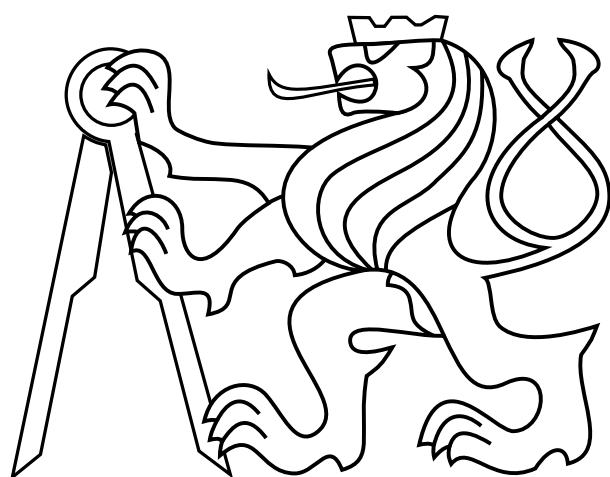


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Přesné měření polohy s využitím zpracování
difrakčních obrazů

Praha, 2017

Autor:

Bc. Martin Hubík

Vedoucí práce:

doc. Ing. Jan Fischer CSc.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Martin Hubík**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Obor: **Senzory a přístrojová technika**

Název tématu česky: **Přesné měření polohy s využitím zpracování difrakčních obrazů**

Název tématu anglicky: **Precise Position Measurement Using Diffraction Image Processing**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte snímač pro přesné měření polohy zpracováním difrakčních obrazů promítaných hranami a štěrbinami na obrazový senzor CMOS. Pro zpracování obrazu využijte mikrořadič řady STM32Fx. Navrhněte a programově implementujte metody zpracování difrakčních obrazů, vytvořte potřebné programy pro mikrořadič i pro PC sloužící pro konfiguraci snímače a zobrazení výsledků. Experimentálně ověřte vlastnosti navrženého snímače, určete limity jeho rozlišovací schopnosti a posuďte chyby linearity.

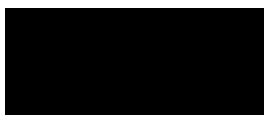
Seznam odborné literatury:

- [1] Hladík, J.: Průběžné zpracování obrazu v DSP pro sledování objektů. Diplomová práce ČVUT FEL, 2015
- [2] Gasvik, K. J.: Optical Metrology, Wiley, ISBN:978-0470843000
- [3] ARM Cortex-M7 Processor Technical Reference Manual Revision r1p0; ARM Corp.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jan Fischer, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 30. června 2016

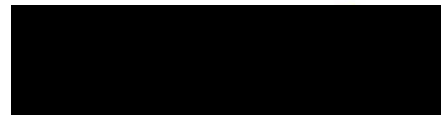
Platnost zadání do¹: 28. února 2018



Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry



V Praze dne 30. 6. 2016



Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Podpis autora

Datum

Poděkování

Rád bych poděkoval za odbornou pomoc a cenné rady doc. Janu Fischerovi a Ing. Jiřímu Hladíkovi. V neposlední řadě patří dík mým rodičům a přátelům, kteří mě podporovali po celou dobu studia.

Abstrakt

Cílem této práce je prozkoumat a navrhnout metody optického měření polohy v jedné i ve dvou osách současně v rozsahu jednotek milimetrů s rozlišením v řádu stovek nanometrů. Metoda měření spočívá v určení polohy stínového obrazce za stínítkem, které je osvětleno bodovým zdrojem koherentního záření. Stínový obrazec je detekován plošným CMOS senzorem. Subpixelového rozlišení je dosaženo díky interpolaci stínového obrazce. Měření polohy stínové stopy je provedeno pro dva typy stínítek (nepropustná polorovina a stínítko s kruhovou aperturou).

Na základě teoretického rozboru je učiněn kvalifikovaný odhad očekávané přesnosti. Ten je pak podroben experimentálnímu ověření na přesných lineárních pojizdech. Polohu stínového obrazce bylo možné určit s přesností 200 nm, což odpovídá 1/30 velikosti pixelu.

Abstract

The goal of this thesis is to investigate and develop methods of optical position measurement in one and two axis simultaneously. The range of the measurement is in order of millimeters with resolution of hundreds of nanometers. The method is based on determination of the position of a shadow image behind the screen, which is illuminated by the coherent point light source. The shadow image is detected by CMOS area sensor. Sub-pixel resolution is achieved by interpolation of the shadow image. The theory is developed for two types of screen (semi-infinite screen and screen with circular aperture).

Based on theoretical analysis an estimate of expected accuracy is presented. Experimental evaluation is performed with high-precision linear translation stage. The position of a shadow image can be determined with the accuracy of 200 nm, which corresponds to 1/30 of the size of a pixel.

Obsah

Abstrakt	1
Obsah	3
1 Úvod	4
2 Teoretický rozbor	5
2.1 Geometrické uspořádání přístroje	5
2.2 Difrakce	6
2.2.1 Fraunhoferova vs. Fresnelova difrakce	7
2.2.2 Fresnelovy difrakční jevy	8
2.3 Difrakce na nepropustné polorovině	10
2.3.1 Algoritmus pro hledání hrany	13
2.4 Difrakce na kruhové apertuře	20
2.4.1 Algoritmus pro hledání středu stínového obrazce	24
3 Experimentální uspořádání	26
3.1 Lineární pojezdy a motor controller	26
3.2 Osvětlovač	27
3.3 Kamerový senzor	28
3.4 Procesorová deska	29
3.5 Laserový interferometr	33
3.6 PC a měřící software	36
4 Experimentální ověření metod	37
4.1 Identifikace dalších zdrojů nelinearity	41
4.2 Návrh na další vývoj	42
5 Závěr	43
Seznam symbolů a zkratk	44
Seznam obrázků	46
Seznam tabulek	46
Bibliografie	47
Příloha A: Speciální funkce pro výpočet difrakčních integrálů	48
Příloha B: Podklady k plošnému spoji	50
Příloha C: Naměřené difrakční obrazce	56

1 Úvod

Tato práce je pokračováním dlouhodobého úsilí v Laboratoři videometrie, jejímž cílem je navrhnout levný přístroj pro měření polohy. Měřicí systém bude využívat pouze tři prvky: bodový zdroj koherentního záření (laser), stínítko a CMOS kameru (dále už pouze senzor). Projekční metoda spočívá v určení polohy stínového obrazce, který se vytváří za stínítkem. Poloha stínového obrazce je pak úměrná poloze samotného stínítka. Konstrukčně je prototyp tohoto zařízení velmi jednoduchý a nevyžaduje na rozdíl od jiných metod měření relativně drahé optické prvky jako jsou kolimační a telecentrické čočky. Výsledné zařízení má potenciál být levnou a velmi kompaktní alternativou profesionálních měřicích systémů. Jednoduchost uspořádání měřicího systému sebou na druhou stranu přináší obtíže spojené s komplikovaným fyzikálním popisem, který si nevystačí s geometrickou optikou, ale vyžaduje optiku vlnovou. V konečném výsledku jsou ovšem algoritmy pro vyhodnocení obrazových dat natolik jednoduché, že jejich implementace je možná i na levných embedded procesorech.

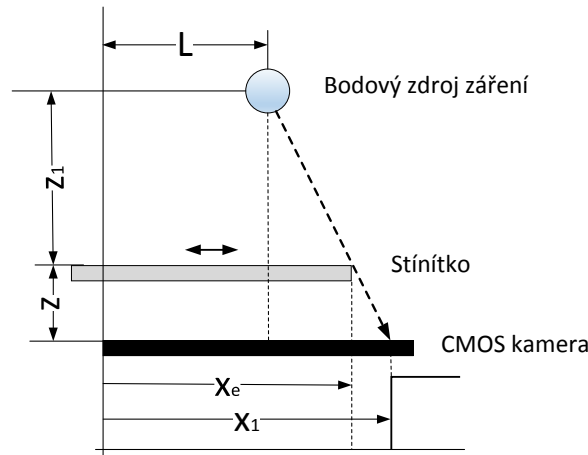
Pozn: Autor této práce přímo navazuje na disertační práci [1] a diplomovou práci [2]. Pokud není řečeno jinak všechny obrazové materiály byly kresleny autorem. Grafický design některých schémat byl inspirován podle [1].

2 Teoretický rozbor

V této kapitole bude představeno geometrické uspořádání přístroje pro měření polohy. Dále budou shrnuty základní poznatky z vlnové optiky, které popisují tvorbu stínových obrazců za stínítkem. Na závěr budou podrobně popsány stínové obrazce pro dva speciální typy stínítek: nepropustná polorovina a nepropustné stínítko s kruhovou aperturou.

2.1 Geometrické uspořádání přístroje

Základní princip měření vychází z geometrické optiky. Mezi bodovým zdrojem světla a kamerovým senzorem se nachází stínítko, za kterým se vytváří stínový obrazec, jehož polohu je možné určit s velkou přesností. Obrázek 1 zobrazuje konfiguraci pro měření polohy v jedné ose. Stínítkem je nepropustná polorovina se zanedbatelnou tloušťkou, která se pohybuje v rovině rovnoběžné s rovinou pozorování, ve které se nachází senzor. Z výstupního signálu senzoru se určuje poloha hrany geometrického stínu x_1 . Poloha stínítka x_e je definována jako vzdálenost kolmého průmětu hrany poloroviny do roviny pozorování.



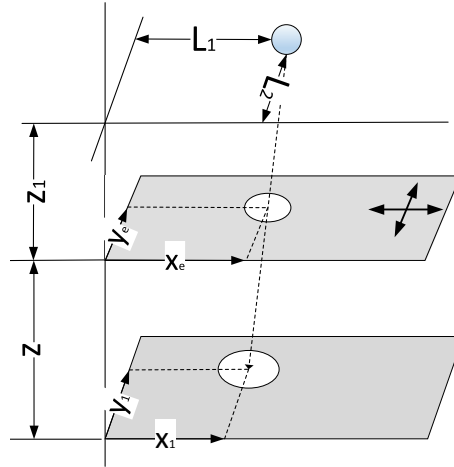
Obrázek 1: Měření polohy stínítka projekční metodou - nepropustná polorovina (podle [1])

Rovnici 1 pro polohu stínítka je možné odvodit z podobnosti trojúhelníků. Pokud je bodový zdroj záření velmi daleko $z_1 \gg z$, na stínítko dopadá přibližně rovnoběžný svazek paprsků a lineární koeficient před x_e je přibližně roven jedné.

$$x_e = \frac{z_1}{z + z_1} x_1 + \frac{z}{z + z_1} L \quad (1)$$

Pro měření polohy stínítka ve dvou osách se bude používat nepropustné stínítko s kruhovou aperturou o průměru d . Poloha stínítka je definována jako

poloha středu této apertury. Z výstupního signálu senzoru se určuje poloha středu stínového obrazce o souřadnicích x_1, y_1 .



Obrázek 2: Měření polohy projekční metodou na kruhové apertuře

$$x_e = \frac{z_1}{z + z_1} x_1 + \frac{z}{z + z_1} L_1$$

$$y_e = \frac{z_1}{z + z_1} y_1 + \frac{z}{z + z_1} L_2$$

V dalším textu bude věnován prostor popisu stínových obrazců a jejich závislosti na parametrech z_1, z . Pro oba typy stínových obrazců bude představena metoda nalezení jejich polohy (souřadnice x_1 pro stínítko ve tvaru nepropustné poloroviny a souřadnice (x_1, y_1) pro nepropustné stínítko s kruhovou aperturou).

2.2 Difrakce

Pro určení polohy stínítka je nejprve nutné nalézt polohu stínové stopy na senzoru. Pro případ, kdy stínítkem je nepropustná polorovina, se za pozici stínové stopy uvažuje poloha hrany geometrického stínu. V teorii zpracování obrazu existují dobře známé algoritmy hledání hran založené na zkoumání prvních a druhých diferencí (Sobel, Prewitt). Obdobně pro případ nepropustného stínítka s kruhovou aperturou je možné nalézt střed stínového obrazce pomocí odhadu těžiště. Tyto metody ovšem nezohledňují fyzikální podstatu tvorby stínového obrazce a nejsou proto vhodné pro přesná měření polohy se subpixelovým rozlišením. Metody měření polohy použité v této práci naproti tomu zohledňují vlnovou povahu světla a tvorbu stínového obrazce za překážkou.

Podle geometrické optiky by měl být přechod mezi zastíněnou a nezastíněnou částí nekonečně strmý. Ve skutečnosti je realita o poznání složitější. Světlo za

přepážkou vytváří neostré přechody a obraz okraje se jeví jako rozostřený. Žádná fyzikální veličina nemůže měnit svoji hodnotu skokově a výjimkou není ani intenzita světla. Pokud je navíc zdroj světla monochromatický, bude prostorové rozložení intenzity v obrazové rovině složitá oscilující funkce. Vysvětlení těchto jevů poskytuje vlnová optika jejímž základem je Huygensův princip [3]: "Každý bod homogenního a izotropního prostředí, do něhož dospěje vlnění, tj. každý bod čela vlny, je zdrojem sekundární kulové vlny." Jelikož každý bod na štěrbině vytváří sekundární vlnoplochu, světlo se ohýbá a intenzita světla za přepážkou se mění spojitě. Kvantitativní vyjádření tohoto jevu vyjadřuje difrakční integrál.

K difrakci dochází vždy, když je největší lineární rozměr apertury větší než vlnová délka dopadajícího světla. Významnost těchto jevů ovšem závisí na konkrétním experimentálním uspořádání. Relevantními faktory jsou zejména vzdálenost roviny pozorování od stínítka, rozměr apertury ve stínítku a při použití bodového zdroje osvětlení i jeho vzdálenost od stínítka. Jako detektor intenzity záření bude v experimentální části použit CMOS kamerový senzor. I jeho parametry je třeba vzít v potaz pro vyhodnocení difrakčních jevů. Jedná se hlavně o rozteč pixelů, fill faktor, dynamický rozsah a kvantizace výstupního signálu.

2.2.1 Fraunhoferova vs. Fresnelova difrakce

Difrakční jevy je možné rozdělit do dvou skupin, Fresnelova (difrakce v blízkém poli) a Fraunhoferova (difrakce ve vzdáleném poli). Liší se jak způsobem výpočtu, tak i na první pohled vizuálně výslednými difrakčními obrazci (Fraunhoferovy difrakční obrazce připomínají geometrii stínítka pouze velmi vzdáleně). Fraunhoferova difrakce je limitním případem obecnější Fresnelovy difrakce, která ovšem nastává pouze pokud jsou splněny dvě podmínky

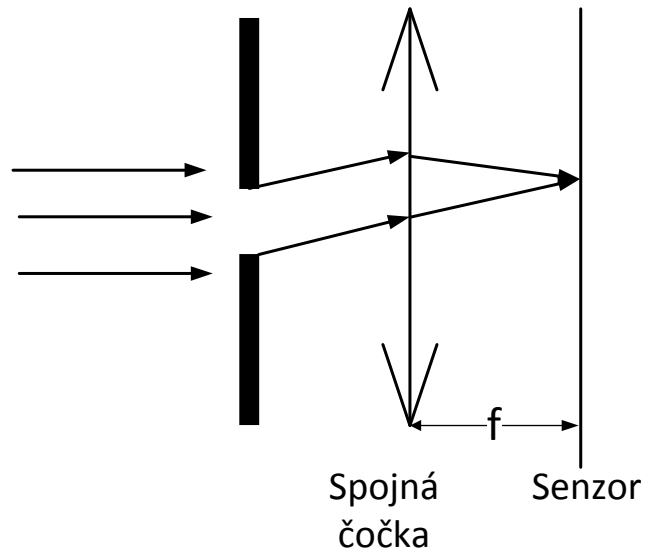
$$z \gg \frac{d^2}{\lambda}$$

$$z_1 \gg \frac{d^2}{\lambda},$$

kde λ je vlnová délka dopadající vlny, d je největší lineární rozměr stínítka, z je vzdálenost roviny pozorování od stínítka a z_1 je vzdálenost bodového zdroje záření od stínítka.

Podmínky vyžadují, aby senzor i bodový zdroj záření byly v dostatečně velké vzdálenosti od stínítka. Pro apertury s rozměrem řádově $a \approx 0.1$ mm a $\lambda = 650$ nm musí být vzdálenosti z , z_1 stovky metrů, aby byly splněny obě podmínky Fraunhoferovy difrakce.

Splnit podmínku pro z_1 je možné s pomocí kolimovaného zdroje záření namísto bodového. Splnění podmínky pro z lze v praxi dosáhnout umístěním spojné čočky za stínítko. Spojná čočka fokusuje rovnoběžné paprsky do bodu v ohniskové rovině, a vytváří tak v ohniskové rovině zmenšený obraz roviny v nekonečnu. Geometrické uspořádání ilustruje obrázek 3.



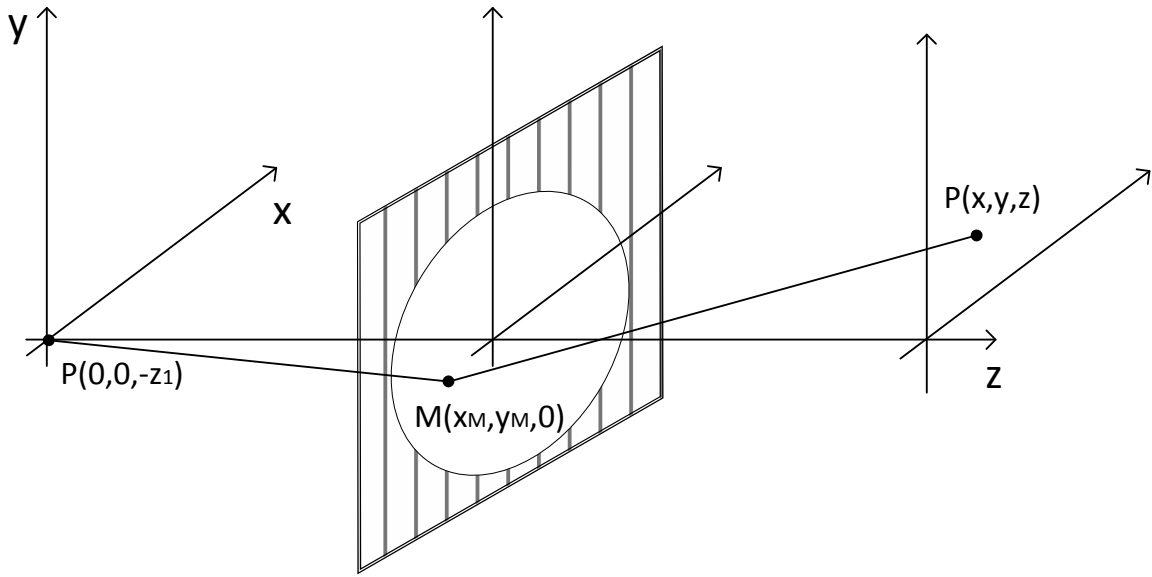
Obrázek 3: Geometrické uspořádání pro pozorování Fraunhoferovy difrakce

V této práci použité metody měření pozice si kladou za cíl, aby se daly aplikovat na reálný senzor polohy. Zde hraje roli samozřejmě velikost i cena výsledného zařízení, která je dalšími optickými prvky dále navyšována. Proto bude dále věnován prostor pouze Fresnelově popisu difrakce.

Pozn: Pro speciální případ difrakce na hraně nepropustné poloroviny, která bude popsána níže, nelze použít Fraunhoferův popis vůbec.

2.2.2 Fresnelovy difrakční jevy

Z bodového zdroje koherentního záření $P_1(0, 0, -z_1)$ vychází kulová divergentní vlna. V rovině stínítka nabývá vlnová funkce hodnoty $\psi_0(x_m, y_m, 0)$. Rovina pozorování se nachází ve vzdálenosti z od stínítka. Hodnota vlnové funkce v rovině pozorování je dána difrakčním integrálem, jehož konkrétní integrační meze jsou dány stínítkem.



Obrázek 4: Geometrické uspořádání při Fresnelově difrakci na kruhovém otvoru

Pro výpočet Fresnelovy difrakce se nejčastěji využívá rovnice 2. Jedná se o skalární popis, který již neuvažuje vektorovou povahu elektromagnetického vlnění. V rovnici už byla použita paraxiální aproximace sekundárních kulových vln, které vycházejí z každého bodu v rovině stínítka. Toto zjednodušení je nutný předpoklad většiny výpočtů difrakčních integrálů. Analytické řešení existuje pro speciální tvary stínítek.

- obdelníková štěrbina
- nepropustná polorovina (speciální případ obdelníkové štěrbiny)
- kruhová štěrbina

$$\psi(x, y, z) = -i \frac{k}{2\pi} \frac{\exp(ikz)}{z} \iint_{-\infty}^{\infty} \psi_0(x_M, y_M) \exp \left\{ \frac{ik}{2z} [(x - x_M)^2 + (y - y_M)^2] \right\} dx_M dy_M, \quad (2)$$

kde $\psi_0(x, y, z)$ je vlnová funkce v rovině stínítka a k je vlnové číslo.

Dále bude uvedeno řešení pro dva typy stínítek, nepropustná polorovina a nepropustné stínítko s kruhovou aperturou. Hlavní motivací je najít a popsat vliv parametrů z, z_1 na tvar stínového obrazce a nalézt takové hodnoty těchto parametrů, které se hodí pro detekci jejich polohy na CMOS kamerovém senzoru.

Řešení difrakčních integrálů bylo převzato z prací [1], [4] a [3] a v následujících odstavcích bude uváděno bez odvození a to ve tvaru

$$\frac{\psi(x, y, z)}{\psi_r(x, y, z)} = \sqrt{I(x, y, z)} \exp [i\phi(x, y, z)], \quad (3)$$

kde $\psi_r(x, y, z)$ je vlna, která by byla v bodě $P(x, y, z)$, kdyby nebylo žádného difrakčního stínítka, tj. nerušená vlna, $I(x, y, z)$ je pak relativní intenzita záření a $\Phi(x, y, z)$ fáze vztažená k fázi vlny $\psi_r(x, y, z)$.

Z hlediska měření polohy je zajímavá pouze intenzita záření, která je rovna kvadrátu absolutní hodnoty vlnové funkce. Výstup senzoru je až na danou multiplikační konstantu úměrný intenzitě záření.

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

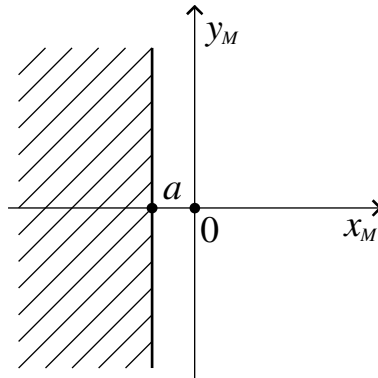
Speciální funkce v řešení difrakčních integrálů Analytické řešení difrakčních integrálů obsahuje speciální funkce (Fresnelovy integrály, Besselovy funkce, Lommelovy funkce). V následujícím textu jsou uvedeny pouze symbolicky. Jejich definice a algoritmus pro numerický výpočet v programu Matlab je uveden v příloze 5. Hlavním zdrojem těchto informací byl pro autora [5].

$C(x), S(x)$ Fresnelovy integrály

$U_1(u, v), U_2(u, v)$ Lommelovy funkce

2.3 Difrakce na nepropustné polorovině

Nepropustná polorovina zastiňuje oblast $x_M < a$.



Obrázek 5: Stínítka - nepropustná polorovina [3]

Řešení difrakčního integrálu za stínítkem je pro oba typy světelných zdrojů formálně shodné, liší se pouze v substituci do Fresnelových integrálů.

$$\frac{\psi(x, y, z)}{\psi_r(x, y, z)} = \frac{1 - i}{2} \left[C(v_a) + iS(v_a) + \frac{1 + i}{2} \right] \quad (5)$$

Bodový zdroj světla

$$v_a = \sqrt{\frac{k}{\pi z}} \sqrt{\frac{z_1 + z}{z_1}} \left(\frac{x z_1}{z_1 + z} - a \right), \quad (6)$$

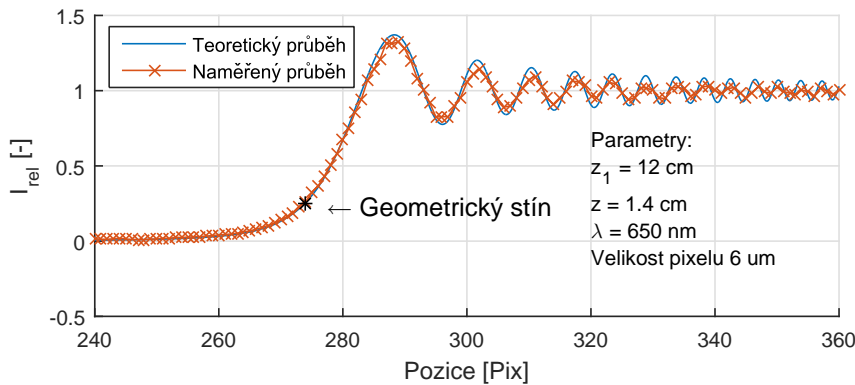
kde k je vlnové číslo a vzdálenost a je vyznačena na obrázku 5.

Zdroj kolimovaného světla

$$v_a = \sqrt{\frac{k}{\pi z}} (x - a) \quad (7)$$

Na obrázku 6 je vidět srovnání teoretického a naměřeného průběhu intenzity záření za stínítkem ve tvaru nepropustné poloroviny. Jako bodový zdroj záření byla použita laserová dioda s vlnovou délkou $\lambda = 650$ nm. Bodový zdroj záření byl při měření umístěn ve vzdálenosti $z_1 = 12$ cm, senzor byl od stínítka ve vzdálenosti $z = 1.4$ cm. Pro větší názornost jsou jednotky na horizontální ose vyjádřeny v násobcích velikosti pixelu (1 pix = 6 μ m).

Je vidět, že směrem k zastíněné části poloroviny od polohy geometrického stínu intenzita postupně klesá k nule. Směrem k osvětlené části poloroviny intenzita osciluje okolo jedné a tyto oscilace se postupně zhušťují a slábnou.



Obrázek 6: Průběh relativní intenzity záření za nepropustnou polorovinou

Pro velmi vzdálený zdroj záření (na stínítko dopadá kolimovaný svazek paprsků) se hrana geometrického stínu nachází v bodě $x = x_e = a$. Pro blízký zdroj záření je hrana na pozici $x = \frac{z_1 + z}{z_1} a$. Dosadíme-li za x do vzorců 6 a 7 pozici geometrického stínu, dostaneme $v_a = 0$. Oba Fresnelovy integrály mají v nule hodnotu nula, $C(0) = S(0) = 0$. Relativní intenzita na hranici geometrického stínu je tedy rovna 0.25. Tento výsledek není závislý na vzdálenostech z, z_1 , na vlnové délce světla ani na vzájemné poloze bodového zdroje světla a stínítka.

Principiálně je možné si pro určování polohy stínítka vybrat libovolný bod z grafu relativní intenzity. Existují například rovnice, které popisují polohu minim

a maxim. Ty ovšem na výše uvedených parametrech závisí. Poloha geometrického stínu se z praktického hlediska jeví jako ideální bod zájmu.

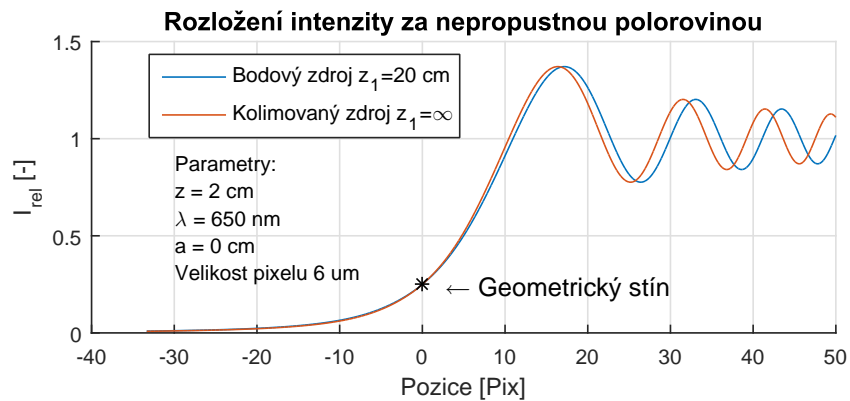
Při určování polohy geometrického stínu z výstupu senzoru bude interpolováno malé okolí hrany před prvním maximem. Proto je důležité vědět, jak souvisí délka této hrany na parametrech z, z_1 . Délku hrany je možné definovat přibližně jako vzdálenost od bodu geometrickému stínu k prvnímu maximu. Pozice m -tého maxima je

$$x_M = \sqrt{\frac{\lambda(z_1 + z)z}{2z_1} \left(4m + \frac{3}{2}\right)}, \text{ kde } m = 0, 1, 2, \dots \quad [6] \quad (8)$$

Pro kvantifikaci vlivu parametrů z, z_1 na délku hrany byly vypočítány parciální derivace x_{M0} podle z, z_1 . Analýzou těchto funkcí lze zobecnit do následujícího závěru, který platí pro $z_1 > z$, což je v praxi splněno velmi snadno.

$$\begin{aligned} \left| \frac{\partial x_{M0}}{\partial z} \right| &\gg \left| \frac{\partial x_{M0}}{\partial z_1} \right| \\ \frac{\partial x_{M0}}{\partial z} &> 0 \\ \frac{\partial x_{M0}}{\partial z_1} &< 0, \end{aligned}$$

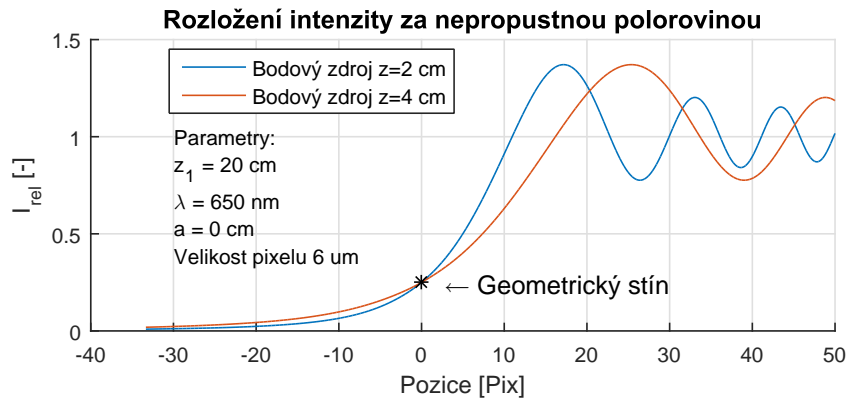
Dá se tedy předpokládat, že s rostoucí vzdáleností zdroje bodového záření od stínítka se bude délka hrany mírně zkracovat. Stejně tak se bude zkracovat i vzdálenost mezi všemi sousedními maximy. Dokumentuje to obrázek 7, kde jeden ze zdrojů je umístěn v nekonečnu a přesto je změna délky hrany velmi malá oproti bodovému zdroji ve vzdálenosti 20 cm (rozdíl je méně než $16 \mu\text{m}$ tzn 2 pixely).



Obrázek 7: Závislost na vzdálenosti zdroje od stínítka

Naopak s rostoucí vzdáleností senzoru od stínítka se délka hrany bude podstatně zvětšovat. Stejně tak jako vzdálenost sousedních maxim. Na obrázku 8 je

vidět zásadní změna délky hrany při zdvojnásobení vzdálenosti senzoru od stínítka.



Obrázek 8: Závislost na vzdálenosti senzoru od stínítka

Protože se délka hrany pro kolimovaný a dostatečně vzdálený bodový zdroj výrazně neliší, je možné limitním přechodem v rovnici 8 pro z_1 jdoucí do nekonečna dospět k přibližnému vztahu pro délku hrany před prvním maximem.

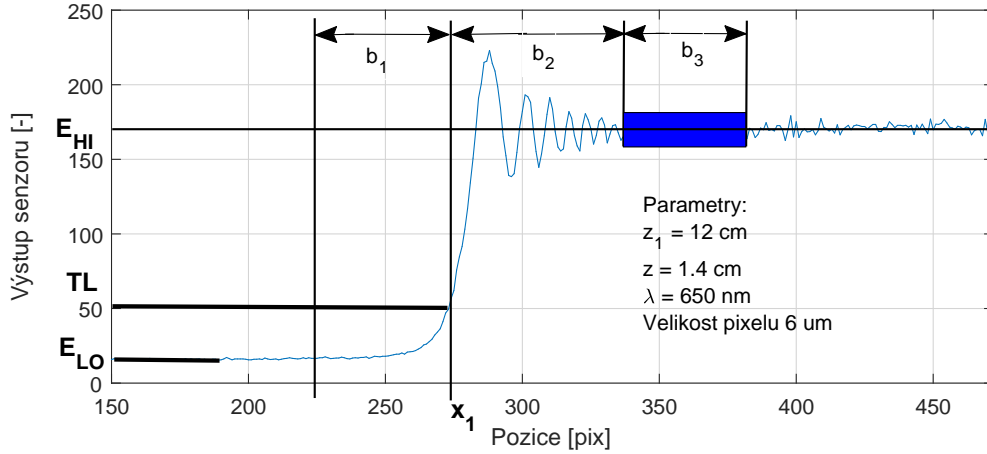
$$x_{M0} = \frac{\sqrt{3\lambda}}{2} \sqrt{z} \quad (9)$$

2.3.1 Algoritmus pro hledání hrany

Algoritmus hledání hrany na šterbině byl popsán v práci [1]. Autor této diplomové práce se pokusí navázat a podrobněji diskutovat jednotlivé kroky algoritmu a jejich závislost na konkrétním geometrickém uspořádání. Na podkladě mnoha simulací bude učiněn odhad nejistoty této metody. V kapitole 4 se tento odhad autor pokusí ověřit experimentálně.

Simulace měřicího procesu zohledňuje způsob, jakým senzor zaznamenává průběh intenzity záření. V úvahu je brána konečná velikost pixelu, kvantizace signálu a šum na výstupním signálu. Závěry z této části lze aplikovat v budoucnu i pro jiná měřicí uspořádání např. pro senzor s jinou velikostí pixelu, nebo pro jiné nastavení vzdálenosti stínítka od senzoru.

Na obrázku 9 je vidět signál na výstupu senzoru. Signál má offset E_{LO} , který je způsoben jednak temnými proudy senzoru a dále pak okolním osvětlením, které se nepodařilo zcela potlačit. Oscilace v pravé části oscilují okolo hodnoty E_{HI} a postupně ztrácejí tvar, jelikož je signál v této části velmi podvzorkovaný tj. není splněn vzorkovací teorém.



Obrázek 9: Význam parametrů pro algoritmus hledání hrany

Aby naměřený signál E odpovídal teoretické hodnotě relativní intenzity je třeba ho normovat

$$I_{measured} = \frac{E - E_{LO}}{E_{HI}}. \quad (10)$$

Druhá možnost, která je výhodnější pro reálný výpočet, je modifikovat prahovou úroveň tak, aby odpovídala naměřenému signálu. Prahovací úroveň pro naměřená data je

$$TL = E_{LO} + 0.25(E_{HI} - E_{LO}) [1] \quad (11)$$

Celý proces lze rozložit do třech částí, kterým bude věnován samostatný prostor.

- Určit velikost signálu v zastíněné části poloroviny E_{LO} .
- Určit velikost signálu, okolo které osciluje intenzita v osvětlené části poloroviny E_{HI} .
- Interpolovat signál v okolí bodu, kde se nachází geometrický stín. Dopočítat polohu stínu se subpixelovým rozlišením.

Nejprve je však nutné nalézt přibližnou polohu geometrického stínu \hat{x}_1 , od které se odvíjí vzdálenosti b_1, b_2 (vyznačeno v obrázku 9). Prahovací úroveň je vypočtena z maximální a minimální hodnoty signálu. Přibližná poloha hrany \hat{x}_1 se určí jako index pixelu, kde signál překročil prahovou úroveň TL_a .

$$TL_a = E_{MIN} + 0.25(E_{MAX} - E_{MIN}) [1] \quad (12)$$

Hodnota intenzity v zastíněné části poloroviny Pro zjištění velikosti signálu v zastíněné části E_{LO} stačí vzít hodnotu signálu v místě dostatečně vzdáleném od polohy geometrického stínu \hat{x}_1 . Pro zastíněnou oblast existuje aproximace

$$I = \frac{1}{2(\pi v_a)^2}, \quad v_a \ll -1. \quad (13)$$

Požadavek lze formulovat tak, že hledáme vzdálenost od geometrického stínu, kde signál generovaný stínovým obrazcem klesne pod kvantizační úroveň senzoru (uvažuje se 8bitové rozlišení). V této vzdálenosti je signál roven hodnotě E_{LO} , která odpovídá okolnímu osvětlení a ofsetu samotného senzoru. Mezi relativní intenzitou I a výstupem senzoru je lineární vztah, kde konstanta úměrnosti závisí na délce expozice a zesílení AD převodníku na senzoru. Senzor vrací hodnoty v rozsahu 0-255. Předpokládejme, že výstup senzoru je roven $E = 170I$ (odpovídá přibližně obrázku 9). Požadavek, lze vyjádřit jako

$$\frac{170}{2(\pi v_a)^2} < 1. \quad (14)$$

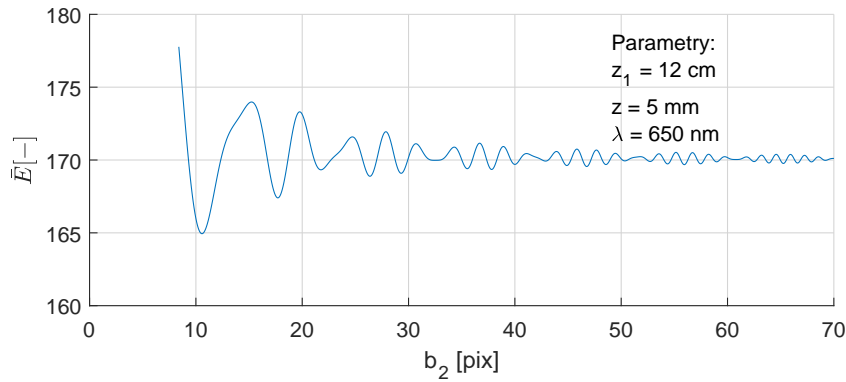
Dosazením za v_a z rovnice 7 a řešením pro x dostaneme hledanou vzdálenost.

$$x = b_1 = \sqrt{\frac{170/2}{\pi k}} \sqrt{z} \quad (15)$$

Pro $z = 10$ mm, $\lambda = 650$ nm je $x_{min} = 167$ μ m, což při velikosti pixelu 6 μ m odpovídá vzdálenosti 28 pixelů od geometrického stínu. Hodnota E_{LO} v zastíněné části se potom vypočte jako průměr přes tři pixely vzdálených od prvotního odhadu geometrického stínu \hat{x}_1 o 28 pixelů.

Hodnota okolo, které osciluje intenzita v osvětlené části poloroviny Zjištění hodnoty E_{HI} je poněkud komplikovanější, protože amplituda oscilací neklesá dostatečně rychle, ani když je stínítko velmi blízko senzoru. Odhad E_{HI} je možné vypočítat jako průměr přes interval o délce b_3 , jehož levá mez se nachází ve vzdálenosti b_2 od prvotního odhadu polohy geometrického stínu \hat{x}_1 .

Obrázek 10 demonstruje závislost odhadu E_{HI} na parametrech b_2, b_3 . Průměrovací okno má délku $b_3 = 10$ pixelů. Toto okno je posouváno po signálu o vzdálenost b_2 od geometrického stínu a v každém bodě je vypočítán průměr. Např. funkční hodnota v bodě $b_2 = 30$ pix je průměrná hodnota na intervalu (30,40) pix. Zvětšování vzdálenosti b_2 má přibližně stejný efekt jako zvětšování šíře okna b_3 . Důležitý je pouze jejich součet.



Obrázek 10: Závislost průměrné hodnoty přes okno o velikosti 10 pixelů na vzdálenosti levé meze okna od geometrického stínu

Následující tabulka ukazuje, jak vzdálený signál je potřeba ve výpočtu zohlednit, aby odhad hodnoty E_{HI} kolísal v rozmezí menším než je kvantizační úroveň senzoru (vyhodnoceno pro různé vzdálenosti stínítka od senzoru).

z [mm]	5	10	15	20	25	30
$\bar{b}_2 + \bar{b}_3$ [pix]	47	76	88	108	138	166

Obrázek 11

Na tomto místě je nutný určitý kompromis. Chybné určení hodnot E_{HI} a E_{LO} vede na špatné určení prahovací úrovně TL což, jak se ukáže později, má velmi zásadní vliv na chybu polohy hrany. Přesné určení hodnot E_{HI} a E_{LO} však vyžaduje znát hodnoty pixelů, které se jsou od hrany velmi vzdálené, což zmenšuje měřící rozsah přístroje. Čím je stínítka blíže senzoru, tím menší část signálu je třeba uvažovat.

Interpolace hrany před prvním maximem Existují lokální aproximace, které popisují chování intenzity v nezastíněné i zastíněné části roviny s pomocí elementárních funkcí. Bohužel tyto aproximace selhávají právě v okolí geometrického stínu.

Pro přesnější zjištění polohy budou vyzkoušeny interpolace polynomem prvního a druhého řádu v malém okolí geometrického stínu. Interpoláčním polynomem stupně M se proloží $M + 1$ bodů (tzv. uzlových bodů) v dané části funkce. Funkční hodnota polynomu a prokládané funkce je v uzlových bodech shodná. Přesnější odhad polohy geometrického stínu se pak určí vyřešením rovnice $\phi(x) = 0.25$, kde $\phi(x)$ je interpolační polynom. Odchylku mezi skutečnou polohou geometrického stínu a jejím odhadem nazveme chybou interpolace.

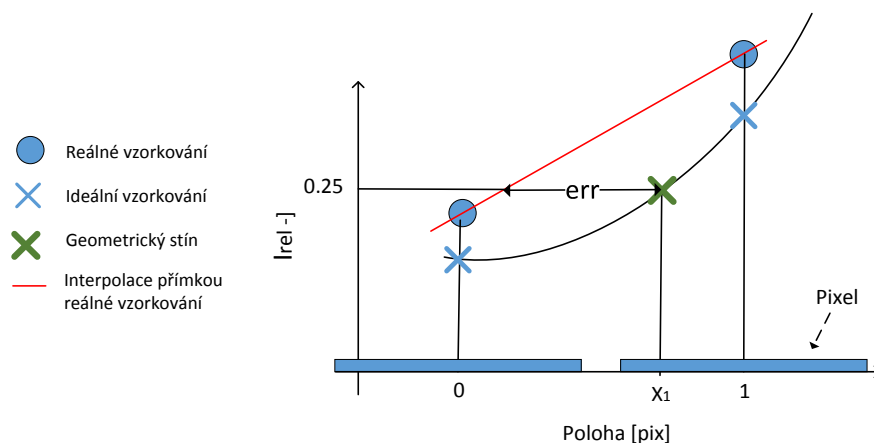
V dalších odstavcích se bude diskutovat charakter chyby interpolace v závislosti na

- vzájemné poloze senzoru a stínového obrazce
- kvantizaci výstupního signálu senzoru (8bitové rozlišení)
- chybě při určení prahovací úrovně
- přítomnosti šumu
- parametru z , (vzdálenost stínítka od senzoru)

Pro ideální prostorové vzorkování by pixel musel být nekonečně malý. Ve skutečnosti se výrobci snaží, aby fotocitlivá část pixelu byla co největší, aby se zvýšila citlivost senzoru. Výstup senzoru je pro daný pixel úměrný střední hodnotě intenzity záření přes celou jeho plochu. Předpokládá se, že citlivost je ve všech bodech fotocitlivé části pixelu stejná. U skutečného senzoru není fill faktor nikdy roven jedné, protože část plochy zabírají tranzistory. Informace o skutečné geometrii pixelu výrobce zpravidla neuvádí. V následujících simulacích se uvažuje, že fotocitlivá část má geometrii čtverce a fill faktor roven jedné, tzn. velikost pixelu je rovna rozteči sousedních pixelů.

Teoretický průběh intenzity záření je vypočítán s velmi malým prostorovým krokem. Hodnota intenzity detekovaná jednotlivým pixelem je získána jako průměrná hodnota teoretického průběhu přes interval odpovídající velikosti pixelu.

Náběžná hrana před prvním maximem je v okolí bodu geometrického stínu konvexní. Střední hodnota intenzity záření detekovaná pixelem je tak vždy mírně větší než intenzita na středu pixelu, která by odpovídala ideálnímu prostorovému vzorkování. Na obrázku 12 je graficky znázorněna interpolace přímkou mezi dvěma reálně navzorkovanými body v okolí geometrického stínu. Rovněž je zde vyznačena chyba interpolace. Pozn. Graf funkce je pouze schématický pro lepší názornost.

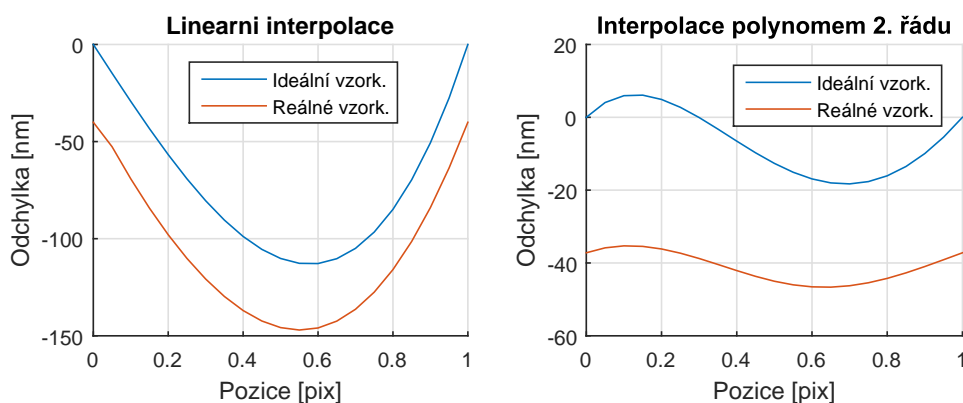


Obrázek 12: Interpolaci hrany přímkou

Chyba interpolace je závislá na vzájemné poloze senzoru a stínítka, resp. na tom v jakých bodech je stínový obrazec navzorkován. Tuto závislost zachycuje obrázek 13. Chyba interpolace byla vyčíslená pro různé polohy stínítka. Poloha stínítka se měnila v rozsahu, který odpovídá změně polohy stínového obrazce o právě jeden pixel. Maximum chyby se nachází přibližně na hodnotě 0.6.

V grafu je možno vidět, že chyba při zahrnutí vlivu reálného vzorkování má pro oba typy interpolace jistý ofset. Ten je dán konvexností funkce v daném intervalu. Ve všech následujících simulacích bude uvažováno již pouze reálné vzorkování. Stejná simulace byla provedena s kvantizací intenzity záření do 256 úrovní. Výsledné průběhy jsou téměř shodné, což vede k závěru, že vliv kvantizace na chybu interpolace je zanedbatelný.

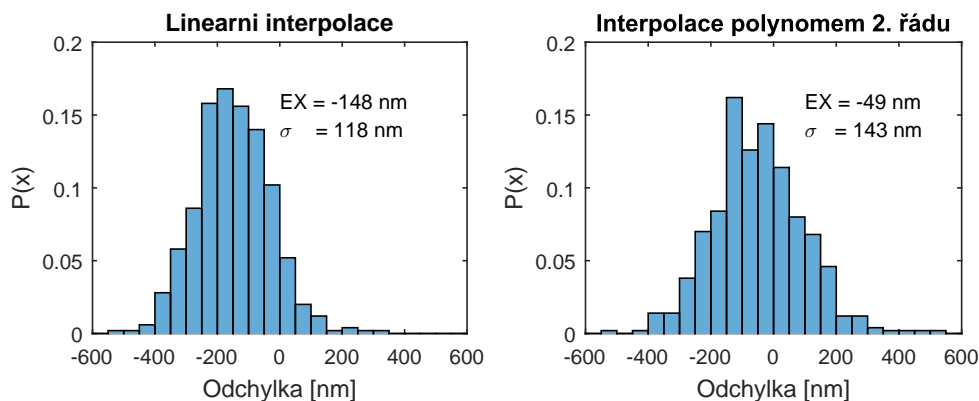
Parametry pro výpočet grafu: $z_1 = 200$ mm, $z = 20$ mm, velikost pixelu = $6 \mu\text{m}$, $\lambda = 650$ nm.



Obrázek 13: Chyba interpolace v závislosti na vzájemné poloze senzoru a stínového obrazce

Již dříve bylo naznačeno, jak důležitý je vliv přesného odhadu E_{HI} a E_{LO} , z kterého se počítá prahovací úroveň. Chyba v odhadu E_{HI} a E_{LO} , která odpovídá jedné kvantizační úrovni senzoru, způsobí chybu interpolace 196 nm nezávisle na použité metodě. Tato chyba roste lineárně s velikostí chyby v E_{HI} a E_{LO} a je velmi podstatnou složkou ve výsledné chybě interpolace.

V následující simulaci byl k teoretickému průběhu intenzity přičten šum s normálním rozdělením se směrodatnou odchylkou $\sigma = 1.2$. Výsledný průběh byl zpracován algoritmem pro interpolaci hrany. Poloha stínového obrazce se nachází na pozici, kde je chyba interpolace největší (na obrázku 13 je to poloha odpovídající přibližně 0.6 pix). Důvodem je snaha o nalezení nejhoršího možného případu. Chyba při určení E_{HI} a E_{LO} zde není zahrnuta. Chyba interpolace byla vyčíslena pro 1000 realizací šumu. Na obrázku 14 je histogram chyby interpolace. Na první pohled je jasné, že interpolace polynomem druhého řádu není vlivem šumu o tolik lepší metodou, jak by se mohlo zdát z předchozích odstavců. Střední hodnota obou rozdělení odpovídá chybám v grafu 13 v bodě 0.6 pix.



Obrázek 14: Histogram chyby interpolace za přítomnosti šumu

Stejná simulace byla provedena pro různé vzdálenosti stínítka od senzoru. Vzdalováním stínítka klesá strmost hrany před prvním maximem, což způsobuje, že hrana je vzorkována hustěji. Počet pixelů, na kterých se celá hrana rozprostírá (v tabulce označeno N) je možné určit z rovnice 9. Pozn. Délka hrany byla definovaná jako vzdálenost od geometrického stínu k prvnímu maximu. Systematická složka chyby \bar{X} pro lineární interpolaci výrazně roste s klesajícím počtem vzorků hrany. Na metodu interpolace polynomem druhého řádu tak výrazný vliv nemá. Zajímavým zjištěním je fakt, že s klesajícím počtem vzorků hrany klesá pro obě metody i náhodná složka chyby σ .

		Lineární interpolace		Polynom 2. řádu	
z [mm]	N [pix]	\bar{X} [nm]	σ [nm]	\bar{X} [nm]	σ [nm]
5	8.2	-298	58	-63	72
10	11.6	-209	85	-54	104
15	14.3	-171	103	-48	126
20	16.5	-148	118	-49	143
25	18.4	-138	139	-51	173
30	20.2	-113	148	-32	179

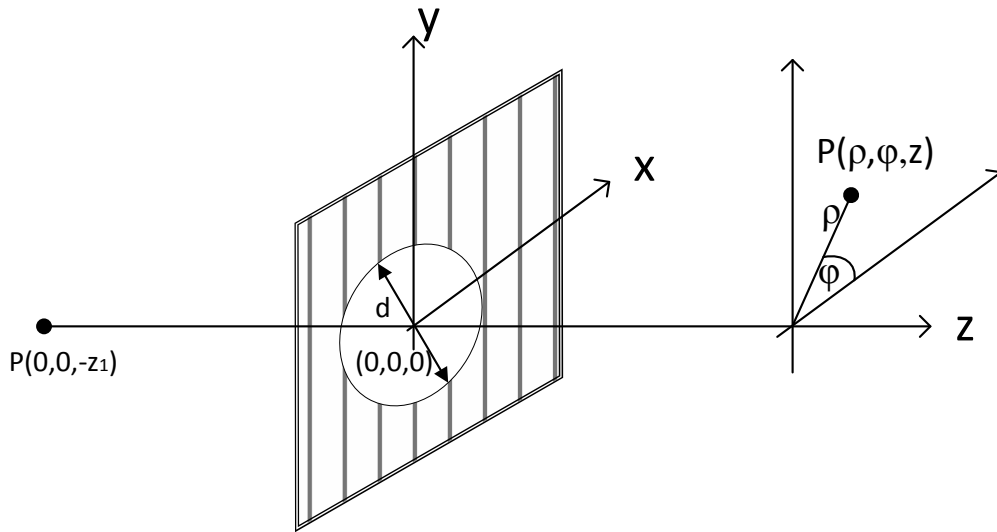
Obrázek 15: Parametry rozdělení chyby interpolace v závislosti na počtu vzorků hrany

Shrnutí Metoda interpolace polynomem druhého řádu se jeví jako lepší. Vyšší složitost výpočtu oproti lineární interpolaci není při současném výkonu embedded procesorů tak významným faktorem. Jako ideální vzdálenost stínítka od senzoru je zvolena hodnota $z = 5$ mm. Chyba způsobená vzájemnou polohou stínítka a senzoru je pro zvolenou metodu zanedbatelná. Chyba způsobená špatným určením E_{HI} a E_{LO} je 196 nm (předpokládá se, že obě hodnoty jsou určeny s přesností na jednu kvantizační úroveň senzoru). Pro šum o daných parametrech je náhodná složka chyby 72 nm.

Pro určení E_{LO} je při výpočtu potřeba zahrnout vzorky vzdálené 20 pixelů od polohy hrany směrem k zastíněné části senzoru. Pro určení E_{HI} je to 47 pixelů směrem k osvětlené části senzoru. Stínítka bude umístěno ve směru kolmém k řádku senzoru, který má 752 pixelů. Výslednou polohu hrany je tak možné detekovat v rozsahu 685 pixelů (3.9 mm).

2.4 Difrakce na kruhové apertuře

V práci [2] byl pro výpočet difrakčních obrazců za kruhovou aperturou použit aparát Fourierovy transformace. Zde je uvedeno analytické řešení, které poskytuje jiný pohled do celé problematiky. Geometrické uspořádání při difrakci na nepropustném stínítku s kruhovou aperturou o průměru d je zobrazeno na obrázku 16. Bodový zdroj záření se nachází na ose kruhové apertury ve vzdálenosti z_1 od stínítka. Rovina pozorování je od stínítka ve vzdálenosti z .



Obrázek 16: Nepropustné stínítko s kruhovou aperturou

Řešení difrakčního integrálu vede na

$$\frac{\psi(x, y, z)}{\psi_r(x, y, z)} = - \exp \left[\frac{i}{2} \left(u + \frac{v^2}{u} \right) \right] [U_2(u, v) + iU_1(u, v)] \quad (16)$$

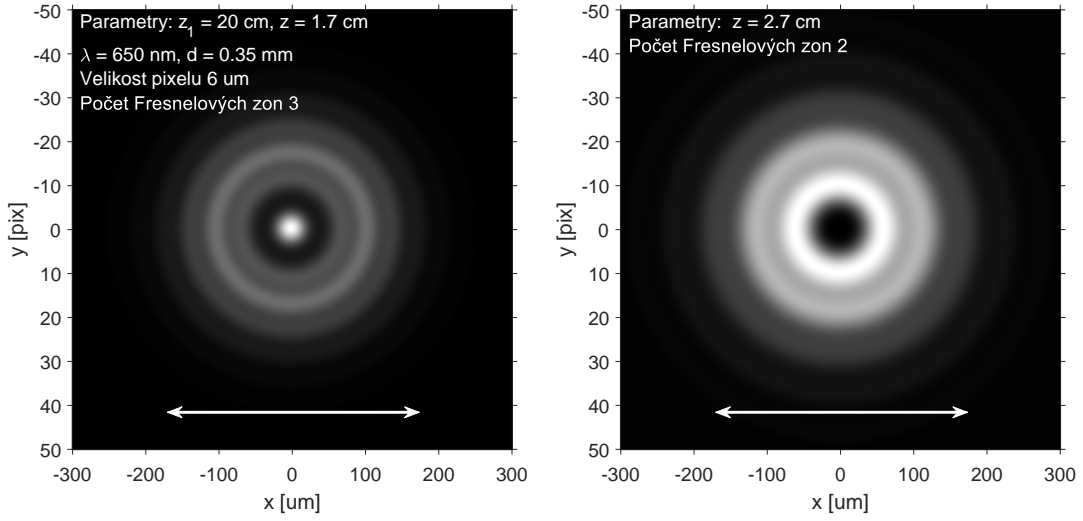
$$u = k \left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z} \right) \left(\frac{d}{2} \right)^2 \quad (17)$$

$$v = \frac{k d \rho}{2z}, \quad (18)$$

kde $U_1(u, v), U_2(u, v)$ jsou Lommelovy funkce, k je vlnové číslo a ρ je vzdálenost vyznačená na obrázku 16. Stínový obrazec v rovinně pozorování má kruhovou symetrii a intenzita záření závisí pouze na vzdálenosti ρ a nikoliv na úhlu ϕ . Pro výpočet teoretického stínového obrazce stačí vyčíslit rovnici 16 pro různé hodnoty ρ a pomocí look-up tabulky vyhledat hodnoty intenzity pro celý dvourozměrný definiční obor.

Na obrázku 17 jsou vidět dva speciální případy stínového obrazce. Průměr apertury $d = 0.35$ mm odpovídá té, která byla použita v experimentální části. Výpočet stínových obrazců se liší ve vzdálenosti roviny pozorování od stínítka (v levé části $z = 1.7$ mm, v pravé části $z = 2.7$ mm). Pro názornost jsou jednotky vzdálenosti na ose x v μm a na ose y v násobcích velikosti pixelu $1 \text{ pix} = 6 \mu\text{m}$. Bílá šipka znázorňuje průměr apertury.

Intenzita záření na středu difrakčního obrazce v levé části je čtyřnásobná oproti případu, kdy by mezi bodovým zdrojem a rovinou pozorování žádné stínítko nebylo. Naproti tomu intenzita na středu difrakčního obrazce v pravé části má nulovou hodnotu.



(a) Tři Fresnelovy zóny

(b) Dvě Fresnelovy zóny

Obrázek 17: Difrakce na kruhové apertuře

Metoda, která bude v této práci použita pro hledání středu difrakčního obrazce, spočívá v proložení centrálního maxima vhodnou funkcí. Z tohoto důvodu je nutné prozkoumat vliv vzdáleností z, z_1 na tvar difrakčního obrazce v okolí jeho středu. Pojem Fresnelova zóna má geometrický význam, který zde nebude uveden (detaily je možné nalézt v [3]). Vystačíme si s tvrzením, že počet Fresnelových zón, které kruhová apertura v nepropustném stínítku propustí, ovlivňuje intenzitu na středu difrakčního obrazce. Pokud je počet Fresnelových zón sudý, bude intenzita na středu nulová. Pokud je počet lichý, bude rovna čtyřnásobku intenzity nerušené vlny (vlna bez přítomnosti stínítka). Pro neceločíselný násobek Fresnelových zón se intenzita na středu difrakčního obrazce pohybuje mezi předchozími dvěma případy.

Počet zón, které apertura o průměru d propustí, je dán vztahem

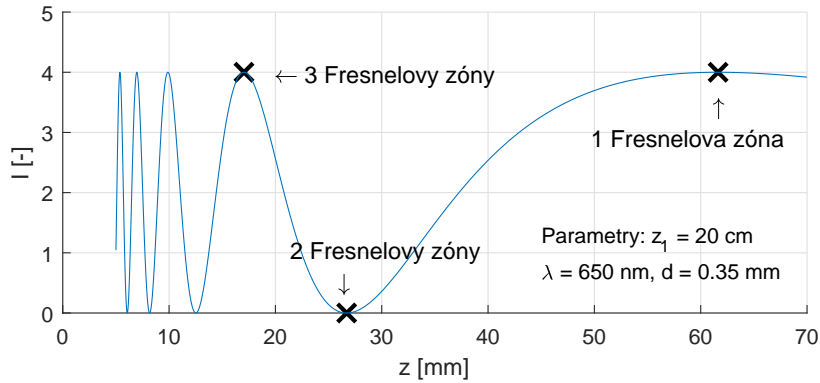
$$N = \frac{kd^2}{8\pi} \left(\frac{1}{z} + \frac{1}{z_1} \right) \quad (19)$$

Intenzitu záření pro speciální případ bodů na ose apertury je možné vyjádřit s pomocí elementární funkce

$$I(\rho = 0, z) = 4 \sin \left(\frac{u}{4} \right)^2 [3] \quad (20)$$

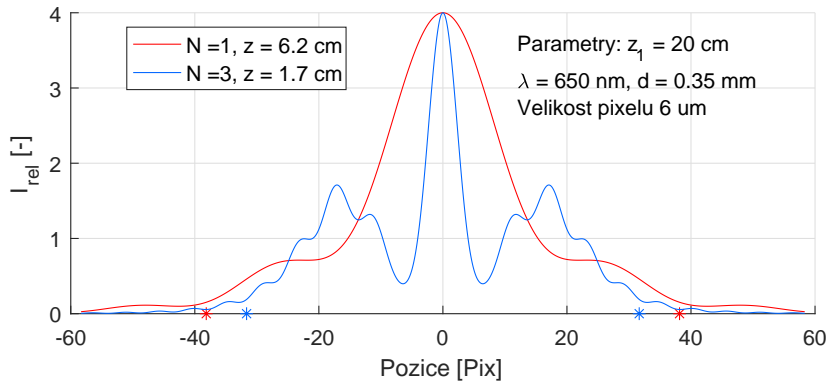
Na obrázku 18 je vidět intenzita na středu difrakčního obrazce v závislosti na vzdálenosti roviny pozorování od stínítka. Křížkem vyznačené vzdálenosti z , které odpovídají dvěma a třem Fresnelovým zónám korespondují s předchozím obrázkem 17. S klesající vzdáleností roviny pozorování od stínítka se oscilace stále

zhušťují. Maximum, které odpovídá jedné Fresnelově zóně, je maximum poslední. Dalším vzdalováním roviny pozorování od stínítka difrakční obrazec začíná připomínat dobře známý Airyho disk, tedy řešení pro Fraunhoferovu difrakci ve vzdálené oblasti.



Obrázek 18: Průběh relativní intenzity ve středu difrakčního obrazce

Obrázek 19 ukazuje řez grafem relativní intenzity, který protíná střed difrakčního obrazce. Graf je vykreslen pro dvě vzdálenosti z , které odpovídají jedné a třem Fresnelovým zónám. Rovněž je zde vyznačena poloha geometrického stínu, což je vzdálenost, kde by se nacházel ostrý přechod intenzity, kdyby nedocházelo k ohybovým jevům.



Obrázek 19: Průběh relativní intenzity v řezu přes střed difrakčního obrazce

V diplomové práci [2] byly vyzkoušeny metody proložení centrálního maxima polynomem 2. a 4. řádu a Gaussovou funkcí dvou proměnných. Poslední metoda vracela nejlepší výsledky a bude použita a dále rozpracována i v této práci. Obdobně by šlo prokládat okolí centrálního minima, které odpovídá například dvěma Fresnelovým zónám. Průběh funkce je ovšem v okolí středu sploštělý a funkce se nepodobá žádné autorovi známé elementární funkci. Nastavení vzdáleností z, z_1

do polohy, která odpovídá neceločíselným násobkům počtu Fresnelových zón, nepřináší z pohledu interpolace žádné výhody a je třeba se mu naopak vyhnout.

Aby interpolace v okolí středu vracela použitelné výsledky, je třeba, aby byl stínový obrazec dostatečně navzorkovaný. V úvahu přicházejí všechny konfigurace s lichým počtem Fresnelových zón. Konkrétní volba závisí na velikosti pixelu, průměru apertury a požadavcích na kompaktnost měřícího přístroje, s kterou souvisí vzdálenosti z, z_1 .

Pro experimentální vybavení, které bylo v této práci použito (senzor s velikostí pixelu $6 \mu\text{m}$, apertura o průměru $d = 0.35 \text{ mm}$) se jako nejvhodnější volba jeví konfigurace, která odpovídá třem Fresnelovým zónám. Tabulka 20 zobrazuje možná uspořádání, které tuto podmínku splňují. Senzor je třeba za stínítkem umístit s poměrně velkou přesností. Přiblížení senzoru o 5.5 mm blíže ke stínítku způsobí, že apertura propustí 4 Fresnelovy zóny a na středu stínového obrazce se bude nacházet minimum (platí pro $z_1 = 20 \text{ cm}$).

Z pohledu kompaktnosti měřícího přístroje by bylo nejlepší volit poslední variantu v tabulce 20. Situaci ovšem komplikuje fakt, že jako zdroj záření je v experimentální části použita laserová dioda, která není dokonalým bodovým zdrojem, ale má konečnou plochu a směrovou charakteristiku. Aby se skutečný zdroj záření blížil bodovému je třeba ho umístit co nejdále od stínítka.

Pro experimentální ověření metody hledání středu stínového obrazce nejsou rozměry aparatury tak zásadní, a proto byla zvolena varianta se $z_1 = 20 \text{ cm}$. Šířka centrálního maxima odpovídá přibližně 25% průměru apertury. Šířka centrálního maxima byla odečtena z grafu jako vzdálenost sousedních minim. Okolí maxima pro interpolaci je vhodné zvolit menší, konkrétně přes interval 9×9 pixelů.

z_1 [cm]	z [cm]	Šířka centrálního maxima [pix]
20	1,7	12,7
15	1,8	13,0
10	1,9	13,6
5	2,3	17,0

Velikost pixelu	$6 \mu\text{m}$
d	$0,35 \text{ mm}$

Obrázek 20: Šířka centrálního maxima pro případ tří Fresnelových zón

2.4.1 Algoritmus pro hledání středu stínového obrazce

V obrazových datech je nejprve nutné nalézt přibližnou polohu středu stínového obrazce \hat{x}_1, \hat{y}_1 . Okolo tohoto odhadu se vezme čtvercové okolí o velikost 9×9 pixelů a proloží se vhodnou funkcí.

Přibližnou polohu středu je možné nalézt zjednodušeným výpočtem těžiště prahovaného obrazu. Doba expozice a zesílení AD převodníku na senzoru jsou nastaveny tak, aby výstupní signál pro střed difrakčního obrazce byl těsně pod hranicí saturace. Prahovací úroveň je pak možné nastavit na polovinu rozsahu

výstupního signálu (hodnota 128). Výstupní signál senzoru je větší než prahová úroveň pouze v okolí centrálního maxima viz obrázek 19. Těžiště se počítá jako

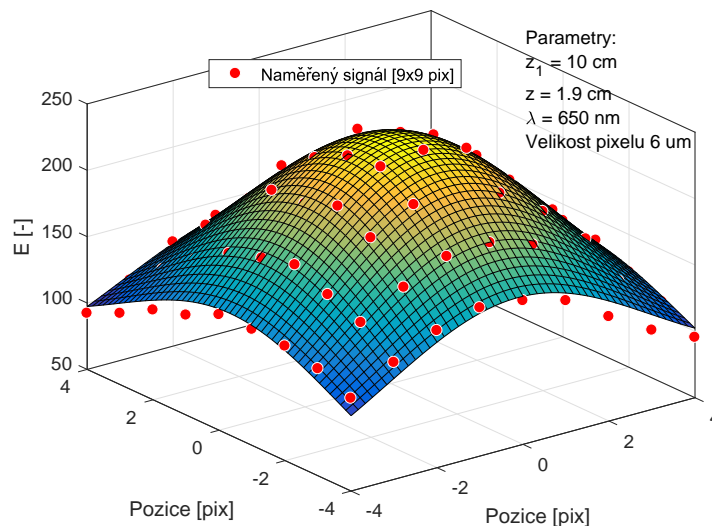
$$\hat{x}_1 = \frac{1}{M} \sum_x \sum_y x, \quad (21)$$

kde M je počet pixelů, jejichž hodnota je větší než daný práh a x je sloupcová souřadnice pixelu (výpočet \hat{y}_1 je analogický)

V okolí bodu \hat{x}_1, \hat{y}_1 o velikosti 9x9 pixelů je signál proložen Gaussovou funkcí.

$$f(x, y) = a \exp \left(- \left(\frac{(x - x_1)^2}{q^2} + \frac{(y - y_1)^2}{q^2} \right) \right) + c \quad [2] \quad (22)$$

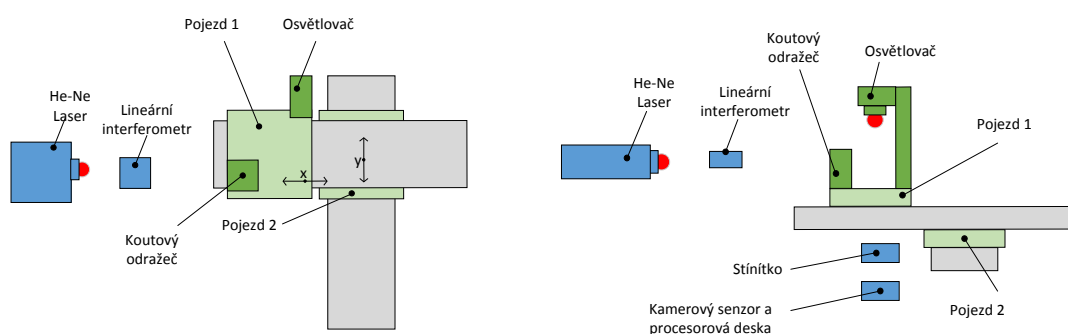
Výsledkem proložení je vektor parametrů $[x_1, y_1, a, q, c]$, který obsahuje hledané souřadnice středu stínového obrazce. Aproximace byla vypočítána v programu Matlab s pomocí funkce *fit*, která využívá metodu nelineárních nejmenších čtverců. Pro rychlou konvergenci je dobré uvést počáteční podmínky, které jsou blízko očekávanému řešení $a = 177, c = 62, q_1 = 4, x_0 = 0, y_0 = 0$. Výpočet je zastaven, jakmile je změna reziduí ve dvou po sobě jdoucích iteracích menší než stanovená mez. Pro toleranci $1 \cdot 10^{-6}$ algoritmus skončí po sedmi iteracích. Pokud je rozdíl původního odhadu polohy středu metodou těžiště a metodou proložení větší než 0.5 pixelu v alespoň jedné ze souřadnic, považuje se původní odhad za nedostačující a algoritmus proložení se zopakuje na novém okolí.



Obrázek 21: Interpolace centrálního maxima na naměřených datech

3 Experimentální uspořádání

Navržené metody měření polohy byly experimentálně ověřeny na polohovacím zařízení, jejímž základem jsou dva lineární a navzájem kolmé pojezdy M-511.DD od firmy Physik Instrumente [7]. Každý z nich je řízen DC motor controllerem C-863 [8] od téže firmy. Osvětlovač tvořený třemi laserovými diodami svítí na stínítko, pod kterým se nachází kamerový senzor a procesorová deska. Stínítko je polohováno v osách X a Y. Pro referenční odměřování polohy v jedné ose se využívá laserový interferometr XL-80 [9] od firmy Renishaw. Všechny části měřicího systému jsou připevněny na hliníkových profilech od firmy MayTec a to způsobem, který se snaží o velkou tuhost celé soustavy. Pohyblivé části měřicího systému jsou na obrázku 22 zvýrazněny zelenou barvou.



Obrázek 22: Schématický diagram měřicího systému pro určování polohy pojezdů

Základní prvky měřicího systému jsou

- Lineární pojezdy a motor controller
- Stínítko
- Osvětlovač - laserové diody
- Procesorová deska s kamerovým senzorem
- Laserový interferometr
- PC a měřící software

3.1 Lineární pojezdy a motor controller

Pojezdy jsou poháněny DC motorem s PWM regulací. Jsou vybaveny lineárním optickým enkodérem s rozlišením 100 nm, který je umístěn podél kuličkového šroubu.

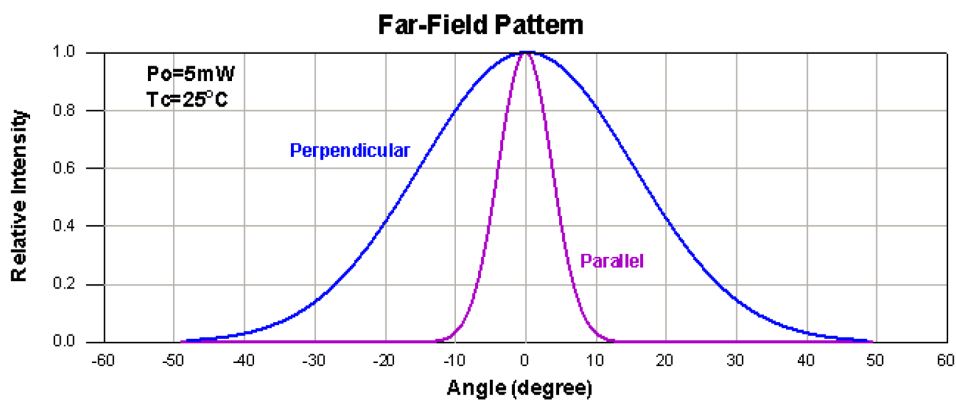
Rozlišení inkrementálního senzoru	100 nm
Maximální chyba polohování	$\pm 1 \mu\text{m}$
Rozsah polohování	102 mm

S motor controllerem se komunikuje prostřednictvím sériové linky s pomocí tzv. nativních příkazů. Jednotlivé motor controllery je možné propojit v topologii daisy-chain. PC poté komunikuje s pomocí jedné sériové linky a adresuje konkrétní zařízení. Na obou koncích pojezdů se nachází dva limitní senzory, které zabraňují poškození. První z nich je Hallův senzor, který posílá controlleru logický signál pro vypnutí motorů. Druhý limitní senzor (ten, který je blíže okraji pracovního rozsahu) je relé, které vypíná proud do motoru. Pro bezpečné fungování je třeba nastavit na DIP přepínači motor controlleru správnou polaritu pro Hallův limitní senzor, který je active-high. Vnější limitní spínač je pouze poslední záchranná brzda. Z této polohy se pojezd musí odsunout manuálně, když je motor vypnutý.

Pro měření absolutní polohy inkrementálním snímačem je potřeba, aby pojezd našel referenční značku, která se nachází přibližně v polovině rozsahu pojezdu. Tuto značku je možné nalézt s opakovatelností $0.5 \mu\text{m}$, pokud pojezd najíždí ze stejné strany. Toho se využívá pro přibližné umístění stínové značky na kamerový senzor.

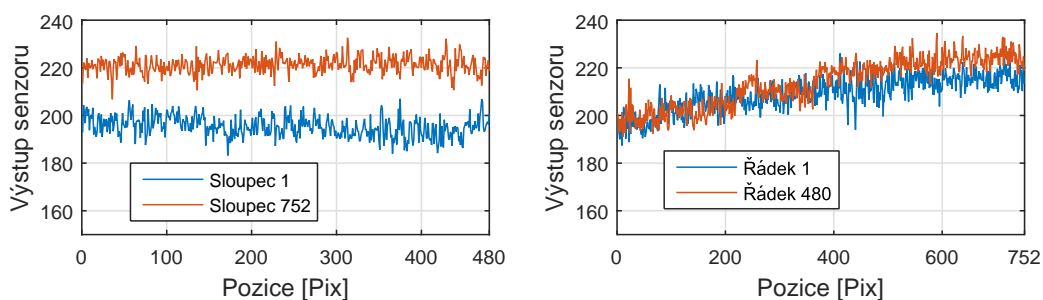
3.2 Osvětlovač

Pro osvětlení jsou použity laserové diody umístěné na plošném spoji, který byl navržen v rámci diplomové práce [2]. Diody jsou umístěny v jedné ose. Vzdálenost mezi sousedními diodami činí 14 mm. Světelný tok každé laserové diody je regulován zpětnovazebním obvodem, který využívá signál na integrované fotodiodě. Laserové diody L-SLD6505 mají nesymetrickou vyzářovací charakteristiku.



Obrázek 23: Směrová charakteristika laseru [10]

Na obrázku 24 (oba grafy jsou podseknuuty pro zvýraznění) je vidět, že výstup senzoru, který je úměrný intenzitě ozáření, v řádku má výrazný trend. To je způsobeno tím, že řádek je umístěn ve směru paralelním vůči laserové diodě, kde je svazek užší.



Obrázek 24: Výstupní signál pro nezastíněný senzor

Nehomogenitu intenzity ozáření je možné korigovat s pomocí referenčního snímku. Normováním obrazového signálu se docílí stejné zesílení v celé ploše senzoru.

$$O(x, y) = \frac{I(x, y)\overline{R(x, y)}}{R(x, y)}, \quad (23)$$

kde $O(x, y)$ jsou obrazová data po korekci, $I(x, y)$ jsou vstupní obrazová data, $R(x, y)$ je referenční snímek a $\overline{R(x, y)}$ je průměrná hodnota referenčního snímku. Pro omezení šumu se referenční snímek vypočítal jako průměr ze sta snímků. Tato korekce byla provedena u všech následujících měření.

3.3 Kamerový senzor

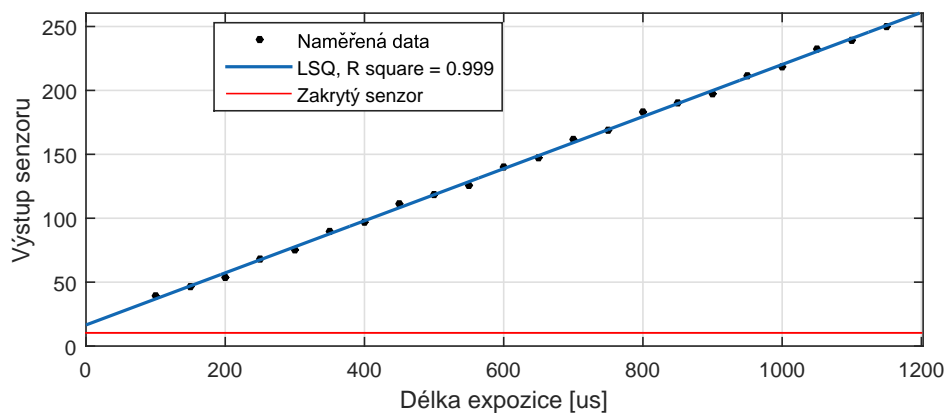
Jako senzor byla použita kamera MT9V034 se standardizovaným konektorem, používaným v Laboratoři videometrie.

Rozlišení	752 x 480
Max rychlost čtení	27 MHz
Typ	Global shutter, monochromatická
Aktivní plocha	4.51mm(H) x 2.88mm(V)
Rozlišení AD převodníku	10-bit paralelně na každém sloupci
Dynamický rozsah	55dB lineární

Tabulka 1: Parametry kamery

Linearita převodní charakteristiky kamery byla ověřena experimentem, při kterém se měnila délka expozice při konstantní intenzitě ozáření. Pro každý bod v charakteristice byl vypočítán průměr z 15 snímků a výsledek byl normován referenčním snímkem, který kompenzuje nesejnoměrné ozáření senzoru. Na ose y je průměrná hodnota výstupního signálu přes všechny pixely. Směrodatná odchylka vypočtená opět přes všechny pixely nepřesahuje hodnotu 4,7. Červený průběh znázorňuje ofset senzoru, který je způsoben temnými proudy. Měření ofsetu probíhalo na zakrytém senzoru. Jeho hodnota je nezávislá na délce expozice a je rovna 10,2.

Závěrem je možné říci, že převodní charakteristika kamery je přibližně lineární a hodnota intenzity světla pro dané doby expozice výrazně nekolísá.



Obrázek 25: Převodní charakteristika senzoru

Šum senzoru Výstup senzoru je zatížen šumem, který může vznikat z těchto zdrojů

- Fotonový šum
- Tepelný šum (náboj generovaný za tmy)
- Šum zesilovače AD převodníku

Předpokládá se, že tyto zdroje jsou vzájemně nekorelované a jejich celkový vliv na výstup je dán odmocninou z kvadrátů jednotlivých složek.

3.4 Procesorová deska

Pro účel vyčítání obrazových dat do PC byl v rámci této diplomové práce navržen dvouvrstvý plošný spoj s mikrokontrolérem STM32F765VI, který se pomocí 30pinového konektoru připojí k sensorové desce. Komunikace s PC je zajištěna

přes USB periférii. Snahou bylo vytvořit univerzální plošný spoj pro vhodný pro úlohy zpracování obrazu např. v laboratorních úlohách. Jako prototyp byly vyrobeny dvě desky. Po osazení a testování byly vyrobeny další čtyři. Plošný spoj byl navržen v programu OrCAD Capture. Návrh byl před odesláním do výroby panelizován v programu CAM350.

Následující odstavce jsou psány formou komentáře k jednotlivým logickým celkům plošného spoje. Schémata v tomto členění je možné nalézt v příloze 5.

Mikrokontrolér a napájení Plošný spoj je možné napájet z 5 V z každého ze dvou USB konektorů nebo z napájecího konektoru (3,5 mm/1,4 mm). Všechny tři zdroje jsou odděleny ochrannými Schottkyho diodami. Na plošném spoji jsou dva lineární regulátory s výstupem 3,3 V a 1,8 V. Externí fyzická vrstva pro USB HS vyžaduje obě tyto napětí. Kamerový senzor a MCU pracují s napětím 3,3 V. Hodinový signál pro MCU, USB PHY i kamerový senzor zajišťuje MEMS oscilátor 26 MHz. Hodinový signál pro senzor lze alternativně budit časovačem TIM3 ch1 (PB4). Důvodem k tomu může být potřeba zpomalit datový tok při průběžném zpracování obrazových dat. K přepnutí je nutné nastavit jumper J4.

Na kolíkovou lištu byly vyvedeny signály

- pro debugování (SWDIO, SWCLK, NRST)
- I2C + jeden GPIO (PD14)
- BOOT0
- 3.3V a GND

Připojením pinu BOOT0 na zem je možné procesor dostat do boot módu, který umožňuje nahrát firmware přes některou z periférii bez nutnosti použití speciálního programátoru tzv. IAP (In application programming). Jedinou možností pro tento plošný spoj je programování přes USB FS. Firma STMicroelectronics poskytuje k tomuto účelu PC aplikaci *DfuSe USB device firmware upgrade*. Piny pro I2C spolu s pinem PD14 byly při měření konfigurovány jako output a byly jimi řízeny laserové diody osvětlovače. Na plošném spoji jsou dále tlačítka pro reset a jedno USER tlačítko.

Ačkoliv v této práci bylo zpracování měřených dat provedeno v PC, výkon použitého mikrokontroléru umožňuje implementaci i relativně pokročilých algoritmů zpracování obrazu.

- 32-bit Cortex®-M7 CPU
- 216 MHz
- Flash 2048 KB
- RAM 512 KB

USB Pro komunikaci s PC mikrokontrolér využívá USB FS a USB HS periférii. Každá má svůj samostatný USB mini konektor. USB HS vyžaduje externí fyzickou vrstvu, kterou je součástka od firmy Microchip USB3320. Komunikace mezi fyzickou vrstvou a STM32 probíhá prostřednictvím ULPI sběrnici (8 datových a 4 řídicí signály). Druhý konektor pro USB FS byl na plošný spoj přidán z obavy, že nastane chyba v návrhu, což se nakonec nestalo.

Mikrokontrolér se k PC hlásí jako virtuální COM port. Rychlost přenosu dat pro USB FS dosahuje 750 KB/s, což přibližně odpovídá dvěma přeneseným snímkům v 8bitovém rozlišení za sekundu. Tato rychlost je velmi blízko hranici možností (teoretický throughput je 1,5 MB/s). Datový tok pro USB HS dosahuje rychlosti 5 MB/s, což odpovídá 14 snímkům za sekundu (teoretický throughput USB HS je 480 MB/s).

Senzor je schopný dodávat 60 snímků za sekundu v plném rozlišení, což při 8bitovém rozlišení na výstupu odpovídá datovému toku 21,6 MB/s. Nevyřešenou otázkou zůstává, zda je možné tyto data přenášet v reálném čase do PC. Použitý mikrokontrolér s frekvencí hodinového signálu 216 MHz toho schopen je. Přenos obrazových dat z DCMI periferie do RAM a dále pak z RAM do USB HS periferie je možné zprostředkovat pomocí DMA double buffer přenosů. Výrobce mikrokontroléru uvádí [11], že doba přenosu jednoho 32bitového slova z periferie do RAM i opačným směrem trvá 8 hodinových cyklů.

Maximální datový tok pro přenos dat z DCMI periferie do USB HS periferie je tedy

$$\text{Datovy tok}_{max} = \frac{4 \cdot 216 \text{ MHz}}{2 \cdot 8} = 54 \text{ MB/s} \quad (24)$$

Nižší rychlost je pravděpodobně způsobena ovladačem pro Windows (Usbser.sys, ovladač od firmy Microsoft pro USB zařízení s třídu CDC - communication device class), nebo samotnou aplikací, která data nestíhá vyčítat dostatečně rychle. Testování rychlosti bylo vyzkoušeno s programem Matlab a Hyperterminal se stejnými výsledky.

Připojení k senzoru Senzorová deska se k plošnému spoji připojuje s pomocí dvouřadého 30pinového konektoru. Senzor je možné využívat v 8 i 10bitovém rozlišení na výstupu. Přepínání mezi těmito módy vyžaduje propojení příslušných jumperů na konektoru J1 a rekonfiguraci DCMI periferie a DMA řadiče. K registrům senzoru se přistupuje přes I2C.

Kamerový senzor má vstup EXPOSURE, kterým je možné spouštět začátek expozice v tzv. Snapshot módu. Tento vstup byl připojen k časovači mikrokontroléru TIM1 ch3 (PA10), který ho může budit v pravidelných časových intervalech. V některých aplikacích je třeba sejmout obraz v reakci na vnější událost. Pro tyto případy je možné konfigurovat pin PA10 jako output, jehož výstup je nastaven v přerušení vyvolaném příslušnou událostí. Délku expozice je předem nutné nastavit do registrů kamery.

Přenos dat z DCMi periferie do RAM je řízen DMA řadičem v double buffer módu. Při zaplnění polovinu bufferu se vyvolá přerušení, které nastaví příznak. Data jsou pak přesouvána v hlavní programové smyčce do vstupního bufferu USB FS resp. USB HS periferie.

Obraz v plném rozlišení 752x480 pixelů v 8bitovém rozlišení na výstupu má velikost 360 KB a vejde se celý do interní RAM mikrokontroléru. Pro 10bitové rozlišení výstupního signálu je nutné velikost obrazu omezit, protože fyzická vrstva DCMi (Digital camera interface) vměstná do 32bitového vstupního registru výstupní signál pouze dvou pixelů. Velikost obrazu je možné omezit vyříznutím tzv. ROI (Region of interest). ROI lze nastavit buď konfigurací registrů senzoru, nebo konfigurací samotné DCMi periferie na MCU, která je schopná ignorovat výstupní signál senzoru mimo vymezenou oblast. Druhá možnost pro omezení velikosti obrazu je funkce binning, která průměruje hodnoty dvou nebo čtyřech sousedních pixelů v řádku, sloupci nebo obojí najednou. Senzor má AD převodníky na každém sloupci. Průměrování sousedních pixelů ve sloupci probíhá v nábojové doméně (frekvence snímků se zvýší, protože velikost obrazu je menší). Průměrování sousedních pixelů v řádku je na senzoru implementováno výpočtem v digitální doméně (frekvence snímků zůstává stejná, kvůli režii na výpočet průměrné hodnoty).

Návrh firmwaru a softwaru Autor této práce upravil a sjednotil knihovnu pro konfiguraci CMOS senzoru (původní autor Tomáš Novák), která spočívala v přepsání stávajícího kódu pro novou knihovnu HAL (hardware abstraction layer) od firmy STM. Knihovnu pro CMOS senzor je nyní možné zkompileovat pro libovolný procesor z rodiny F4 a F7. Dále byly přidány a upraveny některé funkce pro konfiguraci senzoru. Odlišnosti v nastavení senzorů firmy ON Semiconductor (MT9V034 a MT9V032) byly ošetřeny podmíněným překladem. Celá konfigurace senzoru byla zapouzdřena do struktury, což usnadňuje zejména změny parametrů senzoru za běhu v tzv. Live Debug módu.

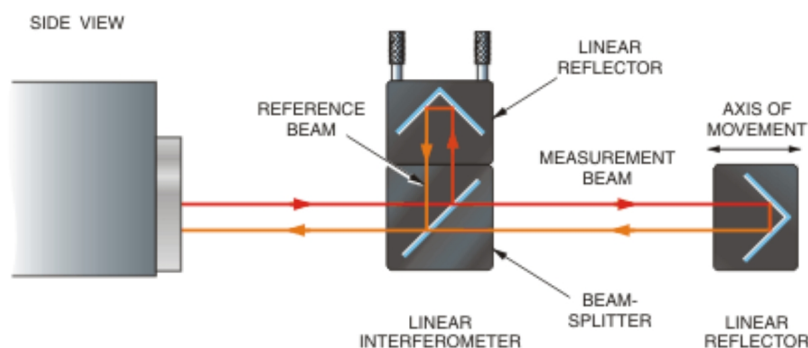
V minulosti byly v Laboratoři videometrie navrženy tři interface desky (autoři jsou Ing. Vojtěch Dokoupil a Ing. Jiří Hladík), které fungují jako mezičlánek mezi senzorovou deskou a testovacími deskami od firmy STMicroelectronics. Konkrétně se jedná o Discovery kity s procesorem

- STM32F407
- STM32F429
- STM32F746

Pro každou z těchto hardwarových variant byly připraveny jednoduché Template projekty v programu IAR Embedded Workbench spolu se skripty v programu Matlab, které umožňují s minimálním úsilím přenést obrazová data do PC.

3.5 Laserový interferometr

Pro ověření přesnosti polohovacího zařízení byl použit laserový interferometr Renishaw XL-80. Tento přístroj se skládá ze čtyřech komponent, frekvenčně stabilizovaný helium-neonový laser, detektor intenzity záření, lineární interferometr (polopropustné polarizační zrcadlo s koutovým odražečem) a koutový odražeč. Přístroj měří relativní vzdálenost mezi lineárním interferometrem a koutovým odražečem, přesněji řečeno změnu jejich optické dráhy, přičemž vzdálenost laseru od obou prvků přímo měření neovlivňuje. Změna vzdálenosti o polovinu vlnové délky způsobí (geometrická dráha paprsku je dvojnásobná), že detektor intenzity světla zaznamená právě jednu periodu cyklu mezi konstruktivní a destruktivní interferencí. Vyššího rozlišení než je polovina vlnové délky světla přístroj dosahuje interpolací.



Obrázek 26: Princip měření [9]

Největší zdroj nejistoty měření způsobuje závislost vlnové délky na atmosférických podmínkách, v kterých se světlo šíří. Jedná se hlavně o tlak, teplotu a vlhkost vzduchu. Tento vliv je možné korigovat s pomocí kompenzační jednotky, která ovšem v Laboratoři videometrie není k dispozici. Výrobce přístroje firma Renishaw uvádí [12], že chyba bez kompenzační jednotky 20 ppm je běžná i za relativně stabilních podmínek. Konkurenční přístroj od firmy Agilent [13] uvádí příspěvek environmentálních vlivů na celkovou přesnost měření a zároveň opakovatelnost v horizontu jedné hodiny ± 9 ppm. Při použití environmentální kompenzační jednotky je třeba brát v úvahu i další zdroje chyb jako je chyba způsobená teplotní roztažností materiálů, frekvenční stabilita laseru, kosinová chyba, Abbého chyba a další, které jsou však řádově menší.

Na měřící soustavě je lineární interferometr připevněn k nepohyblivé části konstrukce a polohováno je s koutovým odražečem. Vzdálenost těchto prvků je 10 cm, což podle optimističtějšího vzorce vede na chybu měření $1 \mu\text{m}$. K měření se využívá software Renishaw LaserXL (měření předem definovaných pozic) a Renishaw QuickViewXL (obdoba osciloskopu). Před začátkem měření se příkazem *datum device* interferometr autokalibruje. Měřené hodnoty jsou pak relativní

Popis	Nativní příkaz
Proporcionální složka	DP60
Integrační složka	DI20
Derivační složka	DD0
Integrační limit	DL2000
Rychlost (3 cm/s)	SV300000
Zrychlení (2 cm/s ²)	SA200000

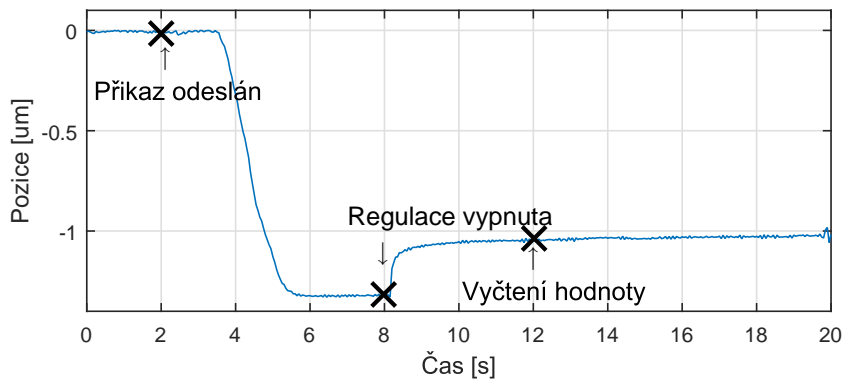
Tabulka 2: Nastavení regulátoru motorů

vzdálenosti vůči pozici, kde byl přístroj kalibrován. Měření je velmi náchylné na jakékoliv vibrace způsobené například od okolo jdoucí osoby. Exponenciální filtrování s časovou konstantou 20 ms je však dokáže výrazně potlačit. I když je soustava v klidu, měřená hodnota driftuje o přibližně 400 nm za 10 minut, což si vysvětlují právě změnou atmosférických podmínek během měření. Pro krátkodobá měření v řádu desítek sekund od kalibrace je však možné považovat hodnotu za přesnou.

Díky interferometru bylo možné najít vhodné parametry pro regulátor pojezdu shrnuté v tabulce 2. Integrační a proporcionální složka je na doporučené maximální hodnotě pro daný typ motoru, derivační složka je nulová.

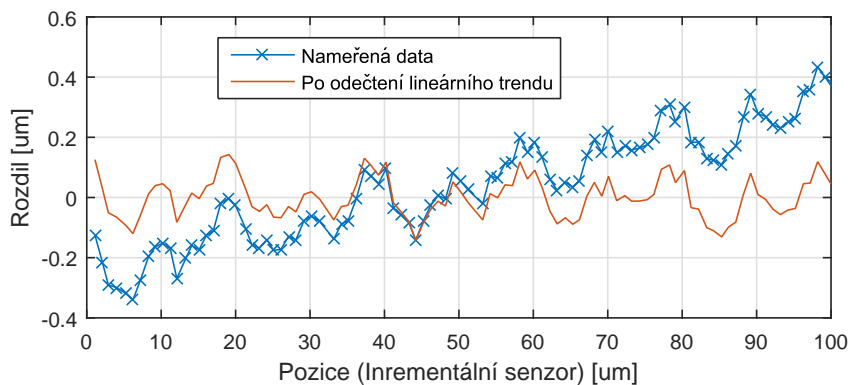
Integrační složka regulátoru ve většině případů dostane pozici do vzdálenosti 20 nm od cílové polohy. Trvá jí to, ale nezřídka déle než 20 s (pozice je po dlouhou dobu konstantní a pak dojde ke skokové změně). Taková doba je neúnosná z hlediska odběru velkého počtu vzorků. Navíc je nutné, aby hodnota z inkrementálního senzoru byla stabilní v okamžiku, kdy je odebírán snímek pro měření kamerou (měření polohy inkrementálním snímačem a kamerovým senzorem musí být synchronizované). Z tohoto důvodu je regulátor vypnut za dobu 6 s po zadání příkazu na změnu polohy.

Na obrázku 27 je vidět typický průběh nájezdu o 1 μm . V čase $t = 2$ s je regulátoru odeslána nová target pozice. V čase $t = 8$ s je regulátor vypnut. Vlivem mechanického pnutí občas dochází při vypnutí regulace ke skokové změně polohy, která nebývá větší než 0.5 μm . Pojezd je dotazován na polohu v čase $t = 12$ s, kdy je hodnota ustálená. Celý proces od zadání příkazu po ustálení a vyčtení polohy trvá 10 s.



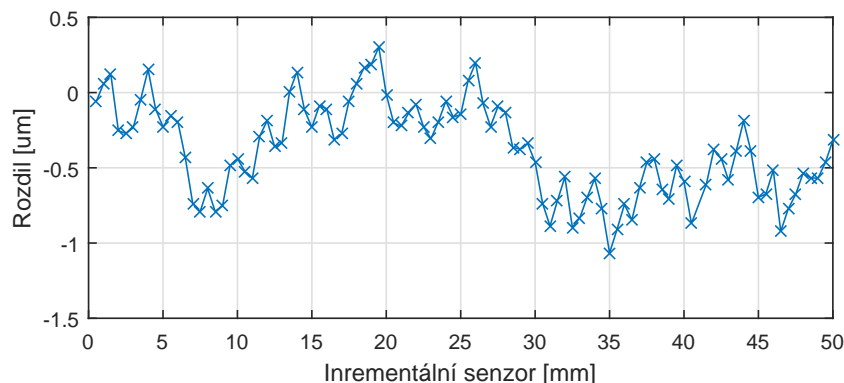
Obrázek 27: Poloha pojezdu při posunu o 1 μ m - měřeno interferometrem

Dále bylo provedeno měření, které srovnává výstup polohy z interferometru a inkrementálního snímače viz obrázek 28. Měření probíhalo ve sto pozicích s krokem 1 μ m a trvalo 16 minut. Přesný čas odběru vzorku z interferometru byl řízen s pomocí logického vstupu, který byl buzen regulátorem pohonu. Podle očekávání nevrací měření příliš pozitivní výsledky, protože měření trvalo příliš dlouho na to, aby byly zachovány stejné atmosférické podmínky. Lineární trend tohoto grafu odpovídá časovému driftu výstupu z interferometru. Po jeho odečtení se poloha pojezdu nachází méně než 200 nm od očekávané pozice.



Obrázek 28: Srovnání měřených hodnot - Interferometr vs. Inkrementální snímač

Stejně měření ale s krokem 500 μ m v rozsahu 50 mm je na obrázku 29. Zde již není vidět tak patrný lineární trend. Poloha pojezdu se nachází méně než 1 μ m od očekávané pozice. Závěrem je možné říci, že pro rozsah polohování (stovky μ m) je možné poloze pojezdu důvěřovat s tolerancí 200 nm. Pro větší rozsah polohování je nutné uvažovat toleranci 1 μ m, což je zároveň výrobcem uváděná maximální chyba pro celý rozsah.



Obrázek 29: Srovnání měřených hodnot - Interferometr vs. Inkrementální snímač

V následující kapitole budou představeny výsledky měření polohy stínového obrazce. Tato měření trvala v řádu hodin. Pro takto dlouhé časy se nelze spoléhat na data poskytnutá interferometrem, který je velmi náchylný na změnu environmentálních podmínek. Proto byla u těchto měření jako referenční hodnota polohy použita data z inkrementálního snímače pojezdu.

3.6 PC a měřící software

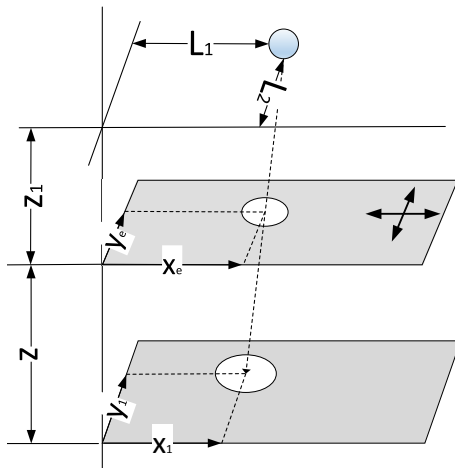
Počítač, který řídí celý měřící proces, musí vykonávat několik úloh. Implementovány byly v programu Matlab.

- Zadat regulátoru pohonu novou target pozici
- Po ustálení polohy, vyčíst údaje o poloze z inkrementálních snímačů
- Zapnout jednu ze tří laserových diod
- Vyčíst obrazová data ze senzoru (pro každou laserovou diodu zvlášť)

Všechna naměřená data spolu s parametry experimentu byla uložena do datové struktury pro pozdější zpracování. Některé náměry trvaly v řádu hodin a výsledné soubory mají velikost stovek MB. Při zpracování dat je nutné odstranit duplicity, které mohou vznikat například, když pojezd zůstane ve stejné pozici. To se děje zejména tehdy, když je polohovací krok velmi malý (stovky nm). Výhodou takto získaných dat je možnost zkusit a porovnávat výsledky pro různé metody interpolace a různá nastavení konkrétních algoritmů.

4 Experimentální ověření metod

Základní myšlenka měřicího přístroje je taková, že stínítko je připevněno k objektu, jehož polohu chceme měřit, zatímco bodový zdroj záření a senzor jsou nepohyblivé části. V tomto uspořádání bylo provedeno měření i v pracích [1] a [2].



Obrázek 30: Měření polohy projekční metodou na kruhové apertuře

Experimentální ověření nelinearity měření ovšem vyžaduje, aby poloha stínítka byla nastavitelná s přesností, která je řádově větší než přesnost určování polohy stínových obrazců. Příčinu je možné nahlédnout po dosazení typických vzdáleností jednotlivých komponent z tabulky 3 do rovnice 1, která je zde pro přehlednost zopakována. Koeficient před x_1 má pro konkrétní vzdálenosti z, z_1 hodnotu 0.95. Poloha stínové značky a stínítka se tedy mění ve stejném řádu.

$$x_e = \frac{z_1}{z + z_1} x_1 + \frac{z}{z + z_1} L$$

Při ověřování přesnosti polohování s pomocí interferometru byl učiněn závěr, že pro rozsah polohování (stovky μm) je možné poloze pojezdu důvěřovat s tolerancí 200 nm. Pro větší rozsah polohování je nutné uvažovat toleranci 1 μm . Poloha stínového obrazce se určuje na kamerovém senzoru s velikostí pixelu 6 μm . V teoretickém rozboru byl na základě simulací učiněn kvalifikovaný odhad, který

z	10 mm
z_1	200 mm

Tabulka 3: Typické hodnoty vzdáleností

předpovídá, že polohu stínového obrazce je možné určit s nejistotou přibližně 300 nm. Podmínka pro přesné referenční polohování tedy není splněna.

Z tohoto důvodu bude experiment upraven a bude polohováno zdrojem záření (L) namísto stínítkem (x_e). Měřenou veličinou je nyní poloha stínového obrazce x_1 .

$$x_1 = \frac{z + z_1}{z_1} x_e - \frac{z}{z_1} L \quad (25)$$

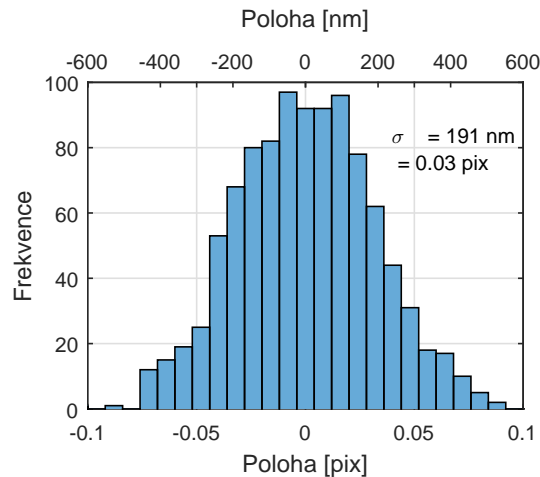
Opětovným dosazením typických vzdáleností do rovnice 25 vyjde směrnice 0.05. Vliv nejistoty při polohování je nyní 20x menší. V ideálním případě, kdy vzdálenosti z, z_1, x_e jsou konstantní v celém rozsahu měření, je nejistota měření polohy stínového obrazce dána (předpokládá se rovnoměrné rozdělení chyby polohování).

$$u_c(x_1) = \frac{\partial x_1}{\partial L} u_c(L) = \frac{1}{20} \frac{1 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 29 \text{ nm} \quad (26)$$

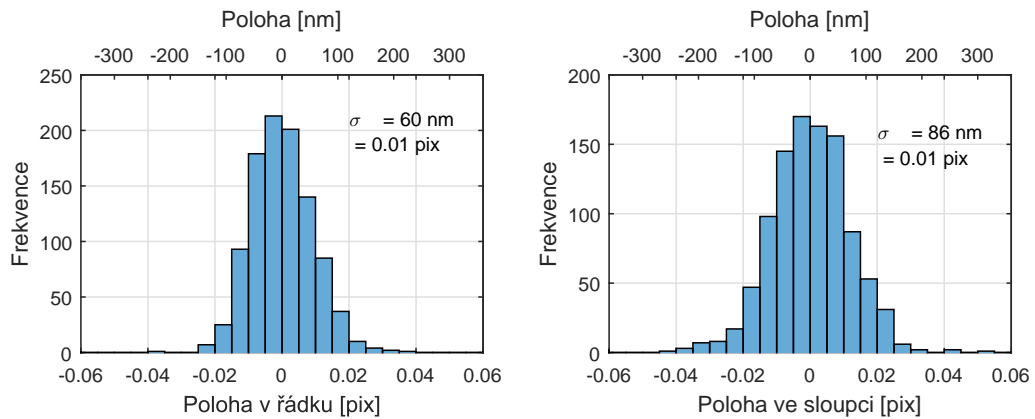
Vzdálenosti z, z_1 , které jsou vhodné pro měření polohy se stínítkem ve tvaru nepropustné poloroviny a kruhové apertury, byly podrobně diskutovány v teoretickém rozboru. Parametry měření jsou

- Kruhová apertura: $z_1 = 21 \text{ cm}, z = 21.8 \text{ mm}$ (tři Fresnelovy zóny)
- Nepropustná polorovina: $z_1 = 21 \text{ cm}, z = 2 \text{ mm}$

Opakovatelnost měření Při měření opakovatelnosti pro oba typy stínítek byla poloha změřena 1000krát a z výsledků byla odečtena průměrná hodnota. Porovnáním histogramů je možné vidět, že metoda pro kruhovou aperturu má přibližně 3krát menší náhodnou složku chyby.



Obrázek 31: Histogram odchylek polohy - nepropustná polorovina



Obrázek 32: Histogram odchylek polohy - kruhová apertura

Odchylka od linearity Měření bylo provedeno pouze v jedné ose, protože druhý pojezd nepracuje spolehlivě, kvůli vadnému interpolátoru v pojezdu. Polohováno bylo bodovým zdrojem záření tak, aby stínová stopa přejela přes 10 pixelů senzoru $\Delta x_1 = 10$ pix. Tomu odpovídá rozsah polohování bodového zdroje

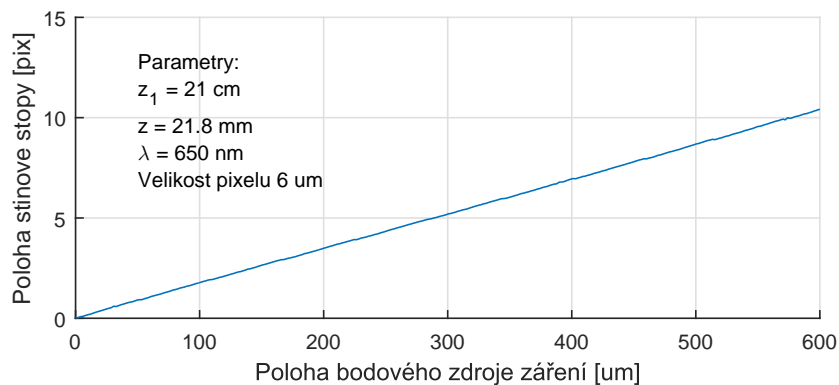
$$\Delta L = \frac{z_1}{z} \Delta x_1 = 600 \mu\text{m} \quad \text{apertura} \quad (27)$$

$$= 6.3 \text{ mm} \quad \text{polorovina} \quad (28)$$

Charakteristika byla měřena ve 400 bodech s ekvidistantním krokem. Měření trvalo 2 hodiny a 21 minut. Odchylka od linearity byla vypočtena jako odchylka od linearizované charakteristiky $f(x) = kx + q$, kde x jsou hodnoty polohy z inkrementálních snímačů. Linearizace byla vypočtena metodou nejmenších čtverců.

V grafu odchylek od nelinearity pro případ kruhové apertury je jasně patrná perioda jednoho pixelu. Důvodem je pravděpodobně

- Geometrie fotocitlivé části, která může mít nepravidelný tvar, protože část plochy pixelu zabírá tranzistor
- Nerovnoměrná citlivost na intenzitu záření v různých částech pixelu



Obrázek 33: Průběh polohy - kruhová apertura



Obrázek 34: Odchylka od linearity - kruhová apertura

Obdobné měření pro stínítko ve tvaru nepropustné poloroviny vrací výrazně horší výsledky. Odlišnost je dána podstatou těchto metod. Pro určení polohy geometrického stínu za nepropustnou polorovinou je třeba zjistit parametry (E_{HI} , E_{LO}), které velmi ovlivňují výsledek algoritmu. Metoda pro určování středu stínového obrazce za kruhovou aperturou spoléhá pouze na symetrii centrálního maxima a její použití je více přímočaré.

Dalším důvodem může být fakt, že algoritmus pro výpočet polohy geometrického stínu za nepropustnou polorovinou počítá s hodnotami 70 pixelů v řádku. Oproti tomu algoritmus pro výpočet polohy středu stínového obrazce za kruhovou aperturou si vystačí s okolím 9x9 pixelů. Při změně polohy bodového zdroje záření jsou pixely ozářeny v jiném úhlu, což s ohledem na směrovou vyzařovací charakteristiku laserové diody způsobí, že korekční obraz *flat-field* přestává být validní. Algoritmus, který pracuje na malém okolí, kde je intenzita relativně homogenní, má z tohoto pohledu výhodu.



Obrázek 35: Průběh polohy - nepropustná polorovina



Obrázek 36: Odchylka od linearity - nepropustná polorovina

4.1 Identifikace dalších zdrojů nelinearity

V ideálním případě jsou parametry z, z_1, x_e v rovnici 25 konstantní a mění se pouze poloha bodového zdroje záření L .

Ve skutečnosti je situace složitější. Vzdálenost z_1 se v závislosti na posunu bodového zdroje záření o ΔL může měnit kvůli

- Nedokonalé rovnoběžnosti roviny pojezdů a roviny senzoru
- Parazitnímu pohybu pojezdu ve směru normály

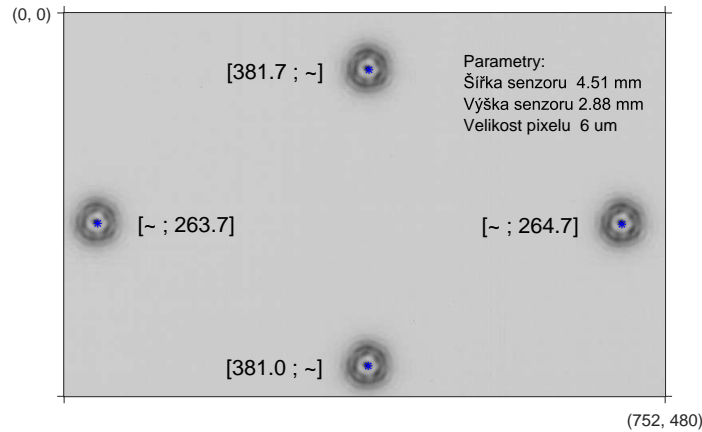
Pojezd deklaruje přímost a rovinnost $1 \mu\text{m}$ na 100mm . Tento člen je možné zanedbat. Při úhlové odchylce rovin o úhel α , je rozdíl v hodnotě z_1 v krajních bodech rozsahu $\Delta z_1 = \Delta L \tan(\alpha)$. Justování rovnoběžnosti bylo provedeno s pomocí vodováhy. Úhel α o velikosti 1° vede na $\Delta z_1 = 87 \mu\text{m}$.

Navíc se všechny tři hodnoty z_1, z, x_e mohou měnit kvůli teplotní roztažnosti materiálů. Profily, z kterých je aparatura sestavena jsou z hliníku (teplotní roztažnost $23.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), stínítka jsou z železa ($11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) a platinu ($9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Při změně teploty během měření o 1°C dojde ke změnám rozměrů o $\Delta z_{1_thermal} = 4.8 \mu\text{m}$, $\Delta z_{thermal} = 238 \text{ nm}$ a $\Delta x_{e_thermal} = 100 \text{ nm}$. Všechny tyto vlivy mohou způsobovat nelinearitu v naměřené charakteristice.

Kosinová chyba Kosinová chyba vzniká nerovnoběžností osy, ve které se pohybuje pojezd, a řádku nebo sloupce CMOS kamery. Tato chyba se do měření nelinearity nepromítá. Pro absolutní měření polohy je ovšem velmi důležitá, protože způsobuje systematickou chybu. Při měření ve dvou osách je možné se této chyby zcela zbavit s pomocí kalibrace.

Senzor se podařilo umístit tak, že úhlová odchylka je $\theta < 5''$. Náměr na obrázku 37 byl pro levou a pravou stínovou značku pořízen popojetím pouze jednoho z pojezdů, obdobně pro horní a dolní stínovou značku. Relativní chyba při měření absolutní polohy je

$$\text{err}_{\cos} = (1 - \cos(\theta)) \approx 0.9 \text{ ppm} \quad (29)$$



Obrázek 37: Polohy jasových značek v krajních bodech měřicího rozsahu

4.2 Návrh na další vývoj

Pro další vývoj by bylo zajímavé zjistit, jaký tvar má fotocitlivá část pixelu na použité kameře. Se znalostí tvaru pixelu a citlivosti v různých částech by šlo aplikovat korekce, které omezí nelinearitu metody. Pro srovnání by bylo vhodné vyzkoušet metody na senzoru s menší velikostí pixelu.

Zajímavou alternativou pro určení polohy stínového obrazce mohou být korelační metody. Maximum korelační funkce pro naměřený a teoretický průběh by mělo odpovídat středu difrakčního obrazce.

5 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a ověřit metodu optického měření polohy. Projekční metoda spočívá v osvětlení stínítka koherentním zdrojem záření a následnou detekcí polohy stínové stopy za stínítkem. Jako detektor intenzity záření byl použit plošný CMOS senzor.

V teoretickém rozboru byl uveden fyzikální popis tvorby stínových obrazců za překážkou pro dva typy stínítek (nepropustná polorovina a stínítko s kruhovou aperturou). Podrobně byl diskutován vliv geometrického uspořádání měřícího přístroje na tvar a velikost stínového obrazce. Dále byl pro oba typy stínítek představen algoritmus pro určení polohy stínového obrazce z naměřených dat. Celý měřicí řetězec byl nasimulován do velkých detailů, které zohledňují mimo jiné i přítomnost šumu a vzorkování intenzity záření s ohledem na konečnou velikost pixelu. S pomocí mnoha teoretických experimentů byl učiněn kvalifikovaný odhad pro přesnost obou metod.

Dále bylo popsáno experimentální uspořádání, které vychází ze dvou přesných lineárních pojezdů. S pomocí interferometru bylo pozorováno dynamické chování pojezdu při nájezdu do zadané pozice. Touto metodou se podařilo nalézt vhodné nastavení konstant PID regulátoru pohonu. Interferometrem byla rovněž ověřena přesnost polohování. Prostor byl věnován měření převodní charakteristiky senzoru. Pro osvětlovač byla představena metoda, která koriguje směrovou vyzařovací charakteristiku laserových diod. V rámci práce byl dále navržen plošný spoj, který vyčítá data za senzoru a odesílá je přes USB do počítače pro další zpracování.

V experimentální části bylo provedeno měření, které potvrdilo závěry z teoretického rozboru. Polohu stínového obrazce za nepropustnou polorovinou lze zjistit s přesností na $1\ \mu\text{m}$, což odpovídá $1/6$ velikosti pixelu. Směrodatná odchylka měření ve stejné poloze činí $191\ \text{nm}$. Pro případ nepropustného stínítka s kruhovou aperturou lze polohu určit s přesností na $200\ \text{nm}$ ($1/30$ velikosti pixelu). Směrodatná odchylka měření ve stejné poloze činí $86\ \text{nm}$.

Seznam symbolů a zkratk

x_1	Poloha geometrického stínu za nepropustnou polorovinou
x_e	Poloha stínítka (nepropustná polorovina)
z	Vzdálenost stínítka od senzoru
z_1	Vzdálenost bodového zdroje záření od stínítka
x_1, y_1	Souřadnice polohy stínového obrazce - kruhová apertura
x_e, y_e	Souřadnice polohy stínítka - kruhová apertura
d	Průměr kruhové apertury
$\psi(x, y, z)$	Vlnová funkce za stínítkem
$I(x, y, z)$	Relativní intenzita záření - vztažená k nerušené vlně
$\phi(x, y, z)$	Relativní fáze vlny - vztažená k nerušené vlně
$C(x), S(x)$	Fresnelovy integrály
k	Vlnové číslo
a	Vzdálenost poloroviny od počátku souřadnic
E	Výstup CMOS senzoru
b_1, b_2, b_3	Parametry algoritmu pro hledání polohy hrany
TL	Prahovací úroveň pro detekci polohy hrany
TL_a	Prvotní odhad prahovací úrovně pro detekci polohy hrany
\hat{x}_1	Prvotní odhad polohy geometrického stínu
d	Průměr kruhové apertury
N	Počet Fresnelových zón, které projdou kruhovou aperturou
$U_1(u, v), U_2(u, v)$	Lommelovy funkce
$V_0(u, v), V_1(u, v)$	Lommelovy funkce
$J_n(v)$	Besselova funkce prvního druhu, řádu n
MCU	Microcontroller unit
ROI	Region of interest
DCMI	Digital camera interface
RAM	Random-access memory
HAL	Hardware abstraction layer
CDC	USB communications device class
USB FS	Full Speed
USB HS	High Speed
IAP	In-Application Programming

Seznam obrázků

1	Měření polohy stínítka projekční metodou - nepropustná polorovina (podle [1])	5
2	Měření polohy projekční metodou na kruhové apertuře	6
3	Geometrické uspořádání pro pozorování Fraunhoferovy difrakce	8
4	Geometrické uspořádání při Fresnelově difrakci na kruhovém otvoru	9
5	Stínítka - nepropustná polorovina [3]	10
6	Průběh relativní intenzity záření za nepropustnou polorovinou	11
7	Závislost na vzdálenosti zdroje od stínítka	12
8	Závislost na vzdálenosti senzoru od stínítka	13
9	Význam parametrů pro algoritmus hledání hrany	14
10	Závislost průměrné hodnoty přes okno o velikosti 10 pixelů na vzdálenosti levé meze okna od geometrického stínu	16
11	16
12	Interpolaci hrany přímkou	18
13	Chyba interpolace v závislosti na vzájemné poloze senzoru a stínového obrazce	18
14	Histogram chyby interpolace za přítomnosti šumu	19
15	Parametry rozdělení chyby interpolace v závislosti na počtu vzorků hrany	20
16	Nepropustné stínítka s kruhovou aperturou	21
17	Difrakce na kruhové apertuře	22
18	Průběh relativní intenzity ve středu difrakčního obrazce	23
19	Průběh relativní intenzity v řezu přes střed difrakčního obrazce	23
20	Šířka centrálního maxima pro případ tří Fresnelových zón	24
21	Interpolace centrálního maxima na naměřených datech	25
22	Schématiký diagram měřícího systému pro určování polohy pojezdů	26
23	Směrová charakteristika laseru [10]	27
24	Výstupní signál pro nezastíněný senzor	28
25	Převodní charakteristika senzoru	29
26	Princip měření [9]	33
27	Poloha pojezdu při posunu o 1 μ m - měřeno interferometrem	35
28	Srovnání měřených hodnot - Interferometr vs. Inkrementální snímač	35
29	Srovnání měřených hodnot - Interferometr vs. Inkrementální snímač	36
30	Měření polohy projekční metodou na kruhové apertuře	37
31	Histogram odchylek polohy - nepropustná polorovina	38
32	Histogram odchylek polohy - kruhová apertura	39
33	Průběh polohy - kruhová apertura	40
34	Odchylka od linearity - kruhová apertura	40
35	Průběh polohy - nepropustná polorovina	41
36	Odchylka od linearity - nepropustná polorovina	41

37	Polohy jasových značek v krajních bodech měřícího rozsahu	42
38	Soupis materiálu pro plošný spoj	50
39	Osazovací výkres - TOP	51
40	Osazovací výkres - BOTTOM	51
41	Difrakční obrazec za nepropustnou polorovinou	56
42	Difrakční obrazec za nepropustnou polorovinou - řez	56
43	Difrakční obrazec za kruhovou aperturou	57
44	Difrakční obrazec za kruhovou aperturou - řez	57

Seznam tabulek

1	Parametry kamery	28
2	Nastavení regulátoru motorů	34
3	Typické hodnoty vzdáleností	37

Reference

- [1] Tomáš Radil Ph.D. Analysis and optimisation of the projection methods of dimension and position measurement, CVUT, Doctoral thesis, 2005.
- [2] Ing. Jiří Hladík. Průběžné zpracování obrazu v DSP pro sledování objektů, CVUT, Diplomová práce, 2015.
- [3] CSc. prof. RNDr. Jiří Komrška. Difrakce světla, 1999/2000. URL <http://physics.fme.vutbr.cz/~komrska/>.
- [4] Doc. Ing. Pavel Fiala. Základy fyzikální optiky, Praha, ČVUT, 1999.
- [5] Klaus D. Mielenz. Algorithms for fresnel diffraction at rectangular and circular apertures. In *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 1998. URL <http://www.nist.gov/jres>.
- [6] Methods of experimental physics laboratory - Diffraction by a Straight Edge, University of Minnesota. URL mxp.physics.umn.edu/resources/ExpWriteups/LabManDiff.pdf.
- [7] Physik Instrumente. High-precision linear translation stage M-511, . URL <https://www.physikinstrumente.com/en/products/linear-stages-and-actuators/stages-with-motor-screw-drives/m-511-m-521-m-531-high-precision-linear-translation-stage-702100/>.
- [8] Physik Instrumente. C-863 mercury servo controller, . URL <https://www.physikinstrumente.com/en/products/controllers-and-drivers/motion-controllers-for-motor-screw-drives/c-863-mercury-servo-controller-900606/>.
- [9] Renishaw. Xl-80 laser system, . URL <http://www.renishaw.com/en/xl-80-laser-system--8268>.
- [10] Union Optronics. Datasheet 650nm Red Laser Diode U-LD-650543A.
- [11] STMicroelectronics. AN4031 - Application note, Using the STM32F2, STM32F4 and STM32F7 Series DMA controller. URL www.st.com/resource/en/application_note/dm00046011.pdf.
- [12] Renishaw. Interferometry explained, . URL <http://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854>.
- [13] Agilent. Accuracy and repeatability. URL cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/05517-90141.pdf.

Příloha A: Speciální funkce pro výpočet difrakčních integrálů

Hlavním zdrojem informací v této příloze je [5]. Zde jsou shrnuty základní postupy pro výpočet speciálních funkcí, které byly použity v této práci.

Difrakce na nepropustné polorovině V řešení difrakčních integrálů pro stínítko ve tvaru nepropustné poloroviny se objevují Fresnelovy integrály.

$$C(x) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt$$
$$S(x) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt$$

Pro výpočet je možné využít aproximaci, jejíž chyba je menší než $\epsilon \leq 2 \cdot 10^{-3}$.

$$C(x) = \frac{1}{2} + f(x) \sin\left(\frac{\pi x^2}{2}\right) - g(x) \cos\left(\frac{\pi x^2}{2}\right)$$
$$S(x) = \frac{1}{2} - f(x) \cos\left(\frac{\pi x^2}{2}\right) - g(x) \sin\left(\frac{\pi x^2}{2}\right)$$

$$f(x) = \frac{1 + 0.926x}{2 + 1.792x + 3.104x^2}$$

$$g(x) = \frac{1}{2 + 4.142x + 3.492x^2 + 6.67x^3}$$

Tato aproximace platí pro $x > 0$. Oba Fresnelovy integrály jsou liché funkce. Pro záporný argument se funkční hodnota vypočte jako

$$C(x) = -C(|x|) \text{ pro } x < 0$$
$$S(x) = -S(|x|).$$

Difrakce na kruhové apertuře V řešení difrakčních integrálů pro kruhovou aperturu v nepropustném stínítku se objevují Lommelovy funkce

$$U_n(u, v) = \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m \left(\frac{u}{v}\right)^{n+2m} J_{n+2m}(v)$$
$$V_n(u, v) = \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m \left(\frac{v}{u}\right)^{n+2m} J_{n+2m}(v),$$

kde $J_{n+2m}(v)$ jsou Besselovy funkce prvního druhu a řádu $n+2m$, jejichž funkční hodnotu lze v programu Matlab vypočítat s pomocí vestavěné funkce *besselj()*.

V kapitole o difrakci na kruhové apertuře bylo řešení difrakčního integrálu uvedeno s pomocí Lommelových funkcí $U_1(u, v), U_2(u, v)$. Alternativně lze řešení napsat s použitím Lommelových funkcí $V_0(u, v), V_1(u, v)$. Autoři článku [5] doporučují pro numerický výpočet volit variantu v závislosti na velikosti argumentů u, v .

$$\frac{\psi}{\psi_r} = \begin{cases} -\exp\left[\frac{i}{2}\left(u + \frac{v^2}{u}\right)\right][U_2(u, v) + iU_1(u, v)] & \text{pro } v > u \\ \exp\left[\frac{i}{2}\left(u + \frac{v^2}{u}\right)\right]\left\{\exp\left[-\frac{i}{2}\left(u + \frac{v^2}{u}\right)\right] - V_0(u, v) + iV_1(u, v)\right\} & \text{pro } v \leq u \end{cases}$$

Při výpočtu Lommelových funkcí je nutné omezit mez sumace a to s ohledem na požadovanou přesnost výsledku. Výpočet s přesností na k desetinných míst je možné přerušit, je-li splněna alespoň jedna z následujících podmínek

$$\left(\frac{u}{v}\right)^{n+2m} \text{ resp. } \left(\frac{v}{u}\right)^{n+2m} < \frac{1}{2}10^{-k}$$

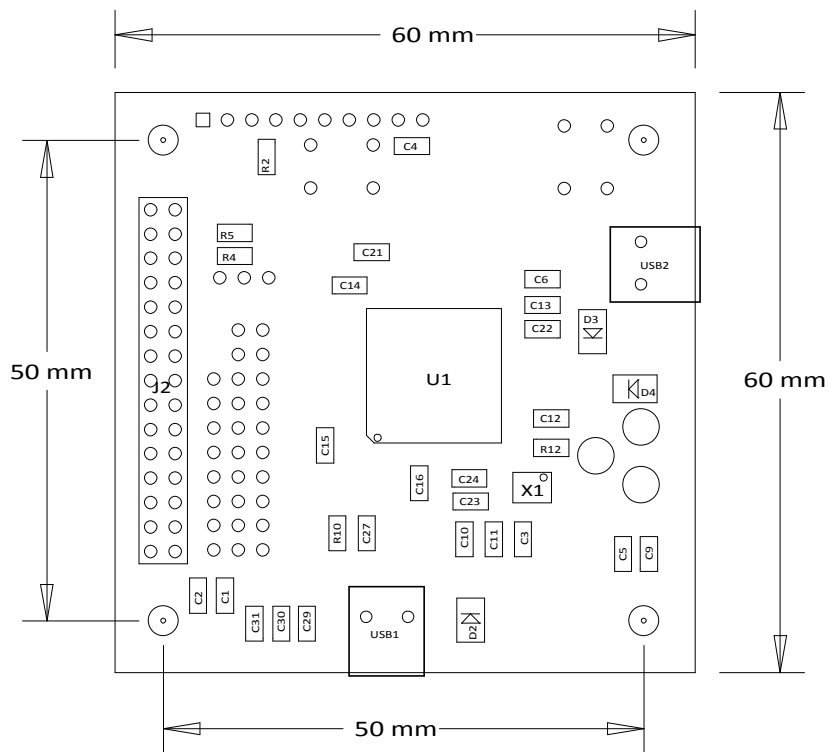
$$J_{n+2m}(v) < \frac{1}{2}10^{-k} \text{ AND } (n + 2m \geq v).$$

Funkce pro výpočet Lommelových funkcí U_1, U_2, V_0, V_1 , Fresnelových integrálů C, S , spolu s výpočtem vlnové funkce za nepropustnou polorovinou a nepropustným stínítkem s kruhovou aperturou byly implementovány v programu Matlab. Zdrojové soubory lze nalézt v příloze na CD.

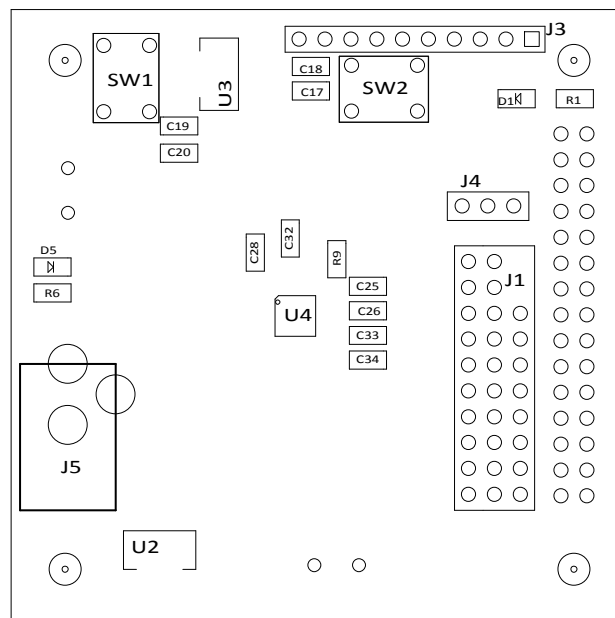
Příloha B: Podklady k plošnému spoji

Part	Reference	Footprint	Quantity
Cap 10uF	C1,C6,C23,C26,C27	h_0805	5
Cap 100nF	C2,C3,C12,C13,C14,C15,C16,C24,C25,C28,C29,C30,C31,C32,C33	h_0805	15
Cap 100 nF	C4,C5,C10,C18,C19	h_0805	5
Cap 10 uF	C9,C11,C17,C20	h_0805	4
Cap 2.2uF	C21,C22,C34	h_0805	3
LED GREEN	D1	h_0805_led	1
STPS2L30A	D2,D3,D4	h_SMA	3
LED RED	D5	h_0805_led	1
Header 8_10_10	J1	h_t_sip_10_10_8	1
CAM_HEADER_2_15	J2	h_t_sip_15_15	1
Header 10	J3	h_t_sip10	1
Header 3	J4	h_t_sip3	1
CONN JACK PWR	J5	h_DC_power_conn	1
Res 470R	R1	h_0805	1
Res 10k	R2,R10,R12	h_0805	3
Res 2k7	R4,R5	h_0805	2
Res 1K	R6	h_0805	1
Res 8K06_1%	R9	h_0805	1
SW PUSHBUTTON	SW1,SW2	h_th_sw	2
USB_MINI_CON	USB1,USB2	h_s_usb_mini_b	2
STM32F765_LQFP100	U1	h_lqfp100_v4	1
STM32F765_LQFP100	U1		1
LD117 3V3	U2	s_sot223	1
LD117_1V8	U3	s_sot223	1
USB3320C-EZK	U4	h_qf32_3320_v2	1
Si501_24.000MHZ	X1	h_smd_crystal_SL	1

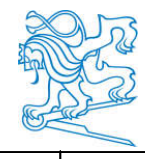
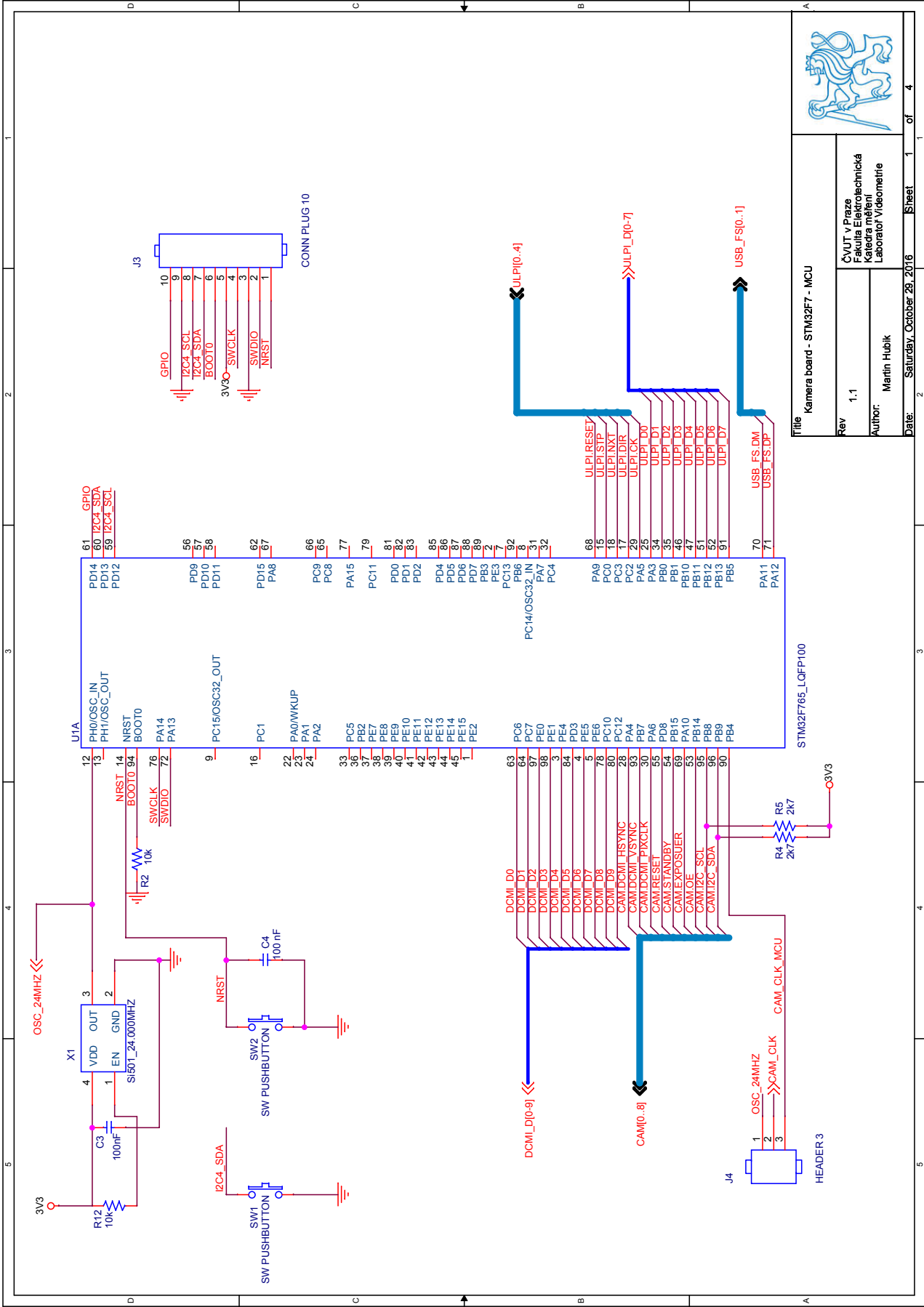
Obrázek 38: Soupis materiálu pro plošný spoj



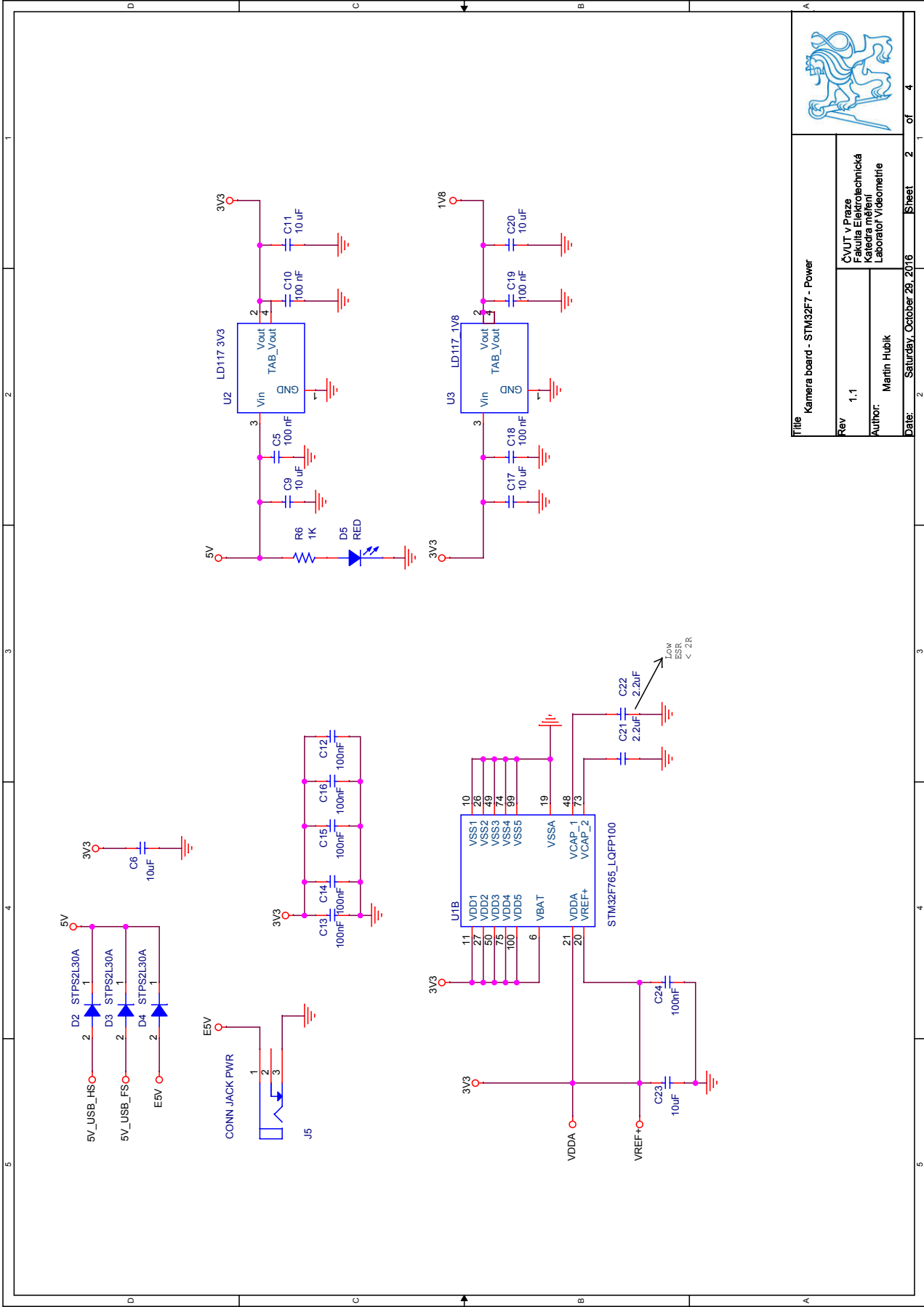
Obrázek 39: Osazovací výkres - TOP



Obrázek 40: Osazovací výkres - BOTTOM



Title Kamera board - STM32F7 - MCU	
Rev 1.1	ΔVUT v Praze Čakulka Elektrotechnická Katedra měřidel a Laboratorní techniky
Author: Martin Hubík	
Date: Saturday, October 29, 2016	Sheet 1 of 4

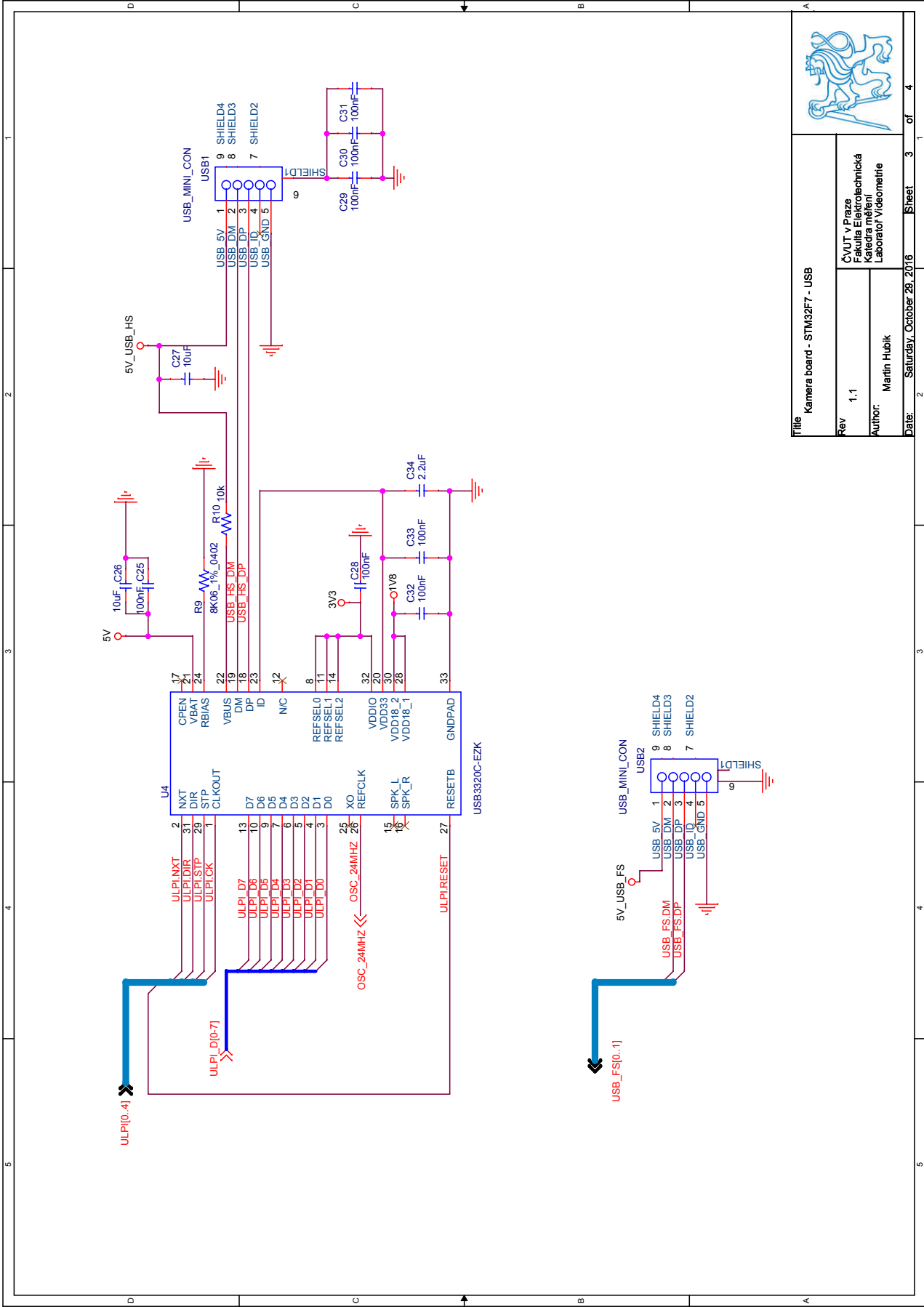


Title		Kamera board - STM32F7 - Power	
Rev	1,1	AVUT v Praze Fakulta Elektrotechnická Katedra Mikroelektroniky Laborator Videometrie	
Author:	Martin Hublik		
Date:	Saturday, October 29, 2016	Sheet	2 of 4



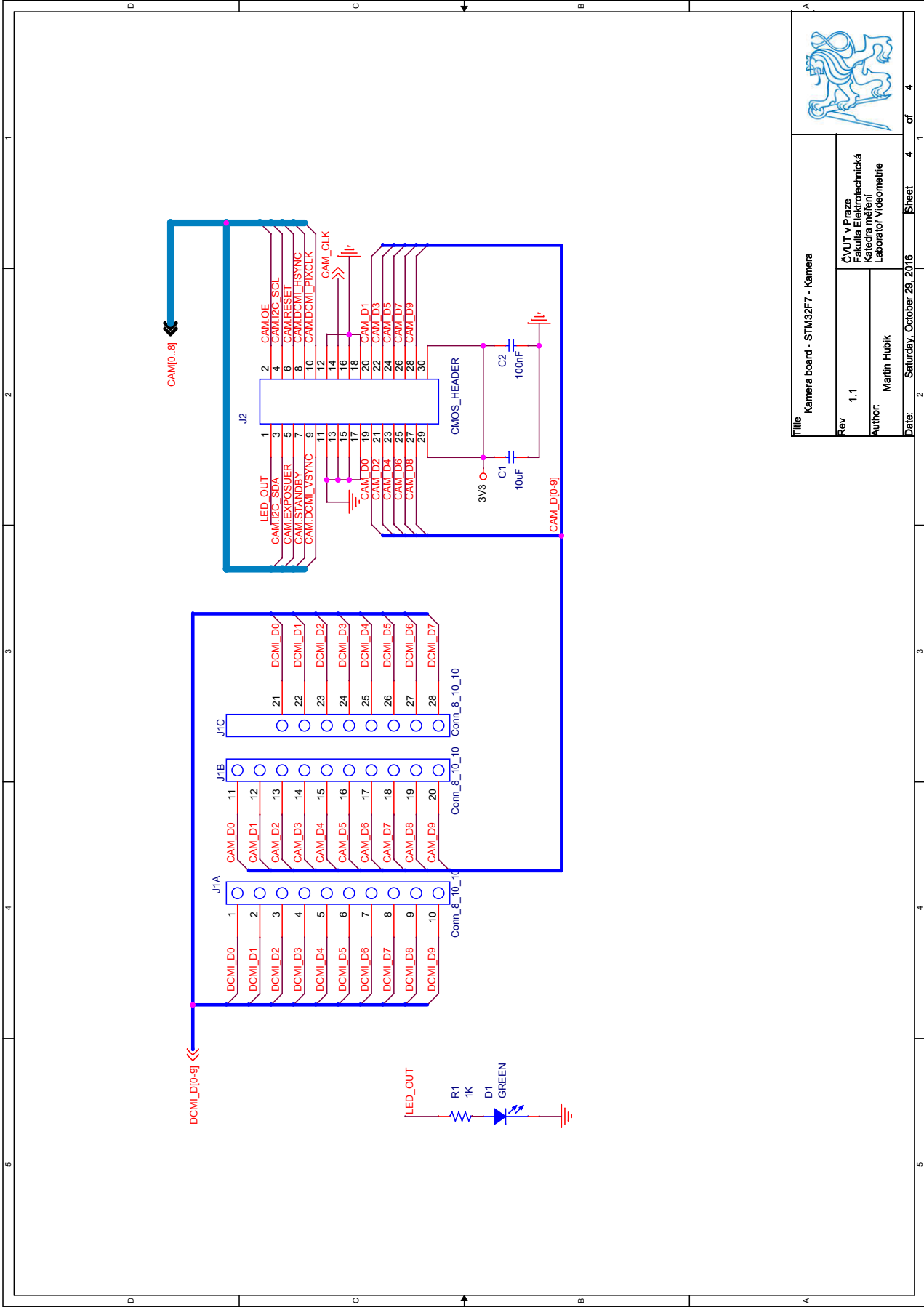
5 4 3 2 1

D C B A



Title Kamera board - STM32F7 - USB			
Rev	1.1	AVUT v Praze Fakulta Elektrotechnická Katedra Mikroelektroniky Laborator Videometrie	
Author:	Martin Hublik		
Date:	Saturday, October 28, 2016	Sheet	3 of 4

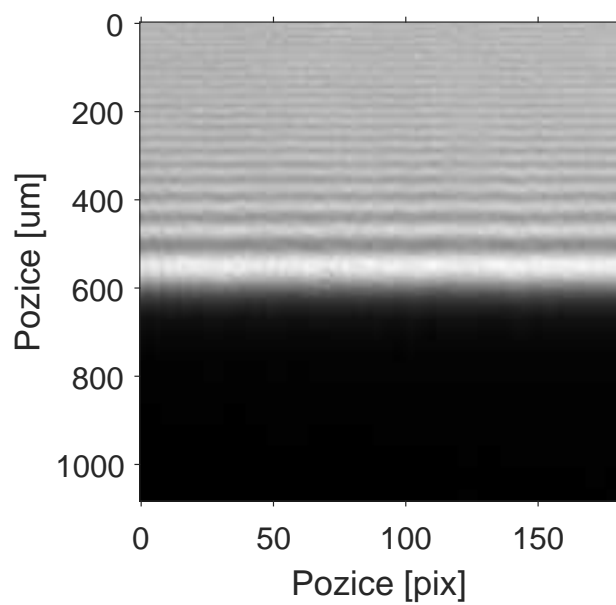




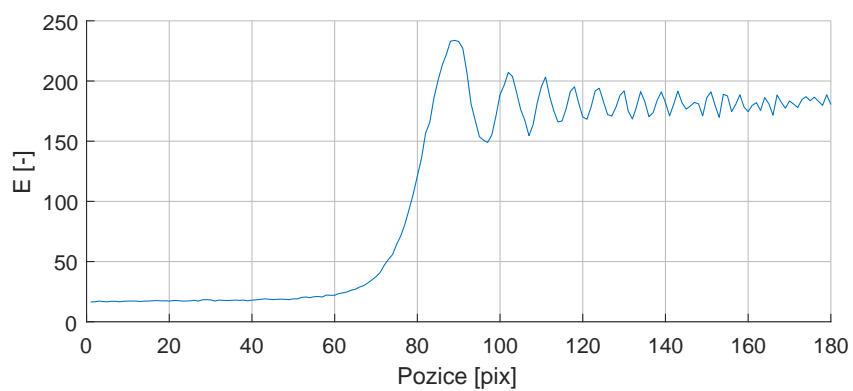
Title		Kamera board - STM32F7 - Kamera	
Rev	1.1	AVUT v Praze Fakulta Elektrotechnická Katedra Mikroelektroniky Laborator Videometrie	
Author:	Martin Hubik	Date:	Saturday, October 29, 2016
		Sheet	4 of 4



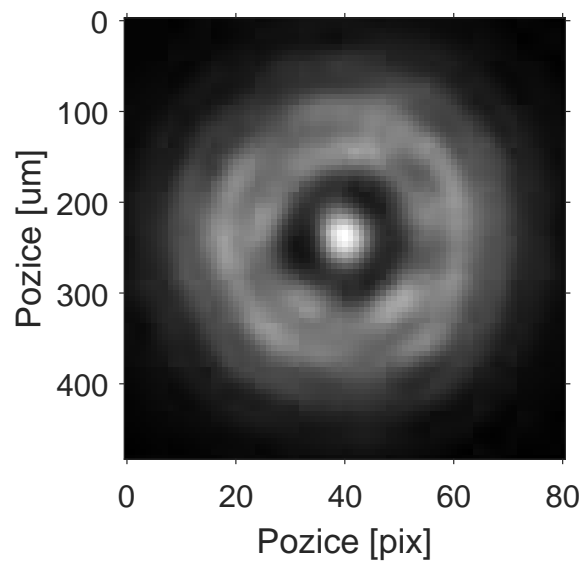
Příloha C: Naměřené difrakční obrazce



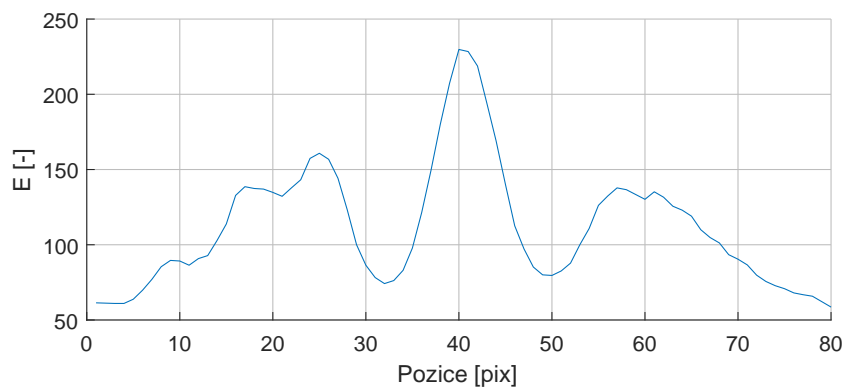
Obrázek 41: Difrakční obrazec za nepropustnou polorovinou



Obrázek 42: Difrakční obrazec za nepropustnou polorovinou - řez



Obrázek 43: Difrakční obrazec za kruhovou aperturou



Obrázek 44: Difrakční obrazec za kruhovou aperturou - řez

Příloha D: Obsah CD

- **Literatura** - Použitá literatura a datasheety
- **Matlab** - Skripty a funkce pro program Matlab
- **Plošný spoj** - Výrobní podklady pro plošný spoj (schémata, gerbery, BOM)
- **Template projects** - Projekty v jazyce C pro Discovery kity od STM
- **Zdrojové kody pro STMF765**
- **DPHubik2016.pdf** - tento text ve formátu pdf