kde každý prvek matice reprezentuje změřenou hodnotu pro konkrétní pozici referenčního polohovacího zařízení v souřadném systému xy . S krokem polohovacího zařízení nastaveným na 0,5 mm bylo do každé matice zaznamenáno 54×81 změřených hodnot (osa x 54 hodnot, osa y 81 hodnot).

Při výpočtu nejistoty budeme vycházet ze vztahu pro rozšířenou nejistotu měření, jenž specifikuje interval, ve kterém se nachází skutečná hodnota polohy hrany s požadovanou pravděpodobností, závislou na zvoleném koeficientu rozšíření [14]:

$$u_c(X) = k_r \cdot \sqrt{u_A^2(X) + u_B^2(X)} \quad (3.22)$$

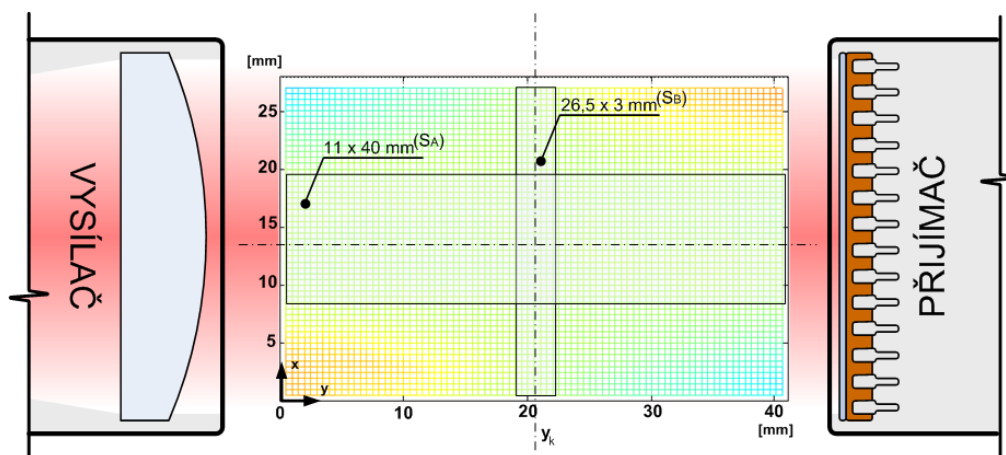
kde

k_r koeficient rozšíření [-],

$u_A(X)$ standardní nejistota typu A měřené pozice hrany [m],

$u_B(X)$ standardní nejistota typu B měřené pozice hrany [m].

Pro určení standardní kombinované nejistoty $u_c(X)$ je třeba určit standardní nejistotu typu A a standardní nejistotu typu B. Nejistota typu A vychází ze statistické analýzy opakovaně provedených měření za stejných podmínek. Jako složky nejistoty B byly uvazovány následující zdroje: nejistota způsobená odchylkou střední hodnoty měření od referenční pozice, nejistota vzniklá vlivem nepřesnosti referenčního polohovacího zařízení a nejistota vzniklá vlivem rozlišitelnosti poslední platné číslice. Výsledná rozšířená nejistota měření byla určena pro oblasti S_A a S_B v ploše xy (viz obr. 18). Pro případ normálního rozdělení výsledků a požadovanou pravděpodobnost 95 % byla stanovena rozšířená nejistota měření na hodnotu $\pm 6 \mu\text{m}$. Pokud je tedy dodržena pozice měřené hrany v jedné z oblastí S_A nebo S_B , lze uvádět změřenou hodnotu ve tvaru $(X \pm 6 \mu\text{m})$.



obr. 18 Pracovní rozsahy S_A a S_B v ploše xy pro vyjádření nejistoty

Závěr

Cílem disertační práce bylo dosažení co možná nejlepších parametrů měření optického „thru-beam“ mikrometru při zachování nízkých nároků na použitý hardware. Minimalizace nároků na použitý hardware umožní vyřazení běžně používaného výkonného externího kontroléru. V první části práce bylo pro konkrétní úlohu implementováno několik obecných metod vyhodnocení jasového profilu snímače, včetně algoritmů pro dosažení subpixelového rozlišení. Na základě množství provedených měření byla jako vhodná vybrána a následně modifikována komparační metoda. Z teorie difrakce byla odvozena optimální hladina relativní intenzity vhodná jako rozhodovací úroveň komparační metody. Teoretické závěry byly ověřeny měřeními.

Dále byla pozornost soustředěna na návrh algoritmu pro získání subpixelového rozlišení s ohledem na následnou implementaci do vybraného typu řídicího prvku (obvodu FPGA). Po implementaci algoritmu do FPGA obvodu Xilinx Spartan XC3S400 byl navržen postup pro zjištění dosažené chyby měření. Vyhodnocením provedených měření bylo zjištěno, že na dosažené výsledky má stěžejní vliv zdroj kolimovaného svazku paprsků, především vlastnosti použité kolimační čočky vysílače. Pro kompenzaci vad čočky byla do výpočetního algoritmu dodatečně implementována kalibrace měřené hodnoty. V závěru práce je z provedených měření ve 2D prostoru mezi přijímačem a vysílačem vyčíslena souhrnná nejistota měření pro zvolené pracovní oblasti. Pro oblast S_A a S_B (viz kapitola 3.4) byla shodně určena souhrnná nejistota měření $\pm 6 \mu\text{m}$, dosažené rozlišení je $0,4375 \mu\text{m}$ a frekvence měření je $2,5 \text{ kHz}$.

Součástí práce bylo řešení množství dílčích problémů, které nebyly jejím těžištěm, proto nejsou ani v práci podrobně popisovány (vlastní implementace algoritmu v hradlovém poli, dlouhodobý drift intenzity záření laserové diody, časování řídicích signálů pro CCD snímač, návrhy zapojení elektronických obvodů atd.).

Podle dosažených parametrů měření lze konstatovat, že stanovené cíle byly bezesbytku splněny. Jistým omezením je vyhrazená pracovní oblast mezi vysílačem a přijímačem, pro kterou je stanovená nejistota měření platná. Tento způsob vyjádření přesnosti měření optického mikrometru je naprosto běžný. Zvětšení pracovní oblasti, pro kterou by byla dodržena stanovená nejistota měření, by bylo možné získat použitím jiné kolimační čočky. Samotné zlepšování algoritmu určení pozic měřených hran nebo elektronické části měřicího zařízení by jen velmi těžko přineslo podstatné zpřesnění měření. Pro zmenšení stanovené nejistoty měření by bylo nutné zvolit jako zdroj záření LED diody. Taková úprava by však vyžadovala podstatně komplikovanější systém optických komponent. Výsledná složitost celého měřicího systému by tak přesáhla hranici akceptovatelné složitosti.

Použitá literatura

- [1] Fischer J., Včelák J.: *Position Measurement Using CCD Based Opto-electronic Gate*, Eurosensors XVII, University of Minho, 2003, p. 602–603, ISBN 972-98603-1-9
- [2] Morse B. S.: *Edge Detection* [online], Brigham Young University, 2000, [cit. 2006-09-02], <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/MORSE/edges.pdf>
- [3] Rockery P.: *The Accuracy of Sub-Pixel Localisation in the Canny Edge Detector* [online], BMVC99, The University of Nottingham, 1999, [cit. 2006-09-02], <<http://www.bmva.ac.uk/bmvc/1999/papers/39.pdf>>
- [4] Šedivý J., Fischer J.: *Precision Single-line Dimension Measurement Using CMOS Image Sensor and photometric interpolation*, IDAACS'2005 Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, Sofia: IEEE, p. 227-231, ISBN 0-7803-9446-1
- [5] Kisworo M., Venkatesh S., West G.: *Modeling Edges at Subpixel Accuracy Using the Local Energy Approach*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, april 1994, vol. 16, no. 4
- [6] Goodman J. W.: *Speckle phenomena in optics*, Roberts and Company Publishers, 2006, ISBN 0-9747-0779-1
- [7] Smith S. W.: *Digital Signal Processing*, Second Edition, California Technical Publishing, 1999, ISBN 0-9660176-6-8
- [8] Hussmann S., Ho Thian H.: *A high-speed subpixel edge detector implementation inside a FPGA*, Real-Time Imaging 9, 2003, p. 361–368
- [9] Gerrit Van de Velde, Björn Van de Vondel: *Sub-pixel edge detection* [online], 2004, [cit. 2007-03-05], <http://emsys.denayer.wenk.be/emcam/subpix_eng.pdf>
- [10] Born M., Wolf E.: *Principles of optics : electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*, Cambridge University Press, 1999, ISBN 0-521-64222-1
- [11] Komrska J.: *Studijní materiály předmětu „Difrakce světla“* [online], 2000, [cit. 2008-07-02], <<http://physics.fme.vutbr.cz/~komrska/#Difrakce>>
- [12] Malacara D., Malacara Z.: *Handbook of Optical Design, Second Edition*, Routledge, 2004, ISBN: 978-0-8247-5668-0
- [13] Laikin M., Thompson B. J.: *Lens Design, Fourth Edition*, CRC Press, 2006, ISBN: 978-0-8493-8278-9
- [14] Palenčář R., Vdoleček F., Halaj M.: *Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření*, Automa, 7, 2001, č. 10, s. 52–56

Vlastní publikace

- [15] Zelinka O.: *Připojení čidla s šířkově modulovaným signálem k PC*, Liberec, 2000, 42 s., Absolventská práce (DiS.), SPŠSE a Vyšší odborná škola
- [16] Zelinka O.: *Bezdrátový přenos dat*, Liberec, 2005, 71 s., Diplomová práce (Ing.), Technická univerzita v Liberci
- [17] Došek P., Zelinka O., Matela L.: *Detection of Spots on Materials by the use of FPGA Circuit*, IEEE Applied Electronics 2006, Pilsen, Czech Republic, 6 to 7 September 2006
- [18] Zelinka O.: *Measurement of Objects by the Use of Collimated Light Beam*, Digital Technologies 2006, Book of Abstracts, Slovak Republic, December 2006, ISBN 80-8070-624-7
- [19] Zelinka O.: *Bezkontaktní měření rozměrů – optické mikrometry*, Automa, FCC Public s. r. o., 2009, č. 4, s. 50–52, ISSN 1210-9592
- [20] Kolář M., Zelinka O.: *Výuka programovatelných obvodů na FM TUL*, SEKEL 2009, Brno - Lednice, 15. –17. září 2009, s. 41–42, ISBN 978-80-214-3934-4
- [21] Zelinka O., Kolář, M.: *Napájení programovatelných hradlových polí*, Elektrovue, 2009, (v tisku), ISSN 1213-1539