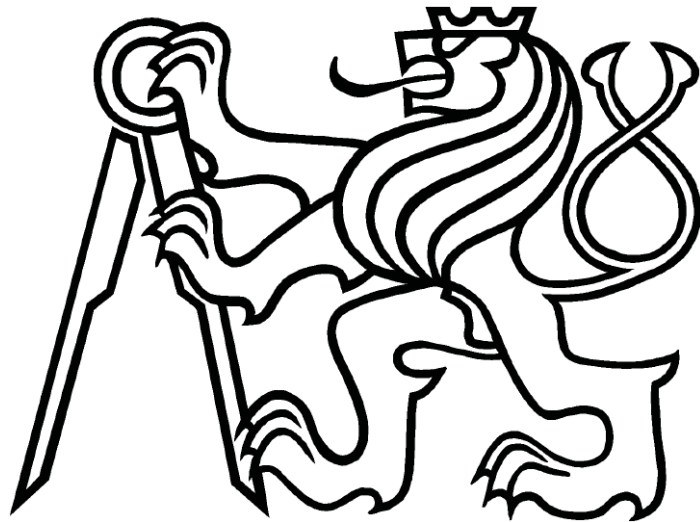


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Analýza vlastností kamer a metodika jejich testování

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jan Fischer, CSc.

Autor: Bc. Peter Palaj

2013



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Petr Palaj**

Program: **Kybernetika a robotika**
Obor: **Senzory a přístrojová technika**

Název tématu česky: **Analýza vlastnosti kamer a metodika jejich testování**

Název tématu anglicky: **Analysis of Camera Parameters and their Testing**

Pokyny pro vypracování:

Analyzujte vlastnosti kamer a navrhnete metodiku jejich testování. Vytvořte testovací pracoviště i potřebné programové vybavení, které bude umožňovat vyhodnotit vlastnosti senzorů, jako jsou rozlišovací schopnost, citlivost, homogenita fotocitlivosti, linearita převodní charakteristiky, šumové parametry. Navrhnete též metodiku testování optické soustavy použité v kamerách z hlediska jejich parametrů, které ovlivňují přesnost měření polohy a rozměru objektů kamerami.

Seznam odborné literatury:

- [1] Hlaváč, V., Sedláček, M.: Zpracování signálů a obrazů. Vydavatelství ČVUT, Praha 2009 (3. vyd.)
- [2] Fischer, J.: Optoelektronické senzory a videometrie. Skripta ČVUT, Praha 2002
- [3] Theuwissen, A. J. P.: Solid state Imaging with Charge - Coupled devices. Kluwer academic publishers, Dordrecht, 1996

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

Datum zadání diplomové práce: 5. ledna 2011

Platnost zadání do¹: 29. června 2012

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
vedoucí katedry



Prof. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 5. 1. 2011

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá vývojem metodiky pro testování průmyslových kamer. Pro obrazový senzor je to zejména měření šumových parametrů, převodní charakteristiky, citlivosti, homogenity fotocitlivosti a rozlišovací schopnosti. Pro objektiv pak měření geometrických a optických vlastností. Cílem práce bylo vytvořit potřebné programové vybavení, hardware i testovací obrazce pro testování těchto parametrů. Funkčnost byla ověřena měřeními na kamerách. Následně byl tento program i s hardwarem (řídící deska s osvětlovačem) úspěšně implementován pro použití při výuce v laboratoři videometrie ČVUT.

Abstract

This thesis describes development of industrial cameras testing methodics—evaluation of image sensor properties such as noise and transfer function characteristics, sensitivity and its homogeneity or spatial resolution and evaluation of lens geometrical and optical properties. In this work, suitable software, hardware and test patterns were developed for image sensor and lens testing. Operation has been verified by measurements on cameras. The program with hardware (control panel with illuminator) was subsequently successfully implemented for teaching purposes in CTU laboratory of videometry.

Prohlášení

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

V Praze dne

.....
Bc. Peter Palaj

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Janu Fischerovi, CSc. za jeho cenné a podnětné rady a připomínky k této diplomové práci i za jeho trpělivost. Děkuji Ing. Ondřejovi Pribulovi a Bc. Vladimíru Lipenskému za informace a podklady týkající se kamery ViSor a webových kamer. Poděkování dále patří Ing. Janu Koudelkovi za gramatické korektury a v neposlední řadě mojí manželce, která mě celou dobu studia velmi podporovala.

Čeština není můj mateřský jazyk. Jelikož studuji na české univerzitě a v České republice jsem už devět let, rozhodl jsem se napsat tuto práci v češtině. Proto hodně děkuji všem, kteří mi pomohli se zvládnutím české gramatiky při psaní této práce.

Obsah

Seznam obrázků.....	viii
Úvod	1
1 Rozbor problematiky.....	2
1.1 Kamera jako celek	3
1.2 Obrazový senzor	4
1.2.1 Převodní charakteristika	4
1.2.2 Šum	5
1.2.3 Rozlišovací schopnost.....	6
1.2.4 Homogenita fotocitlivosti	8
1.2.5 Dynamický rozsah	9
1.2.6 Účinnost	9
1.3 Objektiv	10
1.3.1 Rozlišovací schopnost.....	11
1.3.2 Hloubka ostrosti	12
1.3.3 Geometrické a optické vady	12
2 Převodní charakteristika obrazového snímače	15
2.1 Měření převodní charakteristiky změnou expoziční doby.....	15
2.2 Měření převodní charakteristiky změnou vstupního jasu	16
2.2.1 Řízený osvětlovač	16
2.2.2 Měření převodní charakteristiky programem	18
3 Šumy.....	27
3.1 Měření fotonového šumu	27
3.1.1 Vlákno pro měření fotonového šumu	29
3.1.2 Výpočty a zobrazení výsledků měření fotonového šumu.....	30
3.2 Měření temného šumu	37
4 Rozlišovací schopnost kamery	38
4.1 Rozbor obrazové hrany	38
4.2 Detekce obrazové hrany.....	40
4.3 Funkce pro zobrazení relativní hodnoty zaostření.....	43
4.4 Měření pomocí testovacích obrazců	47
4.4.1 Rozbor návrhu obrazců a jejich tisku	47
4.4.2 Obrazce pro měření rozlišovací schopnosti	49
4.4.3 Vyhodnocování měření rozlišovací schopnosti	53
4.4.4 Obrazce pro měření plošného rozložení ostrosti.....	56
4.5 Měření s pomocí hardware pro posouvání ostrého břitu	58
4.5.1 Přípravek pro posouvání hrany	58
4.5.2 Posuv ostrého břitu krokovým motorem	60
4.5.3 Vlákno pro kalibraci mikropojezdu	62
4.5.4 Využití přípravku pro měření rozlišovací schopnosti.....	65

5	Měření homogenity fotocitlivosti.....	66
5.1	Měření citlivosti obrazového senzoru.....	68
6	Měření geometrických a optických vlastností objektivu.....	70
6.1	Měření vinětace.....	70
6.2	Měření radiálního zkreslení	72
6.2.1	Obrazce pro měření radiálního zkreslení	72
6.2.2	Měření radiálního zkreslení programem.....	73
6.3	Měření hloubky ostrosti	78
6.3.1	Přípravek pro měření hloubky ostrosti.....	79
7	Popis vytvořeného programu.....	81
7.1	Základní popis programu	81
7.2	Funkce pro práci s otevřeným obrazem	81
7.3	Funkce pro měření	83
8	Řídící deska	84
8.1	Komunikace s řídicí deskou.....	84
9	Možné rozvinutí programu	86
9.1	Integrace další kamery	86
9.2	Přidávání nových funkcí	87
9.3	Další plánované využití programu	89
9.3.1	Úvod do problematiky rentgenových přístrojů.....	89
9.3.2	Možné využití programu pro měření některých parametrů rentgenových přístrojů	90
10	Závěr	93
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	96
	Reference	97
	Přílohy.....	99

Seznam obrázků

Obr. 1 Znázornění řetězce od snímání obrazu až po jeho zobrazení [dle zdroje 2].....	2
Obr. 2 Blokové schéma částí kamery [dle zdroje 3].....	3
Obr. 3 a) křivka vstupního osvětlení kamery, b) různé převodní charakteristiky	5
Obr. 4 Maticové a hexagonální rozložení pixelů [dle zdroje 6]	6
Obr. 5 Modelová situace snímání testovacího obrazce lineárním senzorem pro znázornění nutnosti dodržení vzorkovací věty	7
Obr. 6 a) Anatomie pixelu CMOS [zdroj 7], b) princip činnosti pasivního fotoelementu CMOS [dle zdroje 8].....	8
Obr. 7 Proměnné, ovlivňující dynamický rozsah obrazového senzoru [zdroj 9]	9
Obr. 8 Závislost kvantové účinnosti senzoru MT9M001 na vlnové délce [zdroj 10]	10
Obr. 9 Prostorová impulsová odezva zobrazovací soustavy [dle zdroje 4 a 11]	11
Obr. 10 Znázornění přenosu kontrastu zobrazovací soustavou [zdroj 4]	11
Obr. 11 Náměr MTF z programu Imatest	12
Obr. 12 Vysvětlení vzniku radiálního zkreslení	13
Obr. 13 a) bez radiálního zkreslení, b) polštářkové zkreslení, c) soudkovité zkreslení .	13
Obr. 14 Vinětace způsobená přechodem světelných paprsků optickou soustavou.....	13
Obr. 15 Čočka a) bez chromatické vady, b) s chromatickou vadou	14
Obr. 16 Měření převodní charakteristiky změnou expoziční doby digitálního fotoaparátu	16
Obr. 17 Průřez přípravku řízeného osvětlovače.....	17
Obr. 18 Naměřené hodnoty jasu řízeného osvětlovače pro jednotlivé kroky	18
Obr. 19 Vývojový diagram měření převodní charakteristiky	19
Obr. 20 Vývojový diagram vlákna pro měření převodní charakteristiky	20
Obr. 21 Znázornění uvažovaných odchylek při měření převodní charakteristiky.....	21
Obr. 22 Převodní charakteristika kamery ViSor, doba integrace 40ms; zesílení 1; par.A	22
Obr. 23 Převodní charakteristika kamery ViSor, doba integrace 40ms; zesílení 1,5;par.A	23
Obr. 24 Převodní charakteristika kamery ViSor, doba integrace 40ms; zesílení 2; par.A	23
Obr. 25 Převodní charakteristika kamery ViSor, doba integrace 40ms; zesílení 2; par.B	24
Obr. 26 Ukázka špatného výběru měřené oblasti	24
Obr. 27 Převodní charakteristika měřená v místě s prachovou částicí	25
Obr. 28 Převodní charakteristika web-kamery	26
Obr. 29 Měření převodní charakteristiky digitálního fotoaparátu s využitím řízeného osvětlovače.....	26
Obr. 30 Vliv tvaru převodní charakteristiky na měření fotonového šumu	28
Obr. 31 Vývojový diagram měření fotonového šumu	28
Obr. 32 Vývojový diagram vlákna pro měření fotonového šumu	29
Obr. 33 Ukázka grafu měření fotonového šumu, doba integrace 10ms, zesílení 2, par.C	30
Obr. 34 Ukázka grafu měření fotonového šumu, doba integrace 30ms, zesílení 2, par.C	31
Obr. 35 Ukázka grafu měření fotonového šumu, doba integrace 50ms, zesílení 2, par.C	31

Obr. 36	Převodní charakteristika měřena změnou délky expozice.....	32
Obr. 37	Závislost rozptylu na délce expozice.....	33
Obr. 38	Závislost fotonového šumu na počtu dopadajících fotonů	33
Obr. 39	Demonstrační ukázka měření jednotlivých pixelů	34
Obr. 40	Přepínání mezi náměry fotonového šumu z jednotlivých pixelů	34
Obr. 41	Střední hodnoty signálu jednotlivých pixelů.....	35
Obr. 42	Grafická interpretace náměru středních hodnot signálu jednotlivých pixelů....	35
Obr. 43	a) barevně označená poloha bodů předchozího grafu b) Bayerova mřížka.....	36
Obr. 44	Struktura organizace a správy pixelů černobílého senzoru, shodná s verzí barevnou [zdroj 10].....	36
Obr. 45	Zpracování signálu z pixelu obrazového snímače [zdroj 10].....	37
Obr. 46	Znázornění signálu a) ostré b) mírně rozmazané c) hodně rozmazané hrany ...	38
Obr. 47	Rekonstrukce signálu snímané obrazové hrany.....	39
Obr. 48	Rekonstruovaný signál po snímání různě širokých pruhů testovacího obrazce	39
Obr. 49	Definice signálových úrovní rekonstruované obrazové hrany	40
Obr. 50	Ukázka první a druhé derivace obrazové hrany [dle zdroje 2].....	40
Obr. 51	Aplikace Robinsonova operátoru na nasnímaném obrazu	41
Obr. 52	Závislost velikosti gradientu na tvaru hrany.....	41
Obr. 53	Znázornění funkce využívající „plovoucí diferenci“.....	42
Obr. 54	Závislost hodnoty lineární interpolace na převodní charakteristice	43
Obr. 55	Vývojový diagram měření relativní ostrosti.....	45
Obr. 56	Vývojový diagram vlákna pro měření relativní ostrosti.....	45
Obr. 57	Sledování relativní ostrosti při aktuálně rozmazaném obrazu.....	46
Obr. 58	Sledování relativní ostrosti při aktuálně zaostřeném obrazu	46
Obr. 59	Znázornění rámu a definice rozměrů testovacího obrazce	47
Obr. 60	Přední nasvícení testovacího obrazce	48
Obr. 61	Spodní podsvícení testovacího obrazce	49
Obr. 62	Demonstrace převzorkování testovacího obrazce tiskárnou	50
Obr. 63	Nejhustší vytvořený testovací obrazec	51
Obr. 64	Nejhustší vytvořený obrazec nasnímaný pomocí mikroskopu se zvětšením 4x	51
Obr. 65	Nejhustší vytvořený obrazec nasnímaný pomocí mikroskopu se zvětšením 40x	51
Obr. 66	Segment testovacího obrazce.....	52
Obr. 67	Obrazec a jeho signál a) z originálu testu b) z fotografie c) z detailu hrany fotografie.....	53
Obr. 68	Výřez fotografie testovacího obrazce	54
Obr. 69	Jasové hodnoty na vybrané přímce v obr. 68	54
Obr. 70	Histogramy jednotlivých segmentů testovacího obrazce znázorněného na obr. 68	54
Obr. 71	Snímek svislých pruhů a jeho jasové profily na vybraných přímkách	57
Obr. 72	Zkoumaný obraz: a) jeho prahování hodnotou 174, b) jeho histogram.....	58
Obr. 73	Schematické znázornění pohyblivé části přípravku pro posouvání hrany	59
Obr. 74	Ilustrace nehomogenity osvětlení použitých LED.....	59
Obr. 75	Grafické znázornění signálu mikropojedu.....	61
Obr. 76	Běžné generování střídavy pomocí PWM.....	61
Obr. 77	Fázově a frekvenčně korigovaný režim PWM (dle zdroje 16).....	62
Obr. 78	Informační hláška vlákna pro měření mikropojedu.....	62
Obr. 79	Vývojový diagram vlákna pro kalibraci mikropojedu.....	63
Obr. 80	Výřez obrázku složeného z jednotlivých celých kroků pojedu	64

Obr. 81 Výřez obrázku složeného z jednotlivých kroků mikropojezdu, bez použití linearizace	64
Obr. 82 Výřez obrázku složeného z jednotlivých kroků mikropojezdu, s použitím linearizace	65
Obr. 83 Graf přechodu hrany – kamera ViSor, pojezd PI instruments, krok 10 μ m, průměrováno z 25 snímků [zdroj 21].....	65
Obr. 84 Blokové schéma měření homogenity fotocitlivosti	66
Obr. 85 Vliv působení analogové automatické korekce offsetu jednotlivých složek R, B, G1 a G2 na výsledný obraz kamery	66
Obr. 86 Jasový profil vybrané přímky z výřezu obrazu pořízeného snímáním homogenní plochy.....	67
Obr. 87 Histogram z výřezu obrazu pořízeného snímáním homogenní plochy	67
Obr. 88 Závislost relativní intenzity osvětlení na vlnové délce použitých 60° bílých LED [zdroj 14].....	68
Obr. 89 Intenzita světla závislá na vlnové délce u různých, barevných LED [zdroj 15].....	69
Obr. 90 Homogenní plocha osvětlovače versus vinětací zatížený obraz z kamery	70
Obr. 91 Jasové hodnoty pixelů na diagonále obrazu pořízeného objektivem Avenir	71
Obr. 92 Vinětace objektivu Sigma 10-20mm [zdroj 20]	71
Obr. 93 Jasové hodnoty pixelů na diagonále obrazu pořízeného objektivem Sigma: vlevo 10mm, vpravo 20mm	72
Obr. 94 Výřez testu pro měření radiálního zkreslení.....	73
Obr. 95 Zaostření a centrace při snímání testovacího obrazce	73
Obr. 96 Ukázka měření radiálního zkreslení v okně „FormVyz“	74
Obr. 97 Ukázka detekce hran při měření radiálního zkreslení	74
Obr. 98 Ukázka detekce hran při měření radiálního zkreslení v detailu.....	74
Obr. 99 Vzájemné vzdálenosti sousedních hranových bodů při měření RS s lineární převodní charakteristikou kamery	75
Obr. 100 Vzájemné vzdálenosti sousedních hranových bodů při měření RS s nelineární převodní charakteristikou kamery	75
Obr. 101 Přítomnost šumu při provedeném měření RS.....	76
Obr. 102 Viditelné postupné zužování pruhů důsledkem radiálního zkreslení	76
Obr. 103 Poloha hranových bodů při měření RS objektivu Avenir.....	77
Obr. 104 Vzájemné vzdálenosti sousedních hranových bodů měření RS objektivu Avenir	77
Obr. 105 Míra rozostření testovacího pruhu závislá na vzdálenosti od bodu zaostření .	78
Obr. 106 Princip měření hloubky ostroty za pomoci motorizované optické lavice.....	79
Obr. 107 Konstrukce pojízdné optické lavice.....	80
Obr. 108 Detail řízení pojízdné optické lavice s využitím řídicí desky.....	80
Obr. 109 a) návrh plošného spoje řídicí desky b) finální produkt řídicí desky	84
Obr. 110 Bloková funkce řídicí desky a její zapojení do měřicího systému	85
Obr. 111 Panel pro ukládání používaných ovládacích panelů.....	88
Obr. 112 Závislost rozlišení na velikosti ohniska rentgenové lampy	90
Obr. 113 Vliv působení sekundárního záření a možnosti jeho odstranění	90
Obr. 114 Test rentgenového přístroje	92

Úvod

Cílem této práce je vytvořit metodiky a programové vybavení pro měření kamerových systémů. K tomu bude zpočátku potřeba prostudovat stávající řešení zmíněné problematiky ve světě. Bude nutné zjistit vlastnosti kamer a objektivů, které se podílí na výsledném obraze a na základě těchto zjištění navrhnout konkrétní metodiky.

Měření parametrů má sloužit nejen k získání informací o dané kameře, ale také pro možnost porovnání více kamerových systémů a jejich optiky. V současné době se na trhu prodává velké množství jak kamerových systémů, tak digitálních fotoaparátů. Podíváme-li se na jejich technické parametry, zejména na typy použitých obrazových senzorů, zjistíme, že se u jednotlivých typů liší a to hlavně na základě ceny daného přístroje. Narazíme na snímače CCD a CMOS, u kterých je široká nabídka různých velikostí. Můžeme se ptát, zda se vyplatí připlácet nemalé peníze za větší obrazový senzor, zdali je jeho výsledná kvalita doopravdy lepší oproti menšímu, podstatně levnějšímu, nebo zdali to není jenom reklamní trik.

Řešení porovnání kvality kamerových systému nabízí pouhé sledování jimi pořízených obrazů. Bude ovšem subjektivní porovnání korektní? Nebudou v celkovém systému, tvořeném všemi prvky od samotného snímání objektu, až po jeho zobrazení, další faktory ovlivňující zkoumané parametry? Takových otázek by zde mohlo být položeno určitě víc. Abychom předešli problémům, spojeným se subjektivním vnímáním pozorující osoby, bude nutné stanovit pro měření přesná kritéria a navrhnout vhodné testovací metodiky.

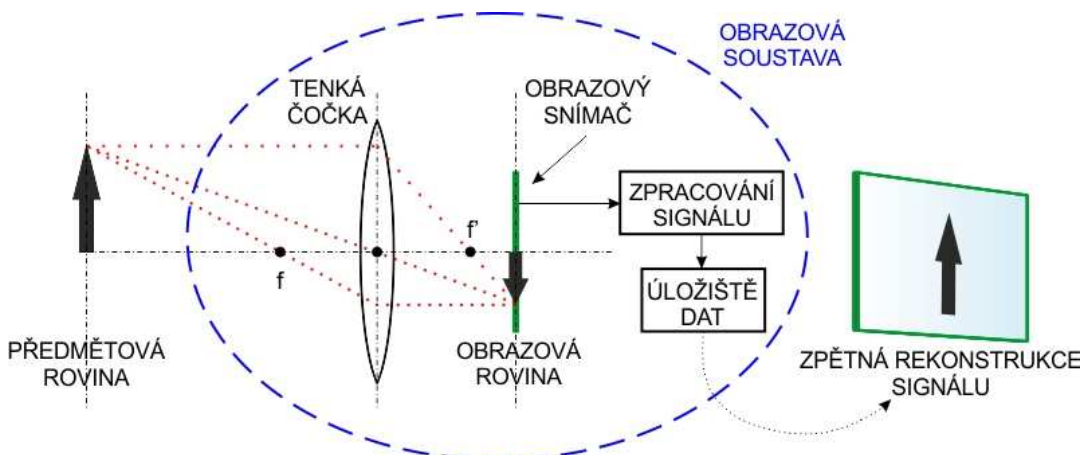
1 Rozbor problematiky

Na trhu je hodně testovacích metodik a programového vybavení určených pro měření parametrů obrazových sensorů a vlastností optické soustavy. Existují také normy, např. „ISO 12233“, pomocí kterých lze s použitím správných testovacích obrazců zjišťovat rozlišovací schopnost a jiné parametry. Testovací obrazce vysoké kvality vyrábí např. firma „Danes-Picta“.

Jedním z kvalitních nástrojů používaným v praxi pro měření vlastností digitálních fotoaparátů je např. software „Imatest“ [zdroj 1]. Tento software využívá pro měření testovací obrazce zmíněné firmy a jeho výsledky jsou v souladu s normou ISO 12233. Také obsahuje možnosti generování testovacích obrazců s nastavitelnými parametry. Tento program je velice rozšířen hlavně pro účely vytváření recenzí digitálních fotoaparátů. Jedná se o software navržený ve vývojovém prostředí Matlab, které s použitím speciálních toolboxů umožňuje složité zpracování obrazu. Základní verze programu pracuje pouze s otevřeným obrazem bez možností zpracování toku dat z kamery. Demo této verze bylo před započítím programování vlastní práce vyzkoušeno. V průběhu tvorby této práce se na trhu objevila také IT (Industrial Testing) verze, která umožňuje propojit měřicí program s testovanými kamerami pomocí programů C, C++, C# a LabView.

Využití propracovaných funkcí zpracování obrazu v Matlabu by bylo pro tuto práci určitě přínosem, ovšem pro Matlab jsou nutné licence. Proto bylo pro programování software této DP zvoleno freewarové vývojové prostředí od společnosti Microsoft, konkrétně Visual Studio C# 2010 Express.

Cílem práce bude vytvoření testovacích metodik a programového vybavení pro měření co možná nejvíce parametrů průmyslových kamer. Nejhlavnější částí kamery z hlediska jejího testování jsou obrazový sensor a použitý objektiv. Dále je výsledný obraz závislý na použité elektronice a softwaru pro zpracování dat. Situaci znázorňuje obr. 1, u kterého zmíněný pojem „Obrazová soustava“ bude v této práci představovat z největší části průmyslová kamera. V práci budou dále prozkoumány i některé vlastnosti digitálních fotoaparátů. Z uvedeného obrázku je také patrné, že pro pozorovatele bude mít vliv na vlastnosti výsledného obrazu i soustava pro jeho zobrazení.

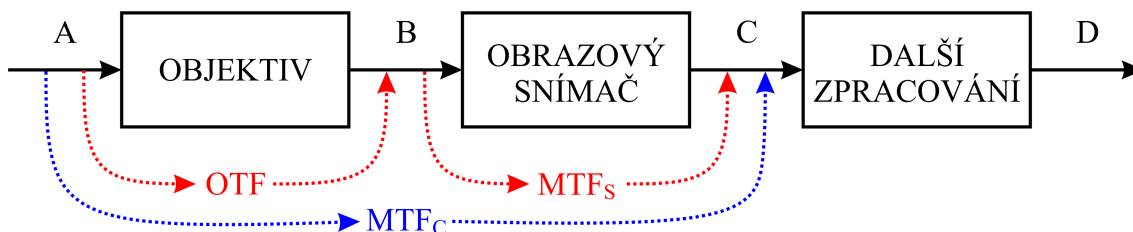


Obr. 1 Znázornění řetězce od snímání obrazu až po jeho zobrazení [dle zdroje 2]

Nyní se zaměříme na rozbor kamery a její jednotlivých částí, zejména z hlediska vlivu na výslednou kvalitu obrazu.

1.1 Kamera jako celek

Jako každý jiný systém, i kameru můžeme posuzovat pomocí její přenosové funkce, která bude složena z přenosových funkcí jednotlivých částí kamery.



Obr. 2 Blokové schéma částí kamery [dle zdroje 3]

Optická přenosová funkce **OTF** (Optical Transfer Function) se vypočte jako

$$OTF = B/A, \quad (1)$$

kde A představuje obraz v předmětové rovině a B představuje promítnutý obraz za objektivem v obrazové rovině.

Modulační přenosová funkce snímače **MTF_s** (Modulation Transfer Function - sensor) se vypočte jako

$$MTF_s = C/B, \quad (2)$$

kde C představuje získaný obraz ze snímače.

Pokud zanedbáme změny obrazového signálu způsobené dalším zpracováním kamery, můžeme celkovou modulační přenosovou funkci kamery **MTF_c** vypočítat jako součin obou zmíněných přenosových funkcí, tedy

$$MTF_c = OTF * MTF_s = C/A \quad (3)$$

a při uvažované podmínce $D/C = 1$

$$MTF_c = D/A. \quad (4)$$

Optická přenosová funkce OTF je základním, objektivním měřítkem kvality optických a elektrooptických systémů, která je definována jako Fourierova transformace prostorové impulsové odezvy PSF (Point Spread Function). OTF je komplexní funkcí reálné proměnné, jejíž modul se nazývá modulační přenosová funkce MTF a fázi popisuje fázová přenosová funkce PTF (Phase Transfer Function). MTF lze též definovat jako podíl kontrastu obrazu v obrazové rovině vzhledem ke kontrastu předmětu v rovině předmětové pro sinusový testovací obrazec, přičemž PTF udává fázový posuv těchto testovacích obrazců. [zdroj 4]

Na přenosovou funkci každého z jednotlivých bloků uvedených na obr. 2, a tedy i kamery jako celku, mají vliv zejména jejich vlastní parametry. Do systému ovšem vstupují také vnější složky, které mohou mít na tyto parametry vliv. V následujících kapitolách rozebereme podrobněji hlavní bloky kamery a parametry, na kterých závisí kvalita výsledného obrazu.

1.2 Obrazový senzor

V průmyslových kamerách se používají nejčastěji dva typy obrazových senzorů, kterými jsou senzory **CCD** (**C**harge **C**oupled **D**evice) a senzory **CMOS** (**C**omplementary **M**etal **O**xide **S**emiconductor). Tyto senzory se dále rozdělují na řádkové a plošné, přičemž plošné senzory mohou být černobílé, nebo barevné.

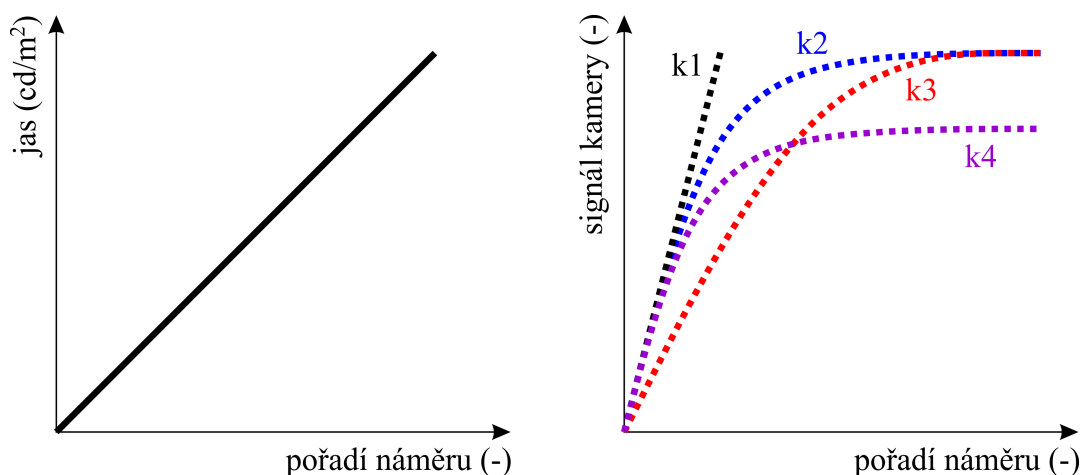
Senzory CCD a CMOS mají rozdílný princip funkce a technologický proces výroby, proto se mohou lišit i jejich jednotlivé parametry. Princip měření pro získání informací o jejich parametrech je, ale u obou zmíněných typů stejný a patří mezi ně zejména měření:

- převodní charakteristiky,
- šumů (fotonový šum, šum proudů za tmy, ostatní složky šumu),
- rozlišovací schopnosti,
- homogenity fotocitlivosti,
- dynamického rozsahu,
- účinnosti.

V následujících podkapitolách budou zmíněné parametry rozebrány detailněji.

1.2.1 Převodní charakteristika

Převodní charakteristika udává závislost výstupního signálu kamery na intenzitě jejího vstupního osvětlení. Pro její měření potřebujeme měnit počet fotonů, které dopadnou na obrazový snímač, což můžeme udělat změnou vstupního jasu, nebo změnou expozice kamery. Na obr. 3 jsou znázorněny čtyři různé křivky převodní charakteristiky. Černá křivka „k1“ představuje lineární převodní charakteristiku a modrá křivka „k2“ nelineární převodní charakteristiku. Vlastnosti jednotlivých pixelů mohou být vůči sobě různé. Fialová křivka „k4“ by představovala převodní charakteristiku pixelu s nižší citlivostí oproti pixelu s křivkou „k2“. Červená křivka „k3“ pak signál z pixelu, který podléhá nižší hodnotě zesílení oproti „k2“.



Obr. 3 a) křivka vstupního osvětlení kamery, b) různé převodní charakteristiky

1.2.2 Šum

Šum proudů za tmy

Šum proudů za tmy, nebo také nazývaný „šum temného proudu“. Vzniká v obrazovém senzoru náhodnou generací elektron-děrových párů tepelnou excitací nebo tunelováním a to i bez fotonů dopadajících na obrazový senzor. Jeho velikost je závislá na teplotě senzoru a délce expozice. [zdroj 5]

Obrazové senzory obsahují určitý počet pixelů, zastíněných vůči dopadajícímu světlu, ve kterých se v průběhu doby expozice sbírá pouze náboj vzniklý tepelnou excitací, nikoliv fotoelektrickým jevem. Pokud po ukončení expozice odečteme od signálu jednotlivých ozářených pixelů střední hodnotu tepelného šumu, naměřenou z temných pixelů, dokážeme tím temný šum redukovat, což se u obrazových senzorů běžně využívá.

Fotonový šum

Jedná se o velice podstatnou složku šumu, který je spojen s náhodnými fluktuacemi v toku samotných dopadajících fotonů.

Fotonový tok s daným optickým výkonem P není přesně definovaný a jeho střední hodnota $\Phi = P/h\nu$ náhodně kolísá. Počet fotonů n zaznamenaných v časovém intervalu T je náhodný, se střední hodnotou $\bar{n} = \Phi.T$. Tento šum lze popisovat Poissonovým pravděpodobnostním rozdělením, podle něhož je směrodatná odchylka

$$\sigma = \sqrt{\bar{n}}. \quad (5)$$

[zdroj 5]

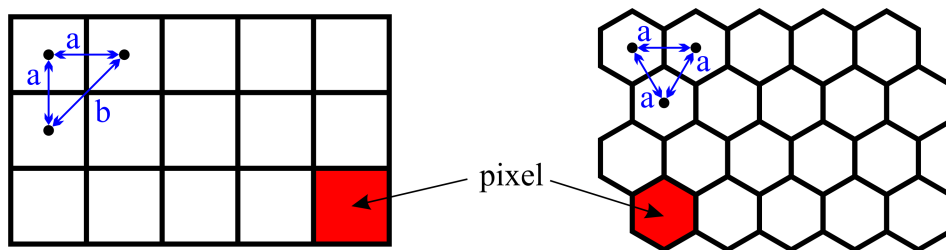
Z výše uvedeného vyplývá, že velikost fotonového šumu je závislá na počtu dopadajících fotonů. Více se ovšem bude projevovat při nižších hodnotách osvětlení, u kterých bude hodnota SNR (Signal to Noise Ratio) nižší vůči SNR při vyšších hodnotách osvětlení.

Ostatní složky šumu

Zde můžeme zahrnout ostatní negativní vlastnosti obrazového senzoru obsahujícího další elektroniku, jejíž šum se také podílí na celkové hodnotě šumu. Patří sem např. kvantovací šum AD převodníku, šum způsobený nedokonalým mazáním předchozího snímku apod.

1.2.3 Rozlišovací schopnost

Nejmenší element obrazového senzoru je jeden pixel. Pixely jsou uspořádané nejčastěji v maticové struktuře, ovšem může to být i struktura jiná, např. hexagonální (pokusy s ní prováděla firma Fuji). Výhoda maticové struktury je v jednoduchosti její výroby. Také zpracování dat v počítači a zobrazení na monitoru je řešeno maticově. Výhodou hexagonální mřížky je její vhodnější uspořádání, protože všechny pixely jsou od sebe stejně vzdálené.



Obr. 4 Maticové a hexagonální rozložení pixelů [dle zdroje 6]

Rozlišovací schopnost přímo udává rozlišení senzoru. Toto rozlišení musíme při výběru obrazového senzoru volit tak, aby při snímání požadovaných objektů byly splněny minimální požadavky vzorkovací věty.

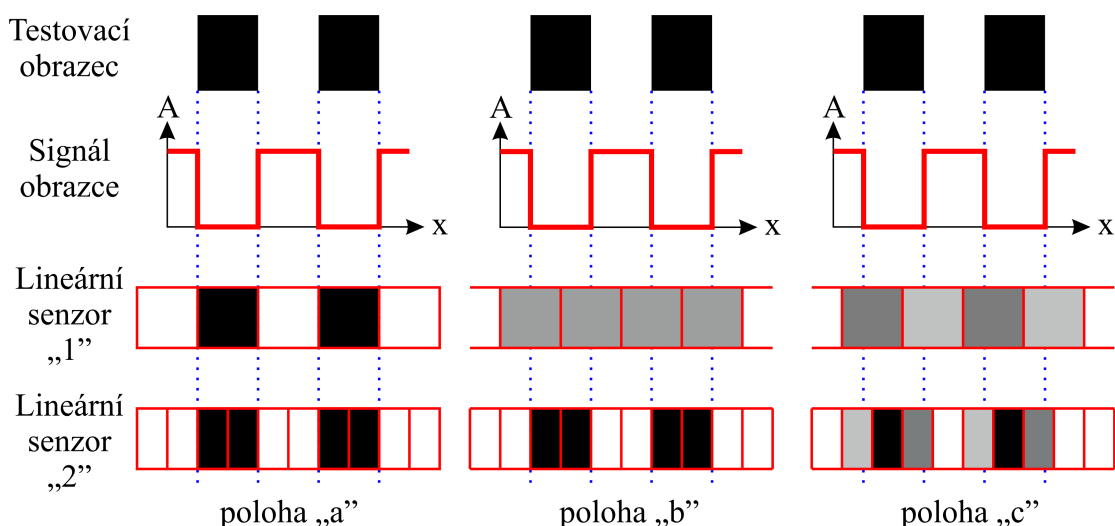
Vzorkovací věta

„Pokud signál $x(t)$ spojitý v čase obsahuje pouze frekvenční složky s frekvencemi menšími než f_{\max} , pak $x(t)$ může být jednoznačně rekonstruován z posloupnosti ekvidistantních vzorků $x(nT)$, pokud vzorkovací frekvence $f_{vz} = 1/T$ je větší než $2 \cdot f_{\max}$, čili

$$f_{vz} > 2 \cdot f_{\max} \cdot \quad (6)$$

Zmíněná známá vzorkovací věta je použitelná pro jednorozměrný signál. Pro obraz, tedy případ dvourozměrného signálu, je její rozšíření přirozené a říká, že vzorkovací interval se musí volit tak, aby byl menší nebo rovný polovině rozměru nejmenších detailů v obraze. “ [zdroj 2]

Aby tedy nedošlo ke ztrátě snímaných dat, musí při snímání obrazového signálu platit, stejně jako u signálu klasického, vzorkovací věta. Při nedodržení této podmínky, tj. při podvzorkování, dojde ke ztrátě informací a signál již nebude zpětně rekonstruovatelný. Situaci s promítnutím černých pruhů na lineární obrazový senzor názorně ukazuje obr. 5.



Obr. 5 Modelová situace snímání testovacího obrazce lineárním senzorem pro znázornění nutnosti dodržení vzorkovací věty

Průběh „A“ popisuje velikost obrazového signálu (zde, i dále v této práci budou pod pojmem obrazový signál myšleny jasové hodnoty obrazu, jejichž maximální hodnota reprezentuje barvu bílou a minimální hodnota naopak černou) a hodnota „x“ popisuje polohu obrazu. Ve spodní části jsou umístěny dva lineární senzory (je použita analogie snímání jednorozměrného signálu kvůli jednoduššímu znázornění na obrázku). Šířka pixelu lineárního senzoru „1“ je rovna polovině a šířka pixelu lineárního senzoru „2“ je rovna čtvrtině periody signálu. V popisovaném obrázku jsou znázorněny tři různé polohy senzorů vůči testovacím pruhům:

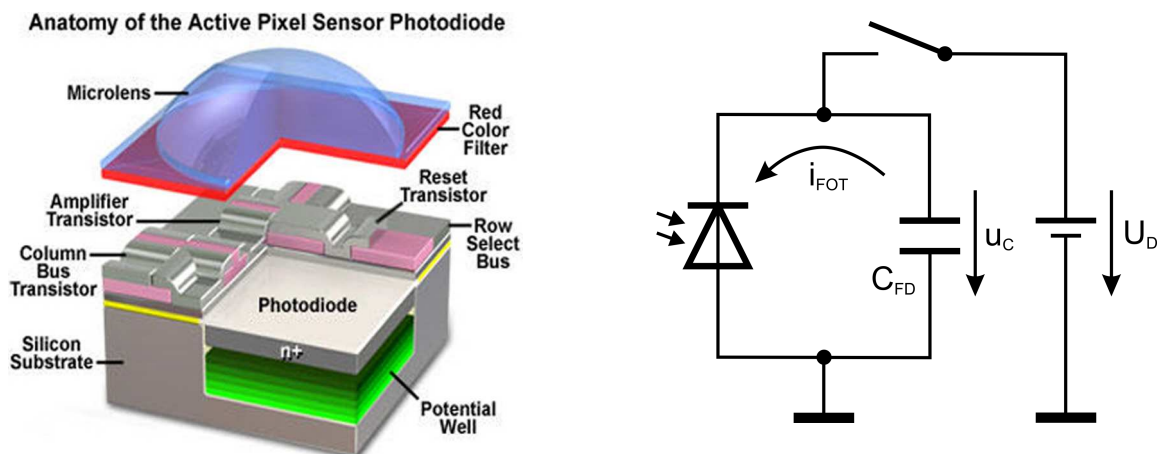
- a: počáteční poloha, ve které pruhy ideálně prokládají jednotlivé pixely,
- b: posuv o jednu čtvrtinu periody signálu obrazce vůči počáteční poloze,
- c: posuv o jednu šestinu periody signálu obrazce vůči počáteční poloze.

Na tomto obrázku je vidět, že limitní dodržení vzorkovací věty je pro zpětnou rekonstrukci obrazu naprosto nedostatečné. Při jiné poloze, než je ideální překrytí lineárního senzoru testovacími pruhy (poloha „a“), je signál zpětné rekonstrukce silně znehodnocen. Ve druhé a třetí poloze senzoru („b“, „c“) je vidět, že dochází k průmětu jednotlivých pruhů testovacího obrazce na více než jeden pixel, čímž se u některých pixelů vyhodnocuje také rozhraní „čára – mezera“ a tím dochází k zprůměrování hodnoty dle procentuálního zastoupení pruhu a mezery v daném pixelu. Pravděpodobnost správné detekce jasové hodnoty pruhu bez zastoupení složky okolí tedy stoupá se zvyšujícím se rozlišením senzoru. Pro snímání obrazu tedy stejně jako pro snímání obecného signálu platí, že čím je nasnímaných vzorků na periodu více, tím důvěryhodnější obraz získáme, ovšem na úkor většího množství ukládaných dat.

1.2.4 Homogenita fotocitlivosti

Jedním z důležitých parametrů obrazových sensorů je jejich citlivost. Protože je ale technologický problém vyrobit všechny pixely se stejnými parametry, můžou u jednotlivých pixelů jejich citlivosti vůči jiným pixelům kolísat. Rozdíly fotocitlivosti jsou způsobeny zejména následujícími dvěma důvody.

1) Pixel tvoří mimo fotodiody, tedy jeho aktivní fotocitlivé části, také tranzistory a sběrnice, které zmenšují poměr plochy fotodiody k celkové ploše pixelu, čímž snižují jeho citlivost. Z tohoto důvodu se nad každý pixel umísťuje mikročočka, jejímž úkolem je soustředit co největší procento fotonů dopadajících na pixel do místa umístění fotodiody. Pokud se u pixelů nepodaří vytvořit naprosto stejné podmínky pro koncentraci fotonů do místa fotodiody, může být následkem nehomogenní citlivost obrazového sensoru. Anatomii pixelu znázorňuje obrázek 6a.



Obr. 6 a) Anatomie pixelu CMOS [zdroj 7], b) princip činnosti pasivního fotoelementu CMOS [dle zdroje 8]

2) Na obrázku 6b je znázorněna funkce fotoelementu CMOS. *Ve stavu resetování se nabije kondenzátor C_{FD} , který představuje parazitní kapacitu záporně polarizovaného PN přechodu. Dopadem záření na PN přechod začne protékat proud i_{FOT} , kterým se C_{FD} začne vybíjet. Změna náboje na C_{FD} je úměrná dávce záření.*

[zdroj 8]

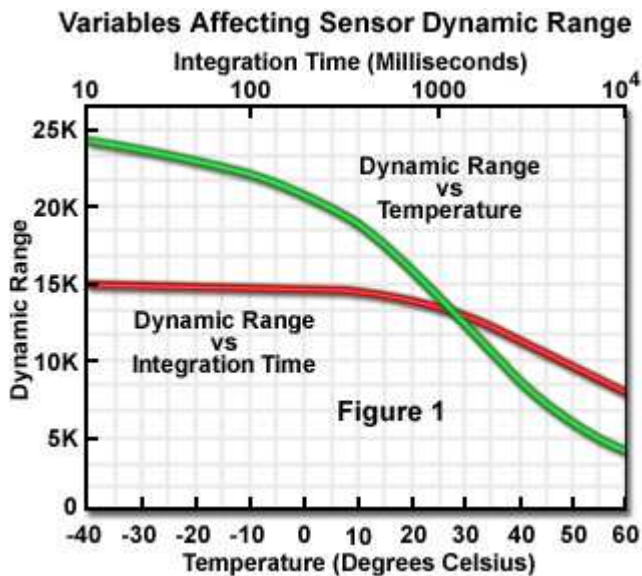
Rozdílné hodnoty kapacit C_{FD} u jednotlivých pixelů mají tím pádem také za následek nehomogenitu obrazového sensoru.

1.2.5 Dynamický rozsah

Dynamický rozsah (DR) obrazového senzoru udává poměr nejvyššího možného ziskatelného signálu (mimo saturace), k nejmenšímu možnému detekovatelnému signálu, který je omezen šumem. Lze ho tedy vyjádřit vztahem:

$$DR = 20 \cdot \log(N_{\text{sat}}/N_{\text{noise}}), \quad (7)$$

kde N_{sat} vyjadřuje kapacitu pixelu uvedenou v počtu elektronů a N_{noise} vyjadřuje součet všech šumů přičítajících se k signálu vyjádřených také v počtu elektronů. [zdroj 9]



Obr. 7 Proměnné, ovlivňující dynamický rozsah obrazového senzoru [zdroj 9]

1.2.6 Účinnost

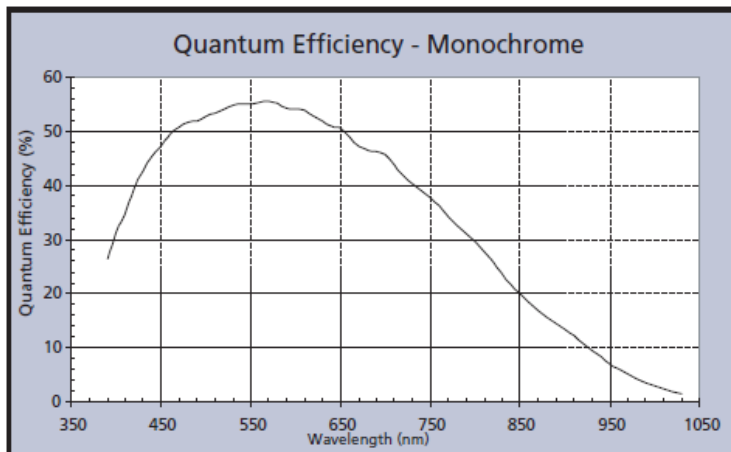
„*Kvantová účinnost fotodetektoru η ($0 \leq \eta \leq 1$) je definována jako pravděpodobnost, že jeden foton dopadající na čidlo generuje pár nosičů, které přispívají k proudu detektorem. Jestliže současně dopadá mnoho fotonů, η je rovno poměru toku generovaných párů elektron-díra, které přispívají k proudu detektorem, k dopadajícímu toku fotonů. Všechny fotony nevytvářejí elektron-děrové páry, protože všechny nejsou absorbovány. Některé fotony prostě nejsou absorbovány v důsledku náhodné povahy absorpčního procesu. Jiné se mohou odrazit od povrchu detektoru a dále tak snížit kvantovou účinnost. Navíc, některé páry elektron-díra, vytvořené v blízkosti povrchu detektoru, rychle rekombinují kvůli velké koncentraci rekombinačních center v těchto místech a nemohou tak přispívat k proudu detektorem.*

Kvantovou účinnost je možno vyjádřit vztahem:

$$\eta = (1 - \mathfrak{R}) \cdot \zeta \cdot [1 - \exp(-\alpha \cdot d)], \quad (8)$$

kde \mathfrak{R} je optická výkonová odrazivost povrchu, ζ je faktor vyjadřující podíl párů elektron-díra, které přispívají k proudu detektorem, α je koeficient absorpce materiálu (cm^{-1}) a d je tloušťka fotodetektoru.

Kvantová účinnost η je funkcí vlnové délky v zásadě proto, že koeficient absorpce α závisí na vlnové délce.“ [zdroj 5]



Obr. 8 Závislost kvantové účinnosti senzoru MT9M001 na vlnové délce [zdroj 10]

1.3 Objektiv

Použitý objektiv v kameře velice ovlivňuje výslednou kvalitu obrazu. Při výběru objektivu musíme dle typu kamery dodržet:

- typ závitu, resp. bajonetu,
- velikost plochy, kterou dokáže objektiv vykreslit (dle velikosti a formátu obrazového senzoru).

Dle vlastních požadavků na výsledné parametry obrazu musíme při výběru objektivu dále dodržet:

- vhodnou ohniskovou vzdálenost (dle úhlu záběru),
- přípustnou světelnost (minimální možnou použitelnou clonu),
- minimální možnou vzdálenost pro zaostření,
- vhodnou rozlišovací schopnost,
- přípustné geometrické a optické vady.

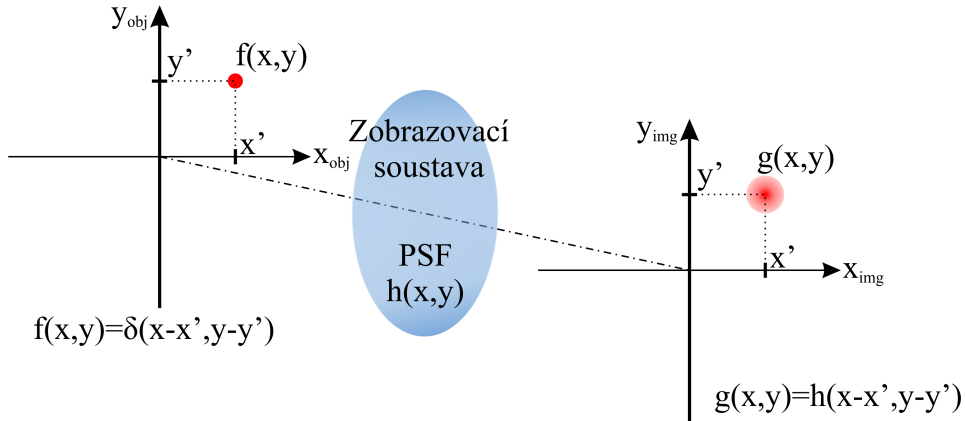
Kvalita objektivu je dána materiálem a zpracováním použitých čoček, geometrickou přesností jejich vzájemného umístění a také mechanickou konstrukcí, zaručující přesné pohyby při ostření (příp. také při změně ohniskové vzdálenosti). Pro kompenzaci geometrických vad a zlepšení optických vlastností se v objektivě používá větší množství čoček různých tvarů a materiálů, např. také asférických čoček, APO čoček apod.

U objektivů můžeme pro posouzení jejich vlastností měřit následující parametry:

- rozlišovací schopnost,
- hloubku ostrosti,
- geometrické a optické vady zobrazení.

1.3.1 Rozlišovací schopnost

Jak již bylo uvedeno v kapitole 1.1 „Kamera jako celek“, *OTF*, která je definována jako Fourierova transformace prostorové impulsové odezvy *PSF*, je základním měřítkem kvality optických systémů.

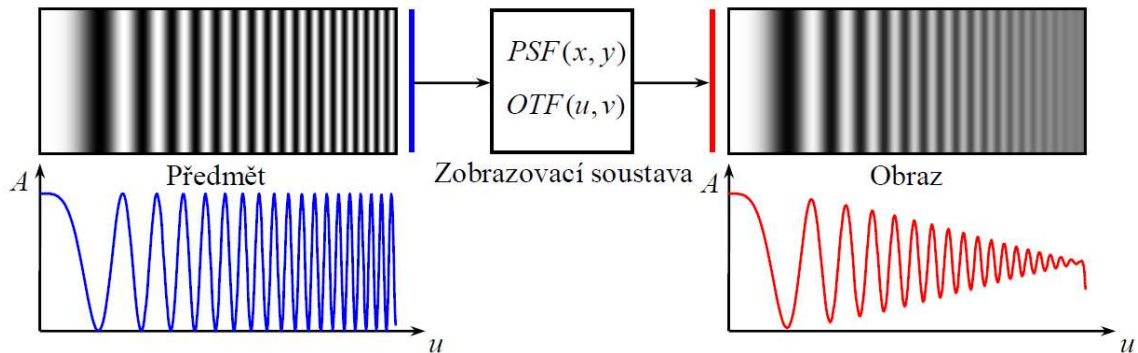


Obr. 9 Prostorová impulsová odezva zobrazovací soustavy [dle zdroje 4 a 11]

Mezi předmětem na vstupu zobrazovací soustavy a obrazem na jejím výstupu platí vztah:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y), \quad (9)$$

kde výsledné prostorové rozložení jasu v obrazové rovině $g(x,y)$ je dáno konvolucí prostorového rozložení jasu v předmětové rovině $f(x,y)$ a impulsové odezvy $h(x,y)$, označované jako *PSF*.



Obr. 10 Znázornění přenosu kontrastu zobrazovací soustavou [zdroj 4]

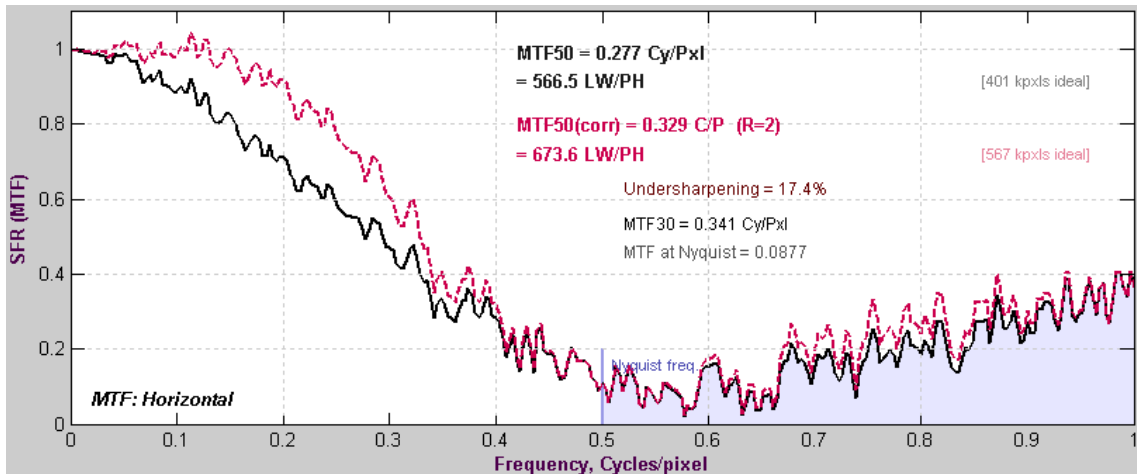
Výstupem zobrazovací soustavy je v případě sinusového obrazce na vstupu opět sinusový obrazec. Omezená prostorová rozlišovací schopnost systému způsobí snížení kontrastu na výstupu M_o oproti kontrastu na jeho vstupu M_i , což vyjadřuje veličina nazývaná jako přenos modulace *MT* (Modulation Transfer)

$$MT = M_o / M_i . \quad (10)$$

Modulační přenosová funkce MTF je dána kmitočtovou závislostí přenosu modulace

$$MT \equiv M_o(u, v) / M_i(u, v), \quad (11)$$

kde u, v jsou prostorové kmitočty. MTF se obvykle udává jako poměrná charakteristika normovaná pro nulový prostorový kmitočet k jedné. [zdroj 4]



Obr. 11 Náměr MTF z programu Imatest

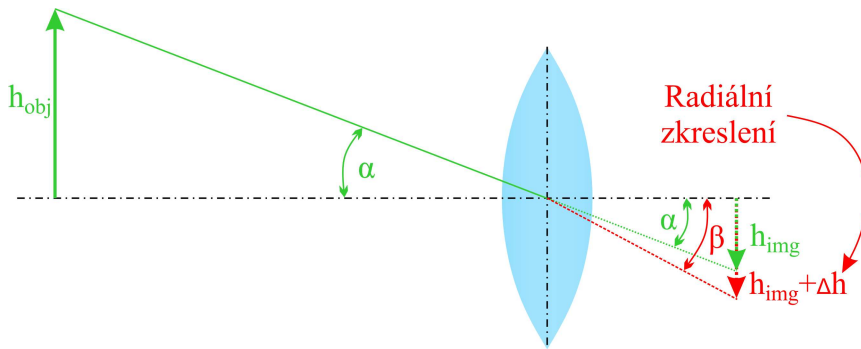
1.3.2 Hloubka ostrosti

Promítáním bodu objektivem z předmětové roviny do obrazové roviny nedostaneme opět bod, ale malou plošku. To je způsobeno působením ohybových jevů a nedokonalostí objektivu. Jednotlivé detaily předmětu budou na snímač promítnuty objektivem nejlépe za předpokladu, že snímač bude umístěn právě v místě, kde se vytváří obraz, jehož poloha je dána zobrazovací rovnicí. Pokud je potřeba, aby se objektivem najednou snímaly objekty umístěné v různých vzdálenostech, musí se objektiv nastavit tak, aby předměty v jistém rozsahu vzdáleností od objektivu jím byly promítnuty na snímač s přijatelným zhoršením detailů. Uvedený rozsah vzdáleností se označuje jako tzv. hloubka ostrosti zobrazení. [zdroj 8]

1.3.3 Geometrické a optické vady

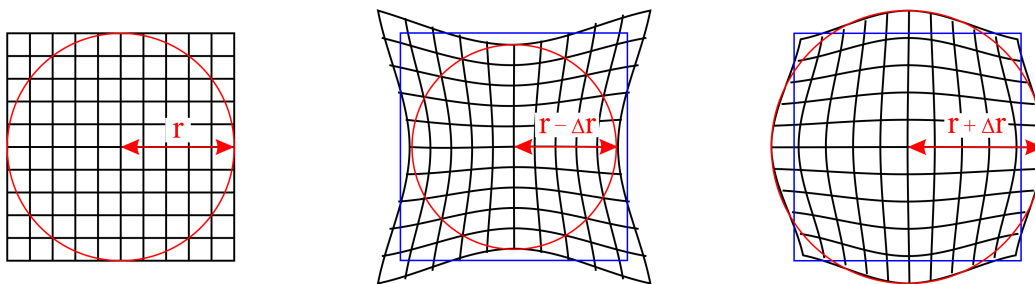
Radiální zkreslení

Jedná se o geometrické zkreslení, které se nejvíce projevuje u objektivů s malou ohniskovou vzdáleností. Vzniká rozdílným lomem světla pro různé polohy paprsků vůči optické ose. Velikost této chyby roste se vzdáleností od středu optické osy. Situaci znázorňuje obr. 12.



Obr. 12 Vysvětlení vzniku radiálního zkreslení

Podle směru úhlu odklonění vzniká radiální zkreslení polštářkové, nebo soudkovité.



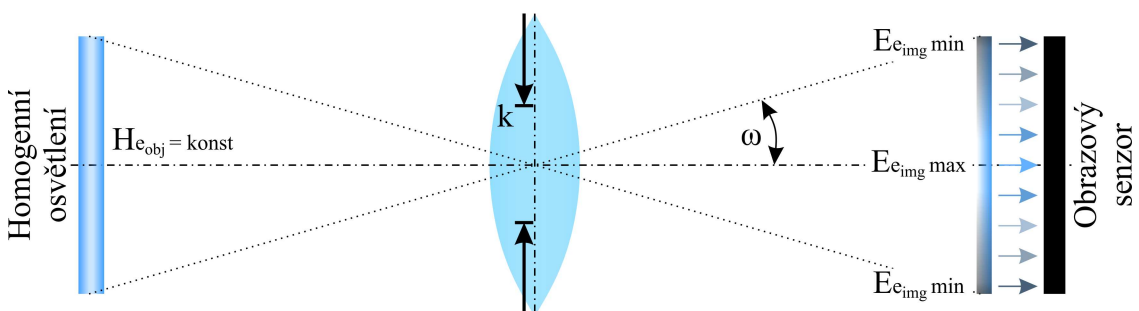
Obr. 13 a) bez radiálního zkreslení, b) polštářkové zkreslení, c) soudkovité zkreslení

Vinětace

Činitel $\cos^4 \alpha$ popisuje přirozenou vinětaci, jejíž popis je uveden na následujícím obrázku. U reálných objektivů se k přirozené vinětaci přidává také vinětace objektivu, kdy jsou paprsky přicházející do objektivu pod velkým úhlem ještě dále potlačeny.

[zdroj 8].

Dále se může vinětace zhoršit použitím přidavných prvků objektivu, např. sluneční clony, nebo filtrů, které výškou své příruby zhoršují přístup šikmých paprsků do objektivu.



Obr. 14 Vinětace způsobená přechodem světelných paprsků optickou soustavou

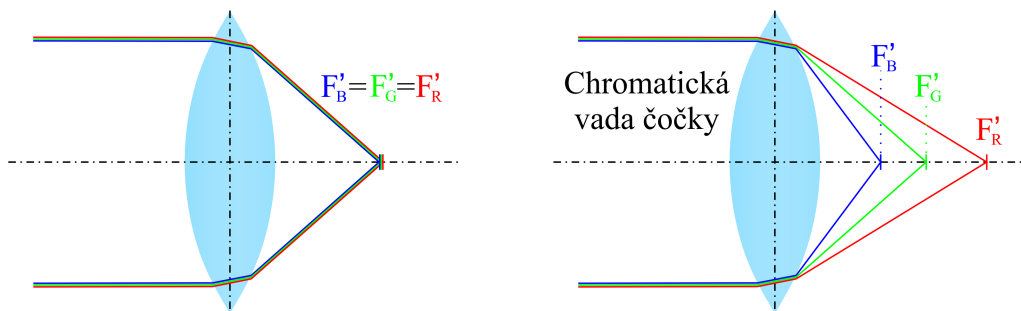
Intenzitu ozáření obrazového senzoru Ee_{img} v jeho různých místech lze určit dle vztahu

$$Ee_{\text{img}} = \frac{\tau_{\text{obj}} \cdot \cos^4 \omega}{4 \cdot k^2 (1 - \beta'^2)} \cdot He_{\text{obj}} \quad , \quad (12)$$

kde He_{obj} je intenzita vyzařování osvětlovače, τ_{obj} je činitel propustnosti objektivu, k je nastavené clonové číslo a β' představuje zvětšení.

Chromatická vada

Vzniká v důsledku závislosti indexu lomu na vlnové délce světelného záření. Tato chyba se zvětšuje s přibývajícím vzdáleností paprsků směrem dál od optické osy, z čehož vyplývá, že je na obrazu nejvíce patrná po jeho krajích. Tam se projevuje barevným rozmazáním, jinak ostrých obrazových hran.



Obr. 15 Čočka a) bez chromatické vady, b) s chromatickou vadou

Obrázek 15a znázorňuje zobrazení ideální čočkou bez vad. Protože každá čočka má chromatickou vadu (znázorněno na obr. 15b), tak se pro její snížení v objektivách používají speciální apochromatické čočky skládající se z více druhů skel.

2 Převodní charakteristika obrazového snímače

Jak již bylo načrtnuto v kapitole „rozbor problematiky“, převodní charakteristika popisuje závislost výstupního signálu kamery na intenzitě jejího vstupního osvětlení. Protože na převodní charakteristice závisí správnost provádění dalších měření, jsou její popis a navržené metodiky měření včleněny před ostatní funkce.

Měření převodní charakteristiky lze provádět např. těmito způsoby:

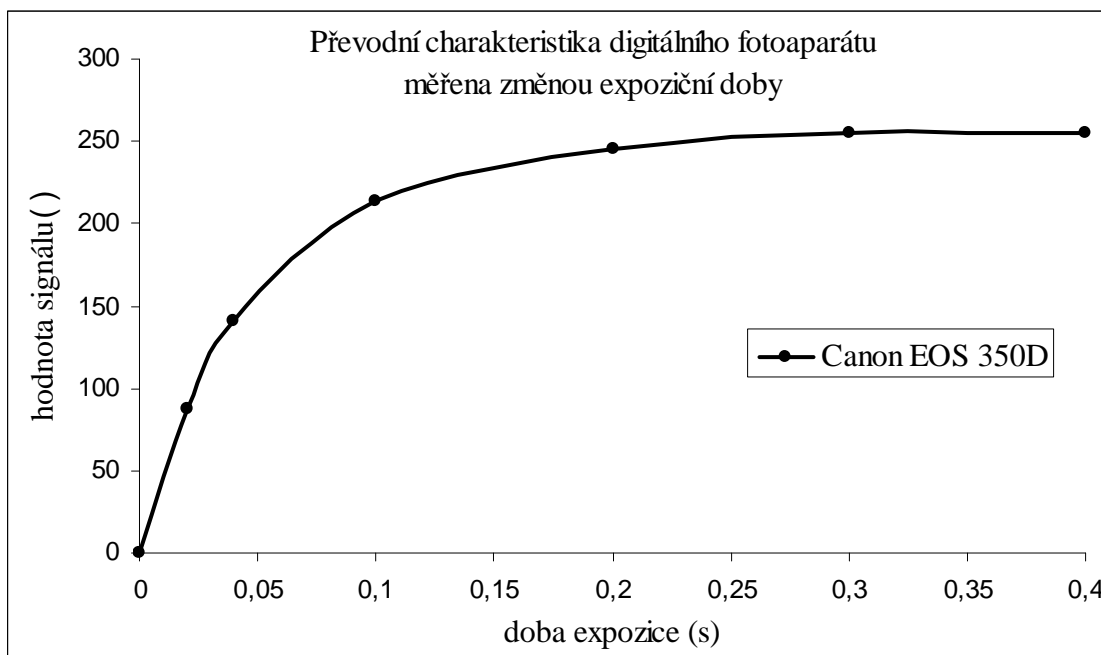
- změna časové délky integrace kamery při snímání konstantně osvětleného předmětu
- změna intenzity osvětlení snímaného předmětu při konstantně nastavených expozičních parametrech
- změna dalších parametrů ovlivňujících expozici, např. velikosti clony nebo zesílení signálu kamery, při snímání konstantně osvětleného předmětu

Poslední uvedená možnost v této práci využita nebude z následujících důvodů. Při změně zaclonění objektivu je většinou obsluha odkázána na popisek velikosti nastavené clony vůči ryse. Tento způsob nastavení tedy nelze provádět s velkou přesností a opakovatelností. Při změně zesílení signálu sice opakovatelnost nastavení problémem není, problémem jsou ovšem různorodé možnosti nastavení zesílení u jednotlivých kamer.

2.1 Měření převodní charakteristiky změnou expoziční doby

Tento způsob měření byl v této práci využíván pouze v jejích začátcích. Metodou změny délky expozice při snímání konstantního osvětlení byla změřena digitální zrcadlovka Canon EOS 350D, která byla v průběhu měření pevně uchycena ve stativu a nasměrovaná na negatoskop (přístroj, který se v medicíně využívá pro podsvícení rentgenových filmů). Protože negatoskop využívá pro osvětlení zářivky, zapojené do běžné zásuvky, musela být z důvodu odstranění chyby měření, způsobené blikáním světelného zdroje, pro každý náměr použita expoziční doba, jejíž hodnota musela být celočíselným násobkem periody síťového napětí. V opačném případě by byla do měření zanesena chyba, skládající se z nelineárně rozloženého výkonu jasu v průběhu periody harmonického signálu. Tato nutná podmínka měření nám u přístrojů, která neumožňují plynulé nastavení doby integrace, ale mají pevně nastavené možnosti volby expozice, velice omezuje výběr expoziční hodnoty. Nejkratší expoziční doba může být 20ms, nejdelší je omezena saturací obrazového snímače.

Náměr zmiňovaného fotoaparátu je uveden na následujícím obrázku. Pro měření byly použity expoziční doby {20ms, 40ms, 100ms, 200ms, 300ms, 400ms}. Bod pro délku expozice 0ms se signálem 0 je do grafu doplněn pouze pro ucelení křivky náměru, jinak samozřejmě smysl nemá. Hodnoty uvedené v grafu byly vypočteny z jednotlivých obrazů pomocí programu napsaného ve vývojovém prostředí Matlab. Z uvedeného grafu na obr. 16 je vidět, že rozmezí použitelné expoziční doby, tj. mezi minimálně možnou použitelnou dobou a dobou takovou, ve které již docházelo k saturaci, umožnilo měření pouze v pěti bodech.



Obr. 16 Měření převodní charakteristiky změnou expoziční doby digitálního fotoaparátu

Odstranění výše popsaného problému malého využitelného počtu expozičních dob, lze odstranit konstrukcí světelného zdroje napájeného stejnosměrným proudem. V takovém případě by mohlo být měření převodní charakteristiky prováděno od nejnižší možné expoziční doby přístroje, až do doby, u které již dochází k saturaci. Výhodnější možností je ale konstrukce říditelného světelného zdroje, u kterého lze využívat při měření stálou hodnotu nastavené expozice. Tato možnost bude popsána v následující kapitole.

2.2 Měření převodní charakteristiky změnou vstupního jasů

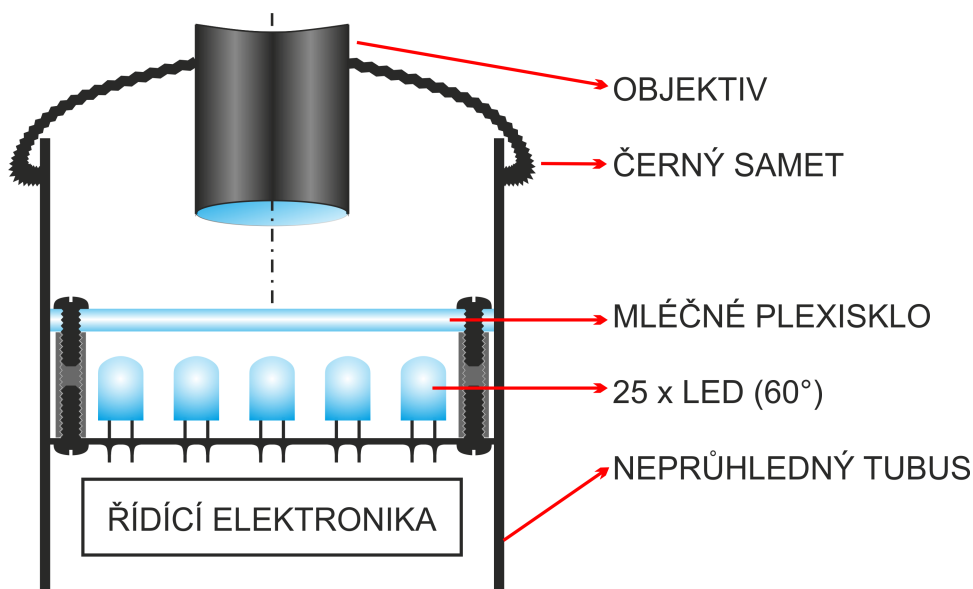
Pro toto měření bylo potřebné vytvořit osvětlovač, jehož jas lze řídit z počítače. Samotné řízení výkonu LED umístěných v osvětlovači je prováděno pomocí řídicí desky, jejíž popis je uveden v kapitole 8.

2.2.1 Řízený osvětlovač

Tento přípravek slouží zejména pro účely měření převodní charakteristiky obrazového senzoru. Obsahuje matici 5x5 na plošném spoji osazených bílých LED, jejichž výkon je řízený pomocí pulsně šířkové modulace (PWM) z řídicí desky. Použité LED jsou v difúzním pouzdře o průměru 5mm, s vyzářovacím úhlem 60° a s uváděnou svítivostí 2500mcd.

Pro navrženou metodiku měření převodní charakteristiky není nutnou podmínkou dosažení homogenního osvětlení po celé ploše osvětlovače, protože měření se provádí pouze z malé plochy obrazu. Použití samotných LED umístěných symetricky v matici by i přesto bylo nevyhovující. Proto je nad LED umístěné mléčné difúzní plexisklo, které sice způsobuje částečný útlum jasu, ale pomáhá dosáhnout lepší homogenitu osvětlení.

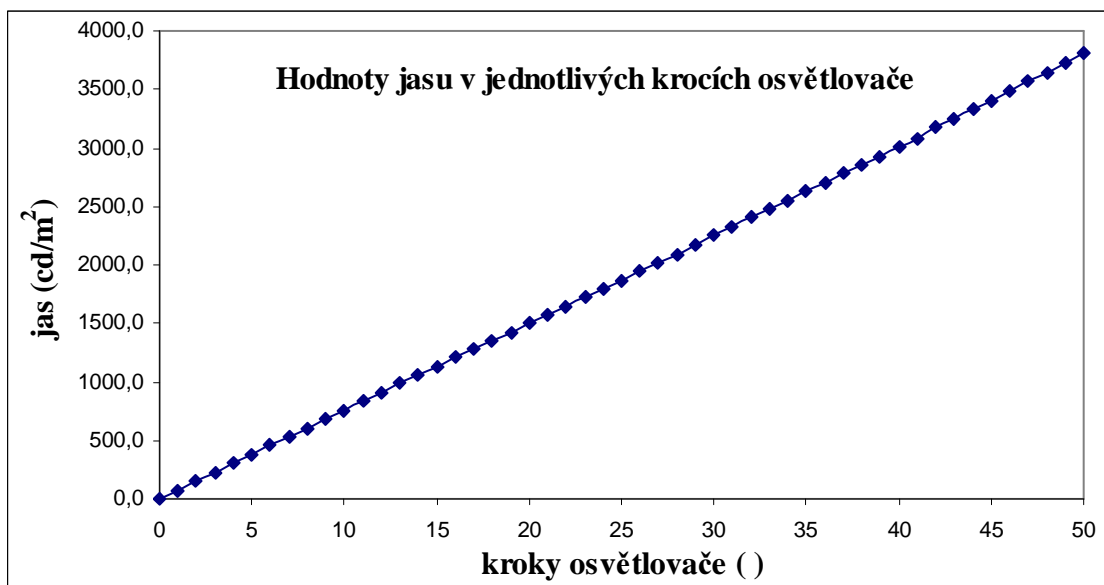
Na obr. 17 je znázorněné blokové uspořádání jednotlivých prvků řízeného osvětlovače. Nosnou konstrukci tvoří plastový tubus o průměru 110 mm, uvnitř kterého je po vnitřním obvodu tavnou pistolí přilepeno mléčné plexisklo. Na něm jsou po obvodu symetricky ve čtyřech místech uchyceny distanční sloupky, na které je přichycen plošný spoj s LED, jak je vidět na blokovém obrázku. Řídící elektroniku tvoří univerzální řídicí deska, která není přímo umístěná v tubusu osvětlovače, ale je připojená externě, z důvodu jejího víceúčelového využití.



Obr. 17 Průřez přípravku řízeného osvětlovače

Při 100% výkonu osvětlovače byla jasoměrem naměřená hodnota jasu 3800 cd/m^2 . V tomto i při dalších měřeních jasu byl použit přístroj Unfors Luxi [zdroj 12]. Dle programu v řídicí desce lze výkon osvětlovače měnit různě. V současné verzi programu je to lineární řízení změny jasu ve 26 nebo 51 krocích. PWM signál běží s frekvencí 16 kHz.

Při měření s použitím tohoto přípravku je vhodné objektiv umístit co nejbližší k mléčnému plexisklu, aby měřená plocha jasu byla snímána z co nejmenší plochy osvětlovače a tím byla zaručena co možná nejlepší homogenita měřené oblasti. K řízenému osvětlovači je jako příslušenství udělána černá sametová krytka ve tvaru rukávu, která má z jedné strany všitou gumu pro pevné uchycení po obvodu tubusu osvětlovače a z druhé strany provázek pro stažení kolem těla objektivu. Tuto krytku je vhodné při měření využívat z důvodu potlačení rušivého okolního osvětlení. Obr. 18 znázorňuje hodnoty jasu pro jednotlivé kroky osvětlovače.



Obr. 18 Naměřené hodnoty jasu řízeného osvětlovače pro jednotlivé kroky

2.2.2 Měření převodní charakteristiky programem

Pokud chceme změřit převodní charakteristiku pomocí změny intenzity jasu řízeného osvětlovače, můžeme k tomu v programu využít funkci pro měření převodní charakteristiky, která obsluhuje kameru i řízený osvětlovač. Funkce si hlídá připojení těchto zařízení a spuštění měření je možné pouze po jejich úspěšném připojení.

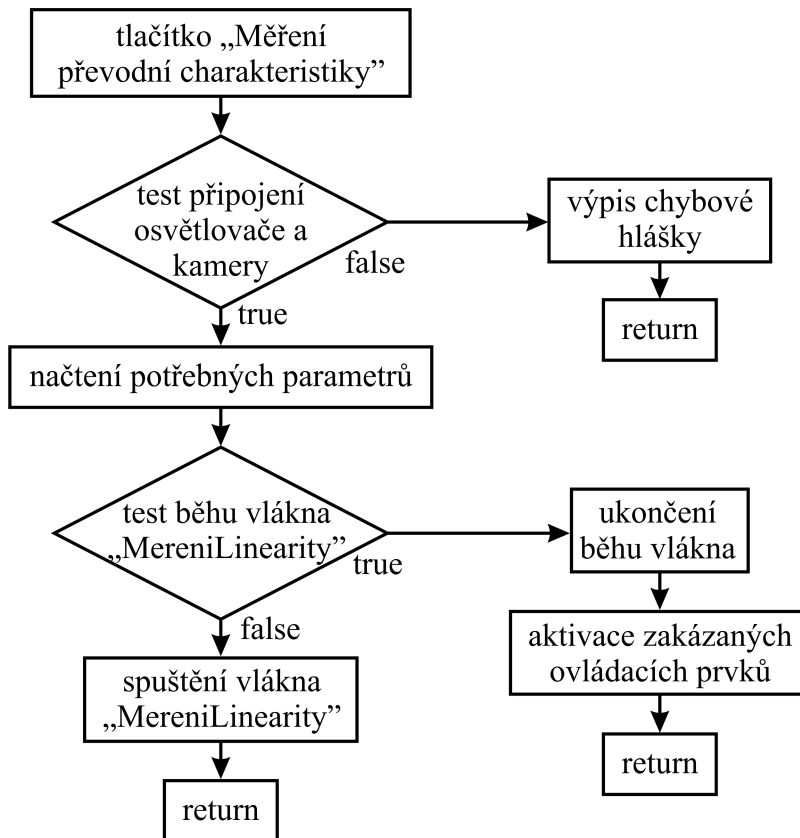
Měření se spouští pomocí hlavního menu výběrem „Metodika testu – měření převodní charakteristiky“. Po pravé straně obrazovky se zobrazí příslušné panely, obsahující informační prvky a prvky pro nastavení parametrů měření. Důležitý je také řádek „Podmínky měření“, ve kterém je označen stav připojení kamery a řízeného osvětlovače. Po splnění podmínek měření se aktivuje panel obsahující také tlačítko pro započítání měření převodní charakteristiky.

Před samotným začátkem měření je možnost nastavit počet „zahozených snímků“ N_z před měřením, tj. snímků, které jsou kamerou přijaty, ale do samotného měření zahrnuty nejsou. Tato možnost je přidána hlavně z důvodu měření web-kamer. U jedné z měřených webkamer bylo totiž zjištěno, že prvních 18 přijatých snímků z kamery byly snímky černé a až poté kamera začala posílat snímky s reálnými obrazovými daty.

Dále lze nastavit počet snímků pro průměrování N_p . Samotné měření převodní charakteristiky lze provádět ve 26, nebo 51 krocích N_k . Počet snímků potřebných pro náměr N_c je tedy:

$$N_c = (N_p * N_k) + N_z . \quad (13)$$

Obr. 19 znázorňuje průběh akcí po stisku tlačítka pro měření převodní charakteristiky. Samotné měření je prováděno v samostatném vlákně.



Obr. 19 Vývojový diagram měření převodní charakteristiky

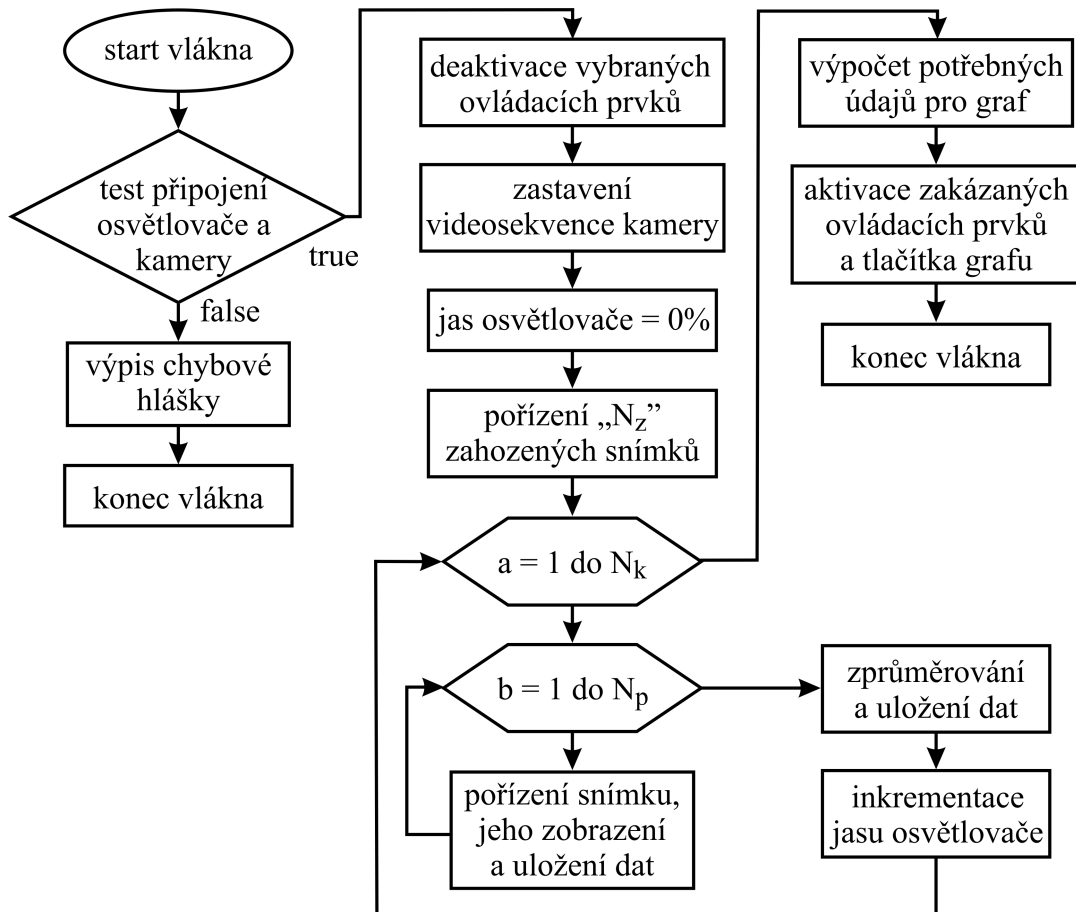
Vlákno pro měření převodní charakteristiky

Stiskem tlačítka „Měření převodní charakteristiky“ se načtou nastavené konstanty potřebné k měření a zkontroluje se, zdali je připojená kamera a osvětlovač. V případě, že je vše splněno, vynuluje se jas osvětlovače, zastaví se režim videosekvence kamery a vytvoří se nové vlákno „MereniLinearity“. V opačném případě se vypíše příslušná chybová hláška.

Po spuštění vlákna deaktivuje ovládací prvky, pomocí kterých by změnou jejich příslušných hodnot došlo k narušení výsledků měření. Následně je spuštěn cyklus, jehož délka je dána počtem N_k . V něm se spustí další cyklus délky N_p , ve kterém se z kamery vyžádá snímek a následně vlákno čeká až do doby úspěšného přijetí snímku. Z každého přijatého snímku se ukládá zvolené dvourozměrné pole $[10 \times 10]$ pixelů do meziproměnné MP_{pch} , kterou tvoří trojrozměrné pole a jejíž velikost je $[10 \times 10 \times N_p]$. Po ukončení cyklu délky N_p se uložené náměry zprůměrují dle vztahu

$$UP_{pch}(k)[i,j] = \left(\sum_{x=0}^{N_p-1} MP_{pch}[i,j,x] \right) / N_p \quad (14)$$

a uloží se do pole o velikosti $[10 \times 10 \times N_k]$ jako výsledek $UP_{pch}(k)$ při aktuálně nastaveném jasu k . Poté je inkrementována hodnota jasu osvětlovače dle volby počtu N_k . Konkrétně pro $N_k = 51$ se hodnota jasu zvýší o 2%, pro $N_k = 26$ se zvýší o 4%. Situaci znázorňuje obr. 20, ve kterém je zjednodušený vývojový diagram samotného vlákna pro měření převodní charakteristiky.



Obr. 20 Vývojový diagram vlákna pro měření převodní charakteristiky

Vlákno měření převodní charakteristiky lze kdykoliv, např. z důvodu, že došlo k chybnému nastavení parametrů kamery, ukončit. Ukončením vlákna jsou všechny deaktivované ovládací prvky zpátky aktivovány, čímž lze změnit parametry a opět spustit měření, nebo zvolit jinou funkci programu.

Měření je ukončeno po úspěšném nasnímání a uložení výsledků UP_{pch} ze všech zvolených kroků N_k . Tento moment je signalizován naplněním bargrafu, signalizujícího stav měření a zaktivněním tlačítka pro zobrazení grafu náměru.

Výpočty a zobrazení výsledků převodní charakteristiky

Uložené pole výsledků UP_{pch} obsahuje náměry všech měřených pixelů pro všechny hodnoty jasu. Z těch se pro získání křivky převodní charakteristiky obrazového senzoru jako celku vypočtou průměrné hodnoty signálu pro jednotlivé jasové složky k a uloží do proměnné $V_{pch-str}$ dle vztahu:

$$V_{pch-str(k)} = \left(\sum_{i=1}^{10} \left(\sum_{j=1}^{10} UP_{pch(k)}[i,j] \right) \right) / (i * j), \quad (15)$$

kde i je počet řádků a j je počet sloupců měřeného pole, v našem případě 10x10 bodů.

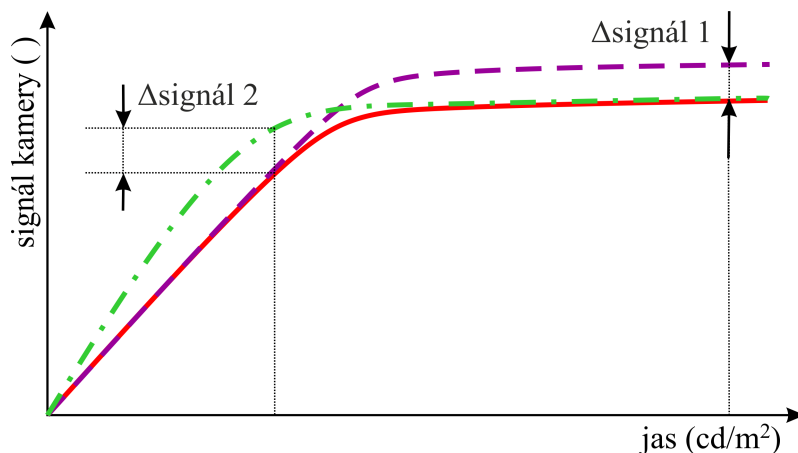
U obrazového senzoru nemají jednotlivé pixely stejnou citlivost, proto se při měření převodní charakteristiky, pro získání informace o velikosti jejího rozdílu, vypočtou pixely s nejnižší ($V_{\text{pch-min}}$) a nejvyšší ($V_{\text{pch-max}}$) citlivostí dle vztahů:

$$V_{\text{pch-min}} = \min \left\{ \left(\sum_{k=0}^{N_k-1} UP_{\text{pch}}[i,j,k] \right)_{j=1}, \left(\sum_{k=0}^{N_k-1} UP_{\text{pch}}[i,j,k] \right)_{j=2}, \dots, \left(\sum_{k=0}^{N_k-1} UP_{\text{pch}}[i,j,k] \right)_{j=10} \right\} \quad (16)$$

$$V_{\text{pch-max}} = \max \left\{ \left(\sum_{k=0}^{N_k-1} UP_{\text{pch}}[i,j,k] \right)_{j=1}, \left(\sum_{k=0}^{N_k-1} UP_{\text{pch}}[i,j,k] \right)_{j=2}, \dots, \left(\sum_{k=0}^{N_k-1} UP_{\text{pch}}[i,j,k] \right)_{j=10} \right\} \quad (17)$$

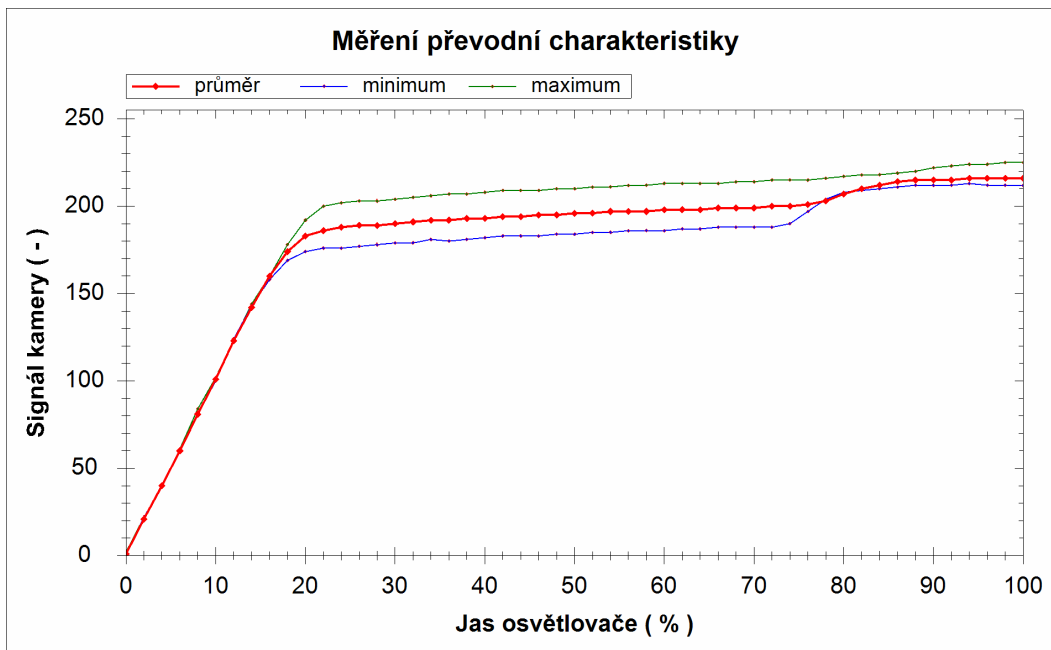
Dle uvedených vztahů (16, 17) se vypočtou plochy grafu převodní charakteristiky jednotlivých pixelů, ze kterých se určí grafy s minimální a maximální plochou. Výpočet extrémů pomocí plochy grafu byl zvolen kvůli eliminaci lokálních nepřesností měření, způsobených např. šumem.

Obr. 21 znázorňuje předpoklad náměrů převodních charakteristik pro pixely s různou citlivostí. Jak ukážou následující náměry, rozdíly jsou nejbližší podobné vzájemnému porovnání křivek označených plnou oranžovou a přerušovanou fialovou čarou.



Obr. 21 Znázornění uvažovaných odchylek při měření převodní charakteristiky

Na následujících obrázcích (obr. 22 až obr. 25) jsou vidět převodní charakteristiky kamery ViSor. Křivka vykreslená hrubou červenou čarou představuje průměrnou převodní charakteristiku $V_{\text{pch-str}}$, modrá křivka představuje minimální $V_{\text{pch-min}}$ a zelená křivka maximální $V_{\text{pch-max}}$ převodní charakteristiku.

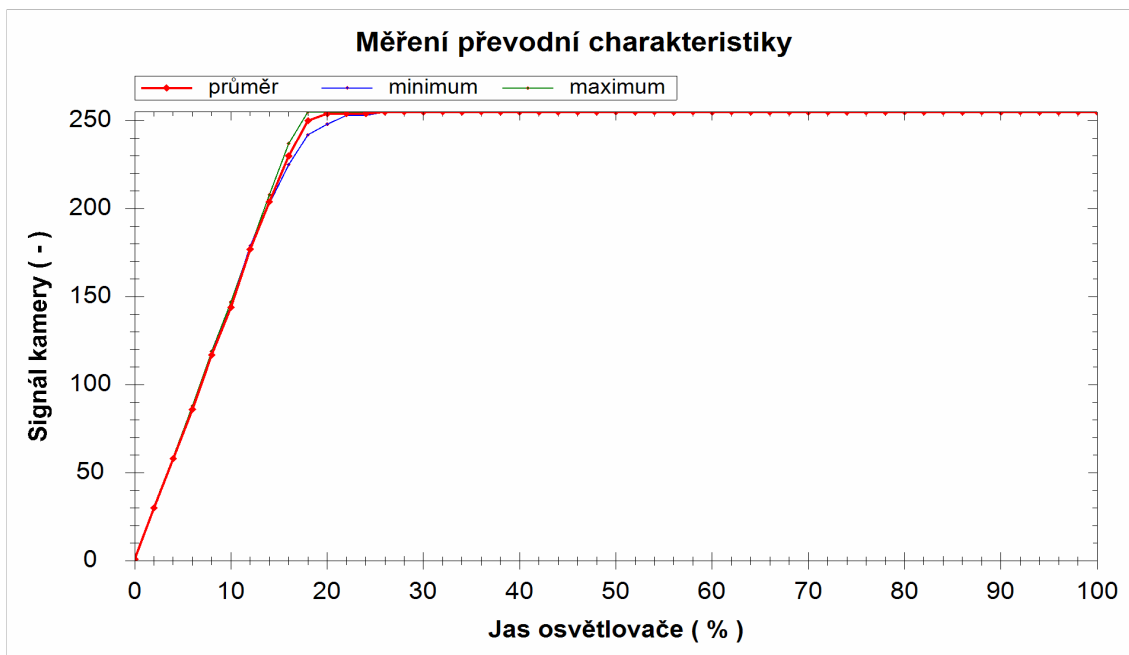


Obr. 22 Převodní charakteristika kamery ViSor, doba integrace 40ms; zesílení 1; par.A

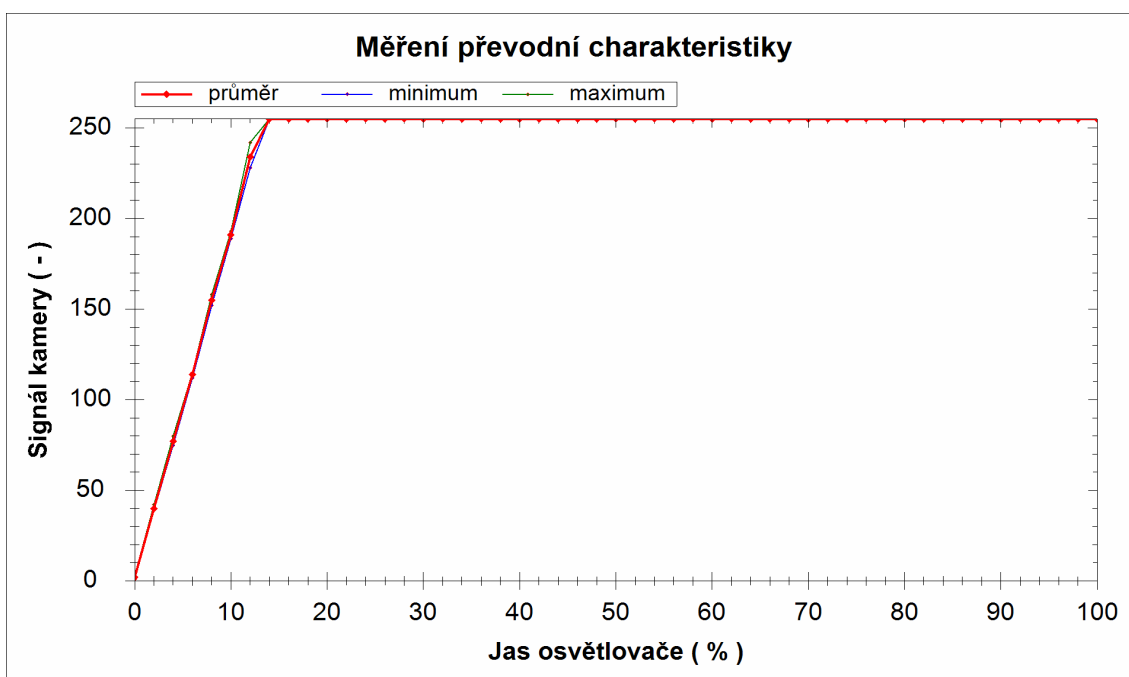
V uvedeném grafu převodní charakteristiky se zesílením 1 (obr. 22) lze pozorovat dvě zajímavosti. Zaprvé je vidět, že převodní charakteristika je lineární pouze do určité jasové oblasti a poté dochází k prudkému poklesu citlivosti. Zadruhé můžeme za kolenem zlomu pozorovat, v jakém rozmezí se pohybuje citlivost jednotlivých měřených pixelů.

Nelinearita převodní charakteristiky má své výhody i nevýhody. Záleží, na jaké účely je kamera využívána. Výhodou je, že nelineární převodní charakteristika zvyšuje dynamický rozsah kamery, což je využíváno také v digitálních fotoaparátech. Pro účely měření kamerou je nelineární převodní charakteristika nevýhodou v případech, kdy potřebujeme zjistit vstupní jasovou hodnotu ze signálu kamery, nebo když pro převzorkování využíváme lineární interpolaci. V takovém případě musíme buďto využít pouze lineární část před kolenem zakřivení, čímž ovšem nebudeme plně využívat jasový rozsah kamery, nebo zvýšit zesílení kamery a tím získat lineární závislost signálu kamery na vstupním jasu v celém jejím rozsahu.

Následující dva grafy na obrázcích (23, 24) jsou měřeny při stejně nastavených parametrech kamery, jako u předchozího grafu, měnilo se pouze zesílení a to na hodnoty 1,5 a 2. V názvech obrázků jsou tyto přednastavené parametry uvedeny pod pojmem „par.A“.

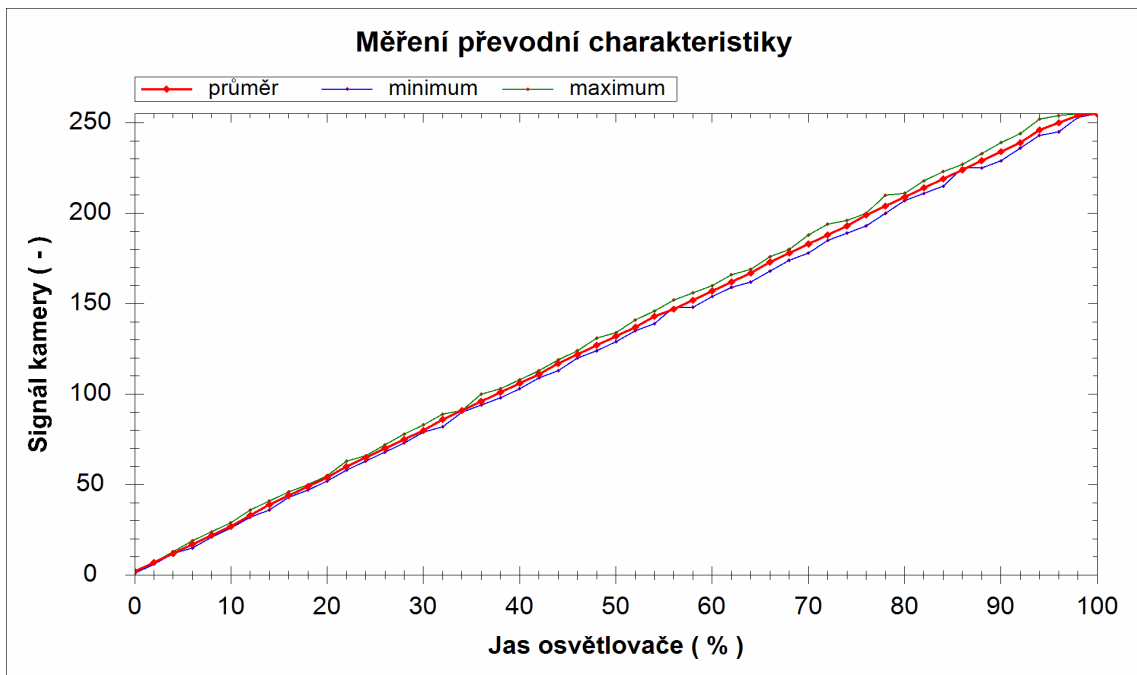


Obr. 23 Převodní charakteristika kamery ViSor, doba integrace 40ms; zesílení 1,5; par.A



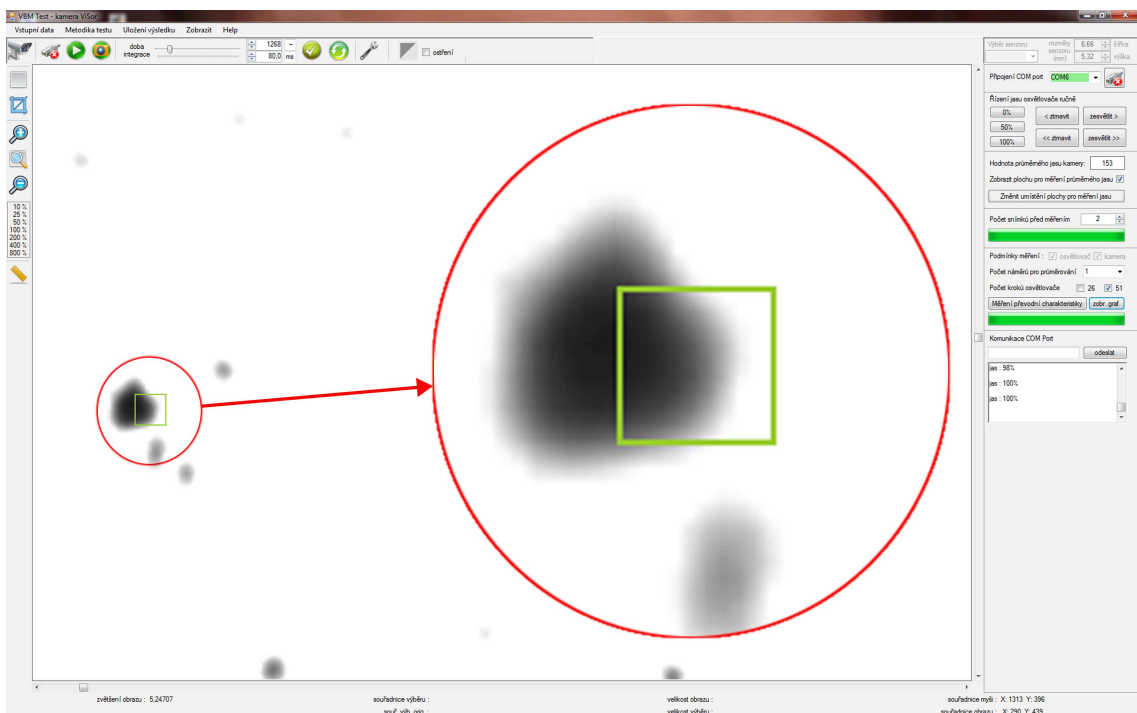
Obr. 24 Převodní charakteristika kamery ViSor, doba integrace 40ms; zesílení 2; par.A

Protože při vyšším zesílení docházelo k saturaci již při velmi nízkém jasu osvětlovače, byla změněna clona tak, aby k saturaci došlo až při plném výkonu osvětlovače. Z důvodu této změny jsou parametry nastavení pojmenovány „par.B“. Graf tohoto naměru je vidět na obr. 25, kde je již na první pohled vidět, že převodní charakteristika je lineární v celém měřeném rozsahu.



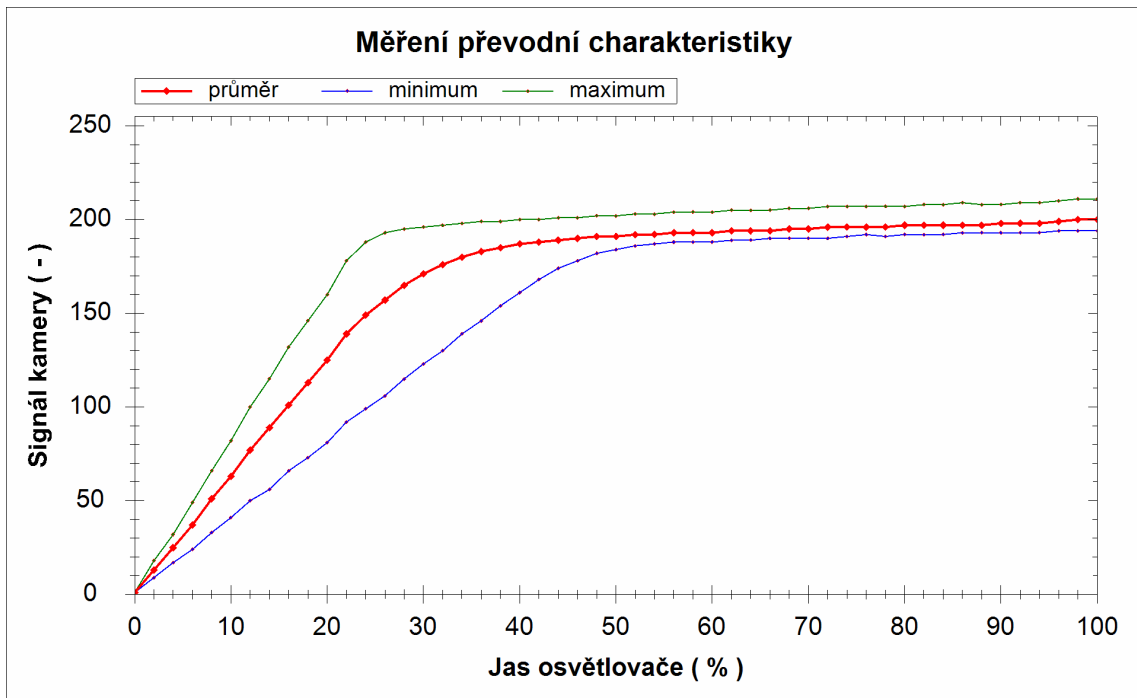
Obr. 25 Převodní charakteristika kamery ViSor, doba integrace 40ms; zesílení 2; par.B

Zobrazené převodní charakteristiky pixelů s minimální a maximální citlivostí mají vypovídající hodnotu pouze v případě, když měřená plocha 10x10 pixelů je po celé ploše osvětlována homogenním jasem. Pro tyto účely je vhodné využít funkci programu umožňující změnu místa pro měření, která umožní výběr správné oblasti. Uvažujme například prachovou částici na obrazovém senzoru, která způsobí útlum jasu. V případě zvolení takového místa, kdy v jedné části měřené plochy bude prachová částice, budou náměry minim a maxim závislé na jasových rozdílech těchto míst. Pro větší názornost bylo provedeno měření s nehomogenně osvětlenou měřenou plochou.



Obr. 26 Ukázka špatného výběru měřené oblasti

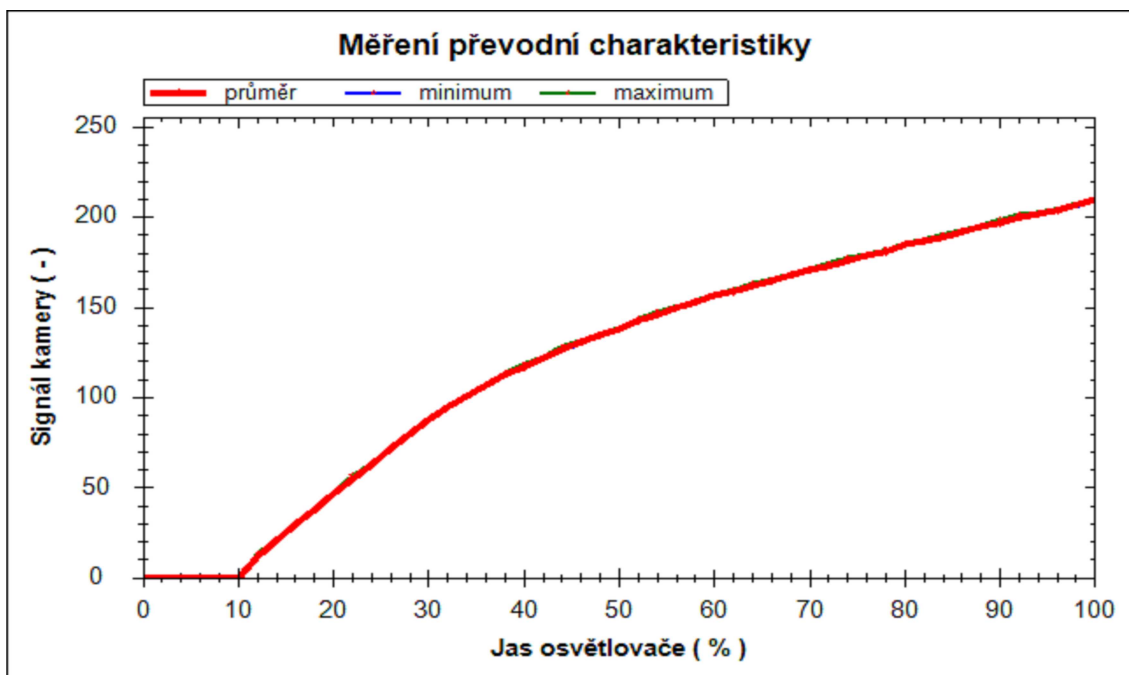
Jak je vidět na obr. 26, do měřené plochy zasahuje nečistota kamery, což způsobuje zastoupení většího rozsahu jasových složek v náměru. Na obr. 27 je graf převodní charakteristiky naměřen v takto špatně vybrané oblasti. V lineární oblasti charakteristiky mají body maxima přibližně dvakrát větší hodnoty než body minima.



Obr. 27 Převodní charakteristika měřená v místě s prachovou částicí

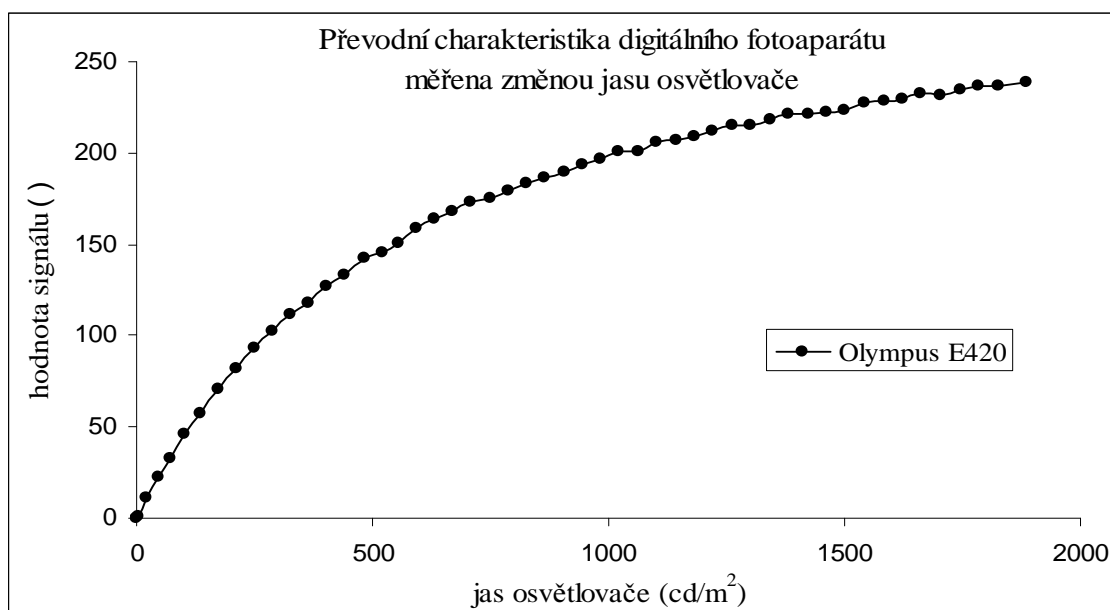
Uvedené postupy měření převodní charakteristiky s využitím vlákna se v programu využívají pro kameru ViSor. U web-kamer je postup měření shodný, ale místo využití vlákna se z důvodu použité knihovny pro komunikaci s web-kamerou využívá časovač. Zmíněnou knihovnu ve své bakalářské práci vytvořil Bc. Lipenský [zdroj 13]. Tato knihovna dále využívá knihovnu DirectShow. Pomocí těchto knihoven je možné nastavovat parametry web-kamer, dle jejich možností. Za důležitou zmínku stojí, že převodní charakteristiku lze měřit pouze s web-kamerou, která umožňuje manuální nastavení expozičních parametrů. V praxi se ukázalo, že mezi levnými web-kamerami takových mnoho není.

Obr. 28 ukazuje náměr převodní charakteristiky web-kamery, ze kterého je na první pohled patrná její nelinearita. Také došlo k „utopení“ signálu při nižších hodnotách osvětlení.



Obr. 28 Převodní charakteristika web-kamery

V programu je možnost řízení jasu osvětlovače i mimo samotné měření. Díky tomu tedy lze manuálně ovládat osvětlovač a současně manuálně snímat obraz například digitálním fotoaparátem. Tato možnost byla využita pro měření převodní charakteristiky digitální zrcadlovky Olympus E420, uvedené na obr. 29. Program ale neumožňuje automatické vyhodnocení převodní charakteristiky z načtených obrázků. Tato možnost byla zvažována, ovšem obrázky by musely nést také informaci o hodnotách jasu, při kterých byly pořízeny. Při takovémto měření lze v programu využít pouze funkci měření jasu z vybrané plochy otevřeného obrázku, přičemž se musí dbát na to, aby bylo v každém obrázku místo měření vybráno s použitím stejných souřadnic.



Obr. 29 Měření převodní charakteristiky digitálního fotoaparátu s využitím řízeného osvětlovače

V této práci bylo také prozkoumáno využití „software development kit“ u testované zrcadlovky Canon, pro umožnění dálkového řízení fotoaparátu. Ovládání však bylo nestabilní a docházelo k zamrzání fotoaparátu. Proto bylo raději rozvíjení této funkce zavrženo.

3 Šumy

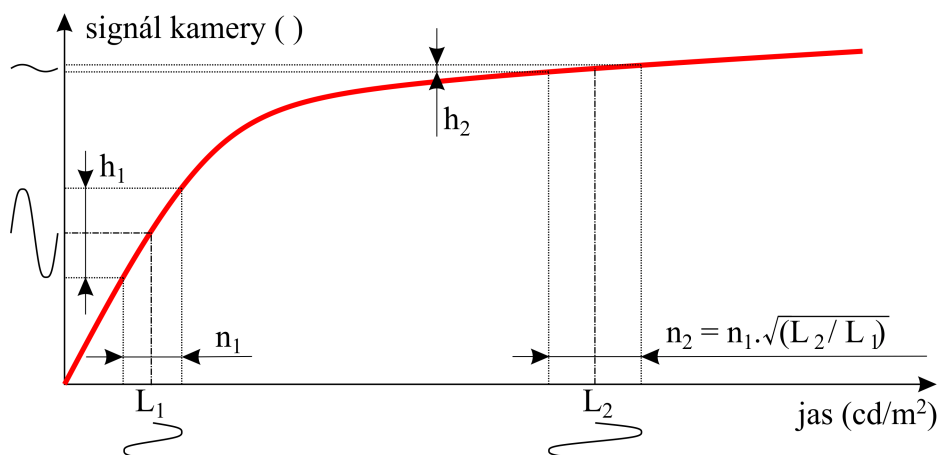
Signál kamery je závislý na množství fotonů, které dopadnou na obrazový senzor. Signál na výstupu je ovšem v praxi navíc zatížen šumem. Ten tvoří hlavně fotonový šum a dále šum samotného senzoru, který je závislý na jeho parametrech.

3.1 Měření fotonového šumu

Měření fotonového šumu se v programu spouští tlačítkem „Měření fotonového šumu“. Aby byly jeho výsledky správné, je potřeba, před samotným měřením, dodržet následující dvě podmínky.

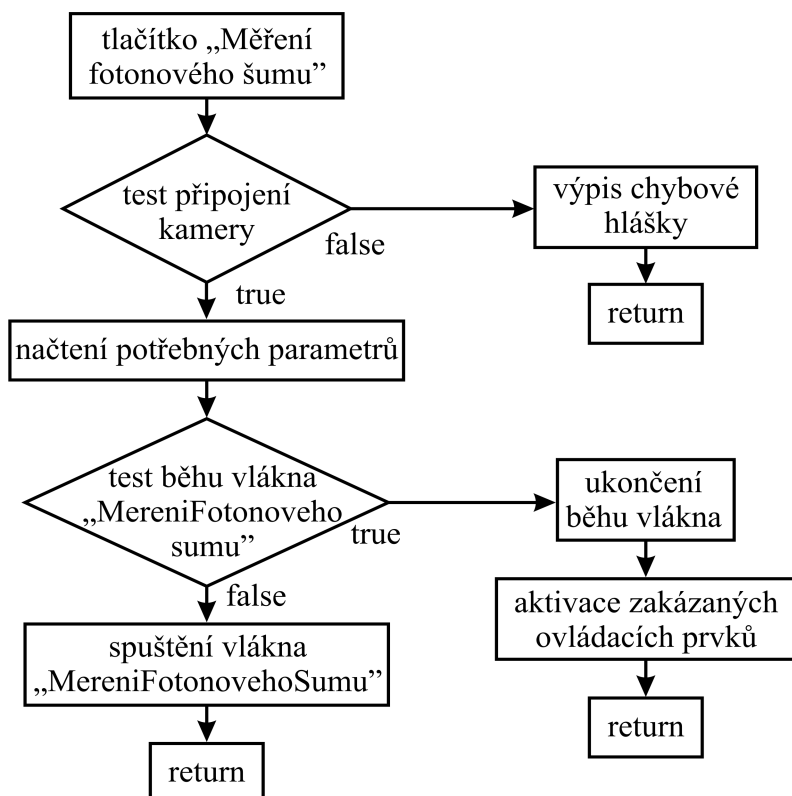
Zaprvé, v průběhu celého měření je nutné dodržet v čase konstantní osvětlení. Případné kolísání jasu by se negativně projevilo ve výsledcích měření, kde by bylo považováno za šum, čímž by se zhoršily výsledky měření. Také nesmí dojít k posouvání kamery, ani snímaného objektu, aby byla dodržena podmínka, že jednotlivé měřené pixely měří při každém náměru stejnou plochu v předmětové rovině.

Zadruhé je potřeba využít poznatky z kapitoly „Měření převodní charakteristiky“ a měření fotonového šumu provádět při nastavené expozici takové, aby se využíval pouze signál z lineární části převodní charakteristiky. Za kolenem charakteristiky se „citlivost“ (není myšleno v pravém slova smyslu) pixelu rapidně snižuje a místo náměru fotonového šumu by se měřil spíše šum kvantizační. Zmíněnou skutečnost znázorňuje obr. 30. Necht' červená křivka představuje naměřenou převodní charakteristiku kamery při aktuálně nastaveném zesílení, které bude využito také při měření fotonového šumu. Víme, že fotonový šum je roven druhé odmocnině počtu dopadajících fotonů. Necht' je pro jas L_1 hodnota fotonového šumu n_1 . Z definice pak lze vypočítat hodnotu fotonového šumu pro jas L_2 . Abychom ale tyto hodnoty mohli naměřit kamerou, musí být převodní charakteristika lineární. V opačném případě bude do měření zanesena velká chyba. Situaci znázorňuje popisovaný obrázek, ve kterém je h_1 úměrné hodnotě směrodatné odchylky pro jas L_1 , což pro h_2 neplatí. Hodnota h_2 by měla být v ideálním případě násobkem hodnoty h_1 a poměru n_2/n_1 , což ovšem v popisovaném obrázku neplatí a to z důvodu nelineární převodní charakteristiky kamery.



Obr. 30 Vliv tvaru převodní charakteristiky na měření fotonového šumu

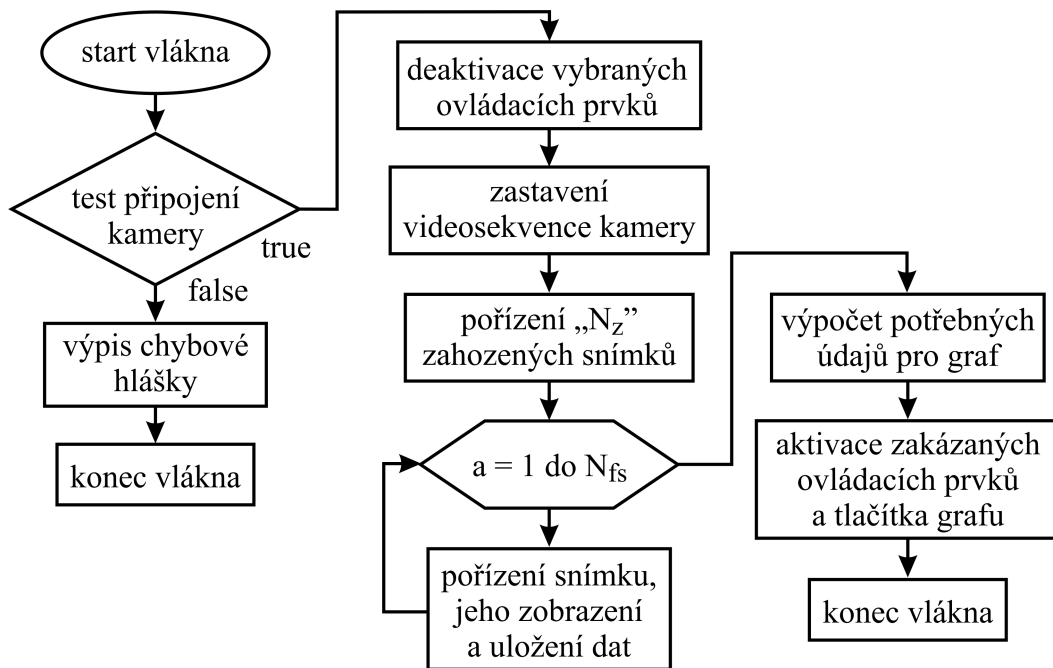
V případě, že máme správně nastavené parametry kamery, pro splnění výše uvedených podmínek, můžeme započít samotné měření fotonového šumu. U toho nastavíme zejména požadovaný počet snímků pro měření a dle potřeby také počet „zahozených snímků“. Pokud je připojena kamera, je tlačítko „Měření fotonového šumu“ aktivní a je možné měření spustit. Sled činností, mezi stiskem tlačítka pro měření fotonového šumu a spuštěním samotného vlákna měření, je vidět ve vývojovém diagramu na obr. 31.



Obr. 31 Vývojový diagram měření fotonového šumu

3.1.1 Vlákno pro měření fotonového šumu

Vlákno pro měření fotonového šumu je spuštěno, pokud jsou splněny všechny podmínky nutné pro měření, tedy když je připojena kamera a jsou nastaveny všechny požadované hodnoty. Samotný cyklus sběru dat pouze ukládá z pořízených snímků výřezy velikosti 10x10 pixelů do pole náměrů UP_{fs} (Uložené Pole pro měření Fotonového šumu), ze kterého jsou po provedení všech zvolených náměrů N_{fs} vypočítávány hodnoty pro následnou možnost zobrazení grafu. Ten lze zobrazit po úspěšném nasnímání a uložení všech výsledků, v opačném případě se zobrazí příslušná chybová hláška. Obr. 32 zjednodušeně popisuje vlákno pro měření fotonového šumu.



Obr. 32 Vývojový diagram vlákna pro měření fotonového šumu

Celkový počet snímků potřebných pro měření lze vypočíst dle vztahu:

$$N_c = N_z + N_{fs} \quad (18)$$

V průběhu měření se nevyužívá průměrování z více snímků pro jeden náměr, protože touto možností se u ostatních měření potlačuje šum, který naopak zde měříme. Přesto trvá měření dlouhou dobu, protože počet náměrů N_{fs} musí být pro získání statisticky správného výsledku hodně vysoký. Konkrétně se osvědčilo měření s použitím cca 1000 snímků. Zjištěním, že došlo např. ke špatnému nastavení parametrů měření, lze vlákno běžící poměrně dlouhou dobu kdykoliv během měření ukončit, parametry změnit a nanovo spustit měření.

Z každého snímku se ukládá 10x10 pixelů z místa obrazu, které před samotným měřením může obsluha dle požadavků měnit, jinak je místo měření přednastaveno uprostřed obrazu. Naměřené hodnoty se ukládají do pole UP_{fs} o velikosti $[10 \times 10 \times N_{fs}]$.

3.1.2 Výpočty a zobrazení výsledků měření fotonového šumu

Výsledky měření se počítají pro jednotlivé pixely zvlášť a v grafu lze mezi náměry pixelů přepínat. V grafu se vynášejí hodnoty signálu z jednotlivých snímků pro zvolený pixel. Z těchto hodnot je vypočítána střední hodnota zvoleného pixelu dle vztahu:

$$V_{\text{fs-str}}[i,j] = \left(\sum_{x=1}^{N_{\text{fs}}} UP_{\text{fs}}[i,j,x] \right) / N_{\text{fs}} . \quad (19)$$

Dále je vypočítán rozptyl σ^2 a směrodatná odchylka σ dle vztahů:

$$\sigma^2[i,j] = \frac{1}{N_{\text{fs}}} \sum_{x=1}^{N_{\text{fs}}} (V_{\text{fs-str}}[i,j] - UP_{\text{fs}}[i,j,x])^2 , \quad (20)$$

$$\sigma[i,j] = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{fs}}} \sum_{x=1}^{N_{\text{fs}}} (V_{\text{fs-str}}[i,j] - UP_{\text{fs}}[i,j,x])^2} . \quad (21)$$

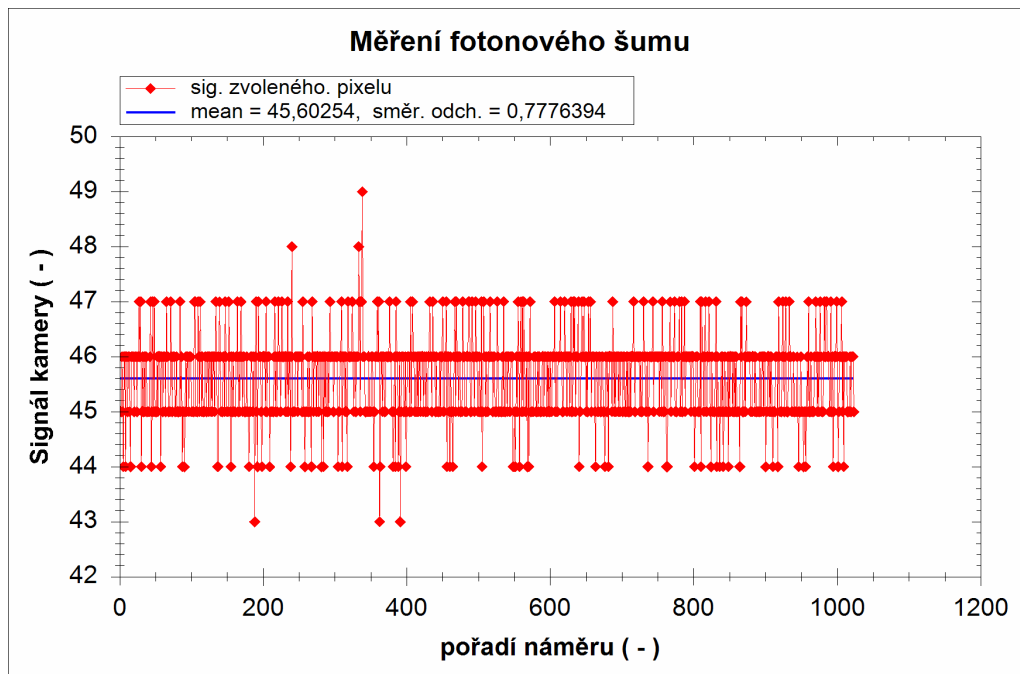
Dále se ze získaných hodnot vypočte odstup signál-šum dle vztahu:

$$SNR[i,j] = V_{\text{fs-str}}[i,j] / \sigma[i,j] . \quad (22)$$

Počet elektronů pak lze vypočíst dle vztahu:

$$N_{\text{elektronů}}[i,j] = \text{zaokrouhleně}(SNR[i,j])^2 . \quad (23)$$

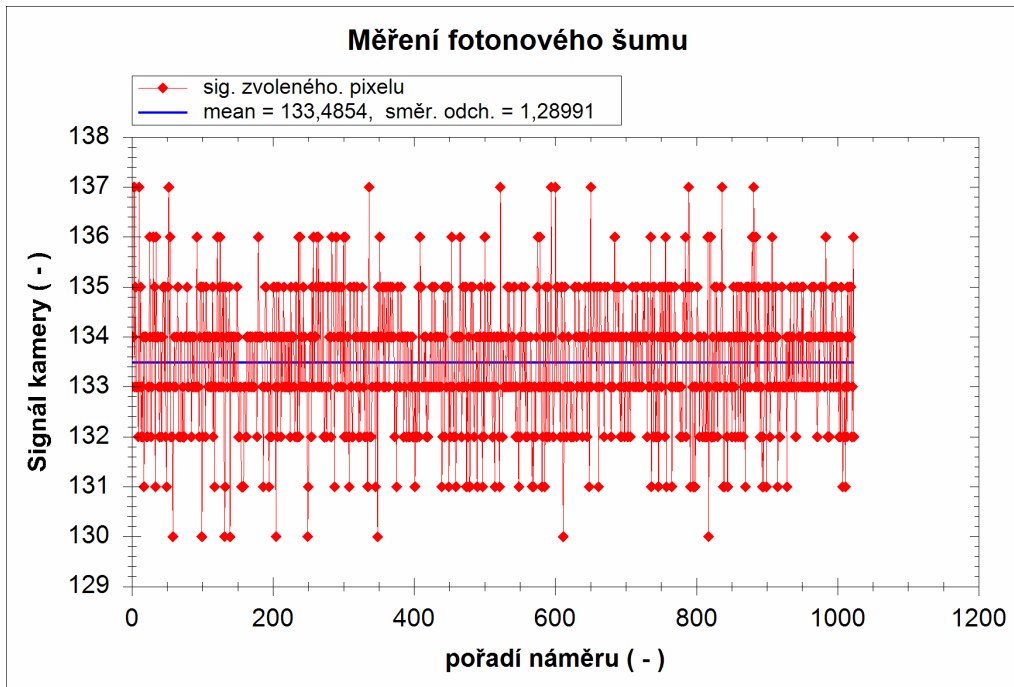
Signál pixelu a jeho střední hodnota jsou vyneseny do grafu. Ostatní vypočtené údaje se zobrazují v příslušném panelu. Náměr je uveden na obr. 33.



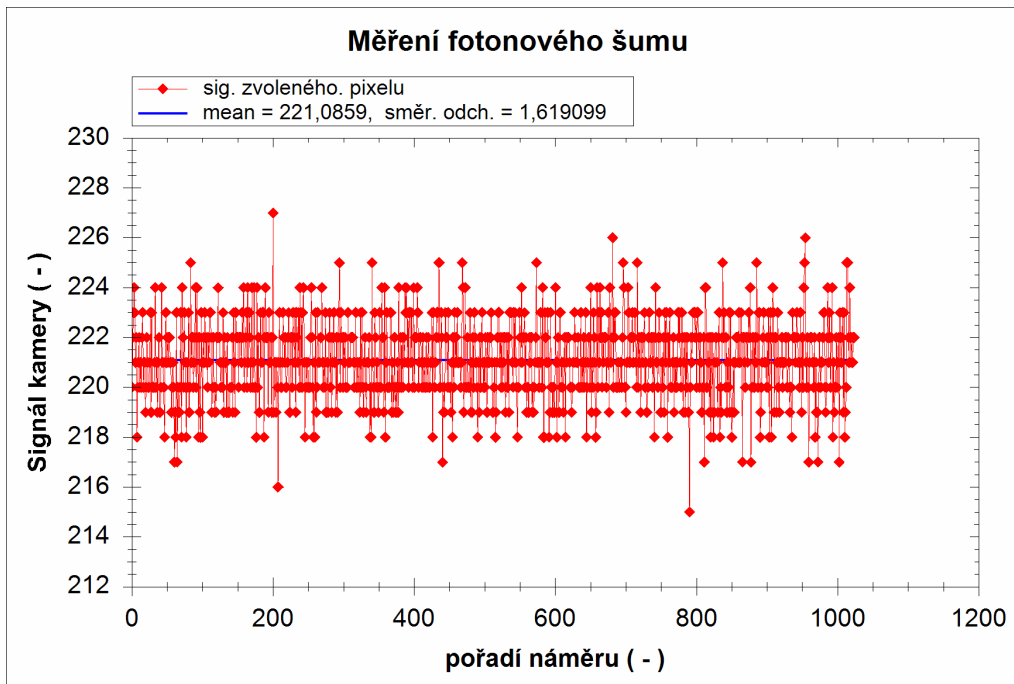
Obr. 33 Ukázka grafu měření fotonového šumu, doba integrace 10ms, zesílení 2, par.C

Samotná směrodatná odchylka z náměru ovšem nepotvrzuje, že skoky jednotlivých hodnot vůči střední hodnotě signálu jsou způsobeny fotonovým šumem. Zda-li se jedná o fotonový šum, můžeme zjistit na základě následujícího měření, u kterého využijeme definice šumů uvedených v kapitole „Obecný rozbor šumu“.

Měření bylo provedeno při konstantním nastavení všech parametrů kamery, v obrázcích označených jako „par.C“, které mají vliv na výsledný signál, kromě expoziční doby. Série snímků pro měření šumu znázorněná na obr. 33 byla nasnímaná s integrační dobou 10ms, poté byla expoziční doba zvednutá na 30ms a nakonec na 50ms. Z těchto náměrů byly programem vypočteny směrodatné odchylky, které jsou vidět přímo nad grafem. Z výsledků náměrů na uvedených obrázcích (33, 34, 35) je jasné, že směrodatná odchylka se zvyšováním délky expozice, tedy zvyšováním počtu fotonů, zvyšuje, což dokazuje, že se skutečně jedná o fotonový šum.



Obr. 34 Ukázka grafu měření fotonového šumu, doba integrace 30ms, zesílení 2, par.C



Obr. 35 Ukázka grafu měření fotonového šumu, doba integrace 50ms, zesílení 2, par.C

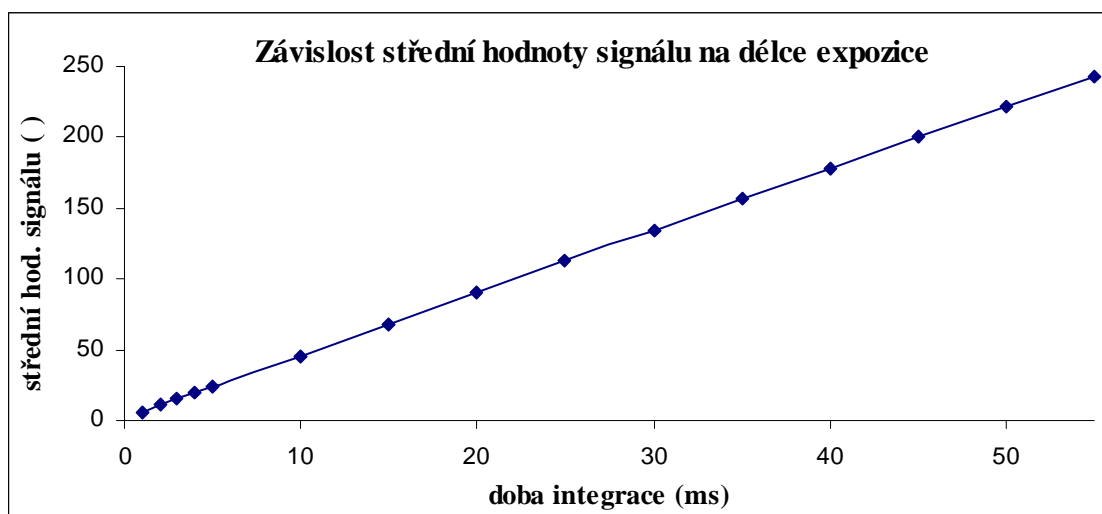
Pro zjištění závislosti směrodatné odchylky, která je úměrná velikosti fotonového šumu, byly provedeny náměry s dobou expozice od 1ms do 55ms. Délka maximální expozice byla volena tak, aby u ní ještě nedocházelo k saturaci signálu kamery, u které by již nedocházelo k rozptylu signálu.

Tab.1 Náměry směrodatné odchylky prováděné z 1024 snímků

T_{int} (ms)	SIGNÁL _{stř}	σ	σ^2	SNR	N_{elektr}
1	6,2088	0,1861	0,4314	14,3925	207
2	10,6364	0,2284	0,4779	22,2579	495
3	14,834	0,2748	0,5242	28,287	801
4	19,2851	0,3258	0,5707	33,7886	1142
5	24,0818	0,3738	0,6114	39,3867	1551
10	45,8614	0,6304	0,7939	57,763	3337
15	68,1838	0,8716	0,9336	73,0331	5333
20	89,8611	1,1326	1,0642	84,4389	7130
25	112,5706	1,3648	1,1683	96,358	9285
30	134,2732	1,6054	1,267	105,9734	11230
35	156,9048	1,854	1,3616	115,2332	13278
40	178,6064	2,0521	1,4325	124,6791	15545
45	200,5699	2,2885	1,5128	132,58	17578
50	222,102	2,4929	1,5789	140,6688	19787
55	243,489	2,6217	1,6192	150,38	22614

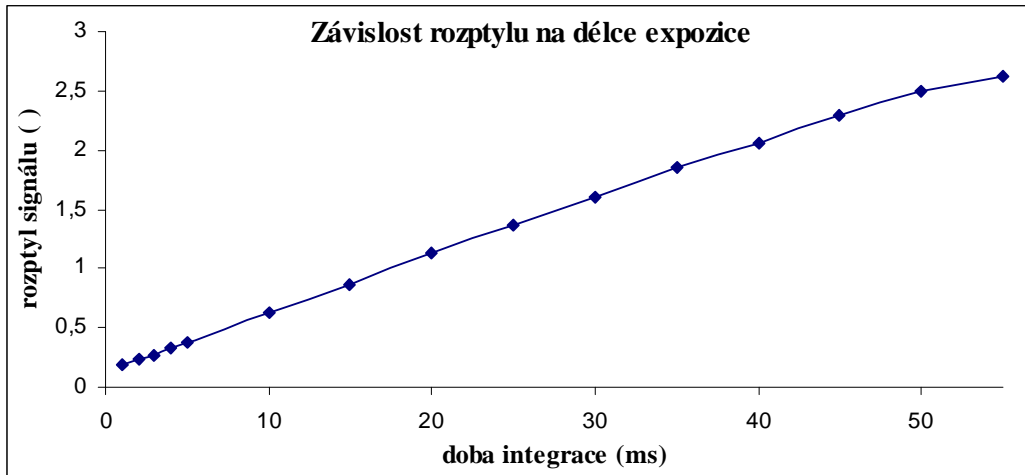
Každý z náměrů byl prováděn z důvodu správné statistické hodnoty výsledků z 1024 snímků, tedy pro výše uvedenou tabulku jich bylo potřeba nasnímat přes 15000.

Měření bylo prováděno při zesílení kamery rovném 2, u kterého je již převodní charakteristika v celém rozsahu signálu lineární. Obr. 36 potvrzuje linearitu převodní charakteristiky, která v tomto případě nebyla měřena změnou nastavení výkonu osvětlovače, ale změnou délky expozice. Při měření byl výkon řízeného osvětlovače nastaven na 100%, tedy LED byly napájeny stejnosměrným proudem.

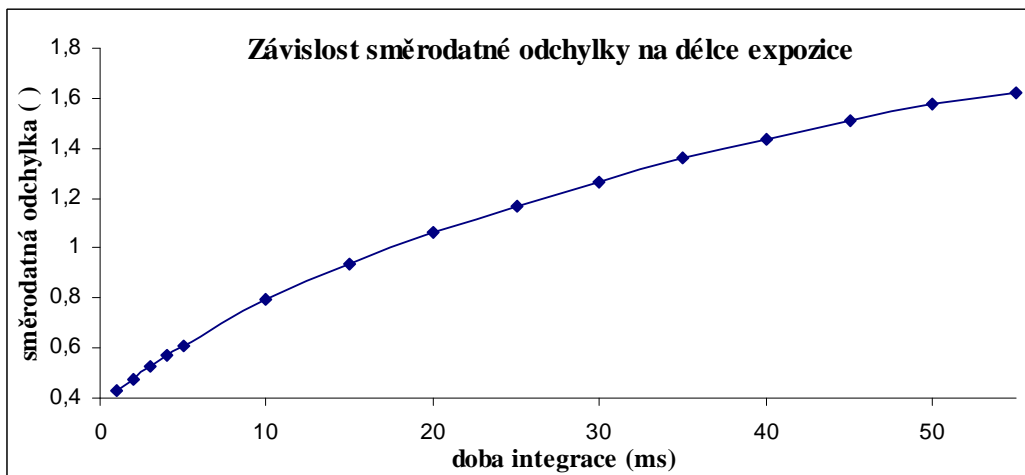


Obr. 36 Převodní charakteristika měřena změnou délky expozice

Graf znázorněný na obr. 37 potvrzuje, až na drobné odchylky, lineární závislost rozptylu na integrační době snímače. V grafu na obr. 38 je pozorovatelná závislost směrodatné odchylky, tedy fotonového šumu, na délce integrace snímače, tedy počtu dopadajících fotonů.



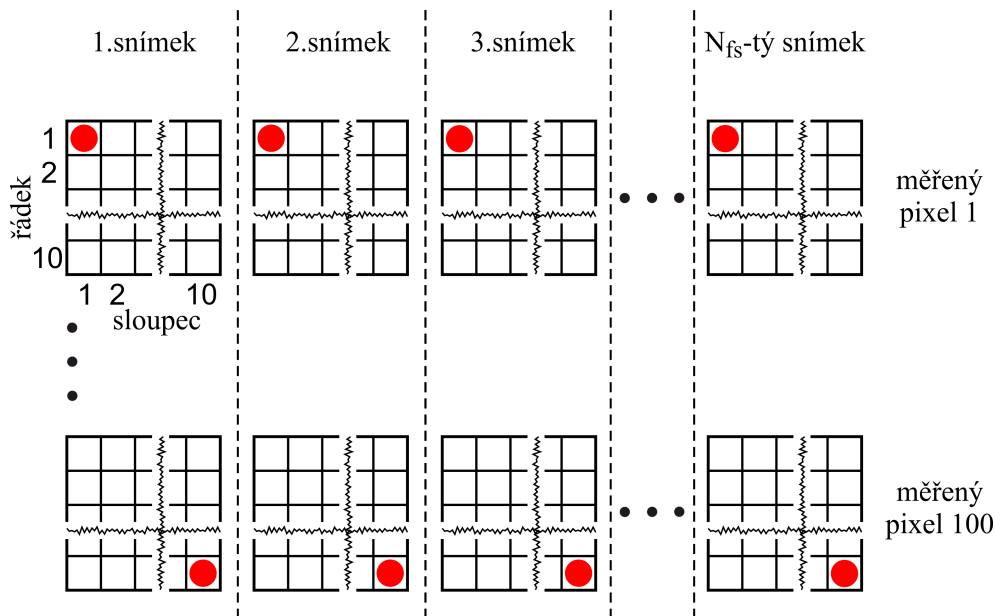
Obr. 37 Závislost rozptylu na délce expozice



Obr. 38 Závislost fotonového šumu na počtu dopadajících fotonů

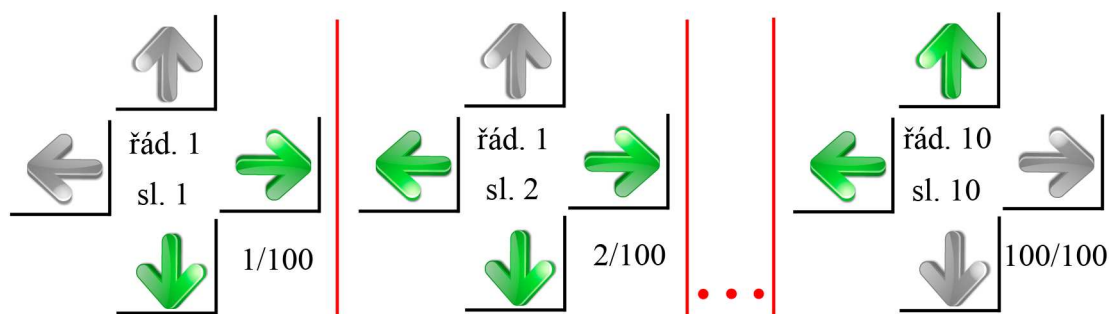
U předchozího měření, které mělo dokázat, že měříme doopravdy fotonový šum, byly zanedbány ostatní složky šumu. Pokud bychom také naměřili temný šum, při stejné okolní teplotě a stejných délkách integrace, mohli bychom jej v náměru fotonového šumu korigovat. To ale pouze za předpokladu, že temný šum již nebyl korigován automaticky samotným obrazovým senzorem z náměru zatmněných pixelů, jak tomu bylo u předchozího měření fotonového šumu.

Až doposud bylo uvažováno měření šumu pouze z jednoho pixelu snímače. Při měřeních bylo ovšem zjištěno, že se jednotlivé pixely chovají při stejných podmínkách měření různě. Proto byly do programu přidány možnosti pro uživatelské přepínání aktuálního měřeného pixelu, aby bylo možné jednotlivé pixely porovnávat. Obr. 39 znázorňuje možnost volby pixelu pro měření šumu ze zvolené plochy 10x10 pixelů, ve kterém se ze zvoleného počtu N_{fs} naměřených a uložených matic vybere požadovaný pixel. Tímto získáme N_{fs} hodnot, určených pro samotné měření šumu ze zvoleného pixelu. Tyto hodnoty jsou uloženy ve dvourozměrném poli UJP_{fs} (Uložené Jednotlivé Pixely pro měření Fotonového šumu) velikosti $[100, N_{fs}]$.



Obr. 39 Demonstrační ukázka měření jednotlivých pixelů

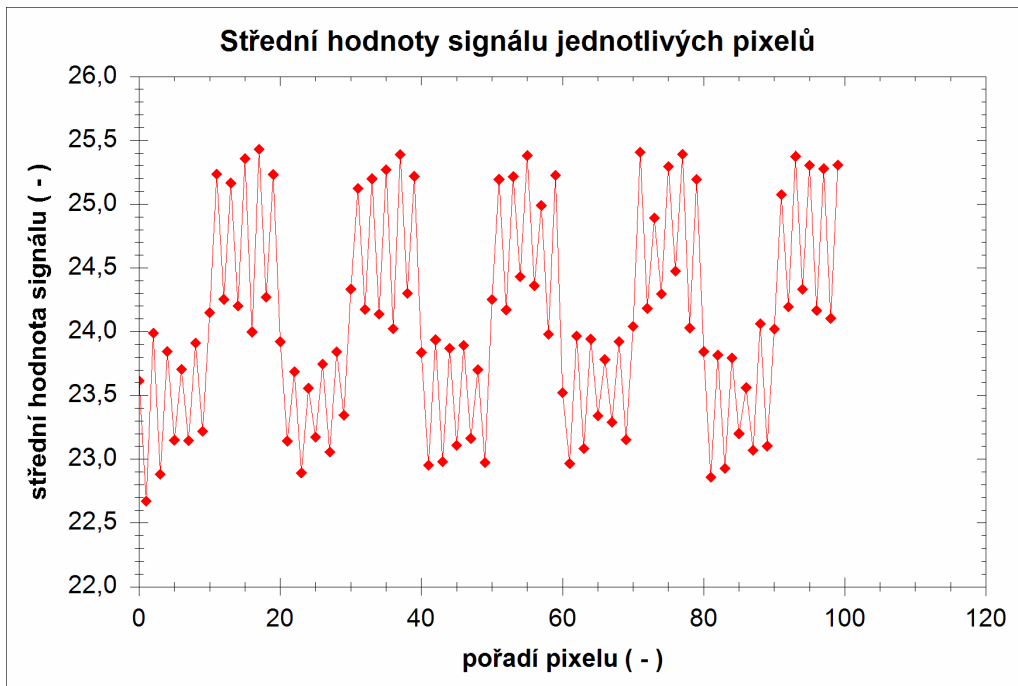
Pro účely přepínání mezi jednotlivými pixely jsou přímo do okna, ve kterém se zobrazuje graf a výsledky měření, integrovány ovládací prvky pro přepínání náměrů z jednotlivých pixelů. Tyto ovládací prvky s ikonami šipek jsou znázorněny na obr. 40. Starší verze programu obsahovala přepínání pouze pomocí inkrementace nebo dekrementace pořadového čísla pixelu v poli UJP_{fs} , což v případě ukládání jednotlivých náměrů pixelů do pole UJP_{fs} po řádcích umožňovalo sledování rozdílu sousedních pixelů pouze z vedlejších sloupců, tedy indexy pole (1 až 10), (11 až 20), ..., (91 až 100). Při požadavku sledovat pixely sousedící ve stejném sloupci bylo nutné přepínat mezi hodnotami (1-11-21-...-91; 2-22-32-...-92; apod.) pro sledování konkrétního sloupce desetinásobným poklepáním tlačítka inkrementace pro skok do sousedního řádku. Zmíněnou nevýhodu odstraňuje současné řešení, u kterého je navíc pro porovnání aktuálního měřeného pixelu s předchozí verzí ponechána informace o indexaci pixelu v poli UJP_{fs} , která je umístěná po pravé straně dolní šipky. Mezi šipkami se zobrazují souřadnice aktuálního řádku a sloupce.



Obr. 40 Přepínání mezi náměry fotonového šumu z jednotlivých pixelů

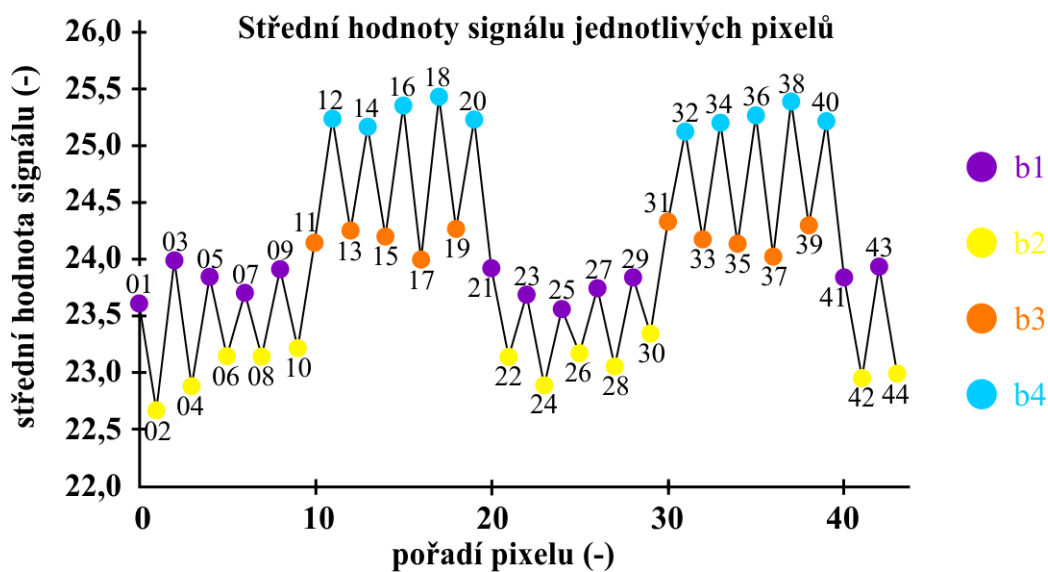
Uvedené možnosti přepínání mezi jednotlivými pixely umožnily jednoduché sledování vlastností pixelů sousedících ve vedlejších řádcích či sloupcích. Bylo zjištěno, že při přepínání po řádcích či sloupcích střídavě klesá a stoupá střední hodnota signálu sousedících pixelů. Pro globální sledování všech 100 měřených pixelů proto byla do programu přidána funkce určená k zobrazení středních hodnot všech pixelů v jediném

grafu, který je zobrazen na obr. 41. Tato funkce může být využita pro porovnání citlivosti jednotlivých pixelů.



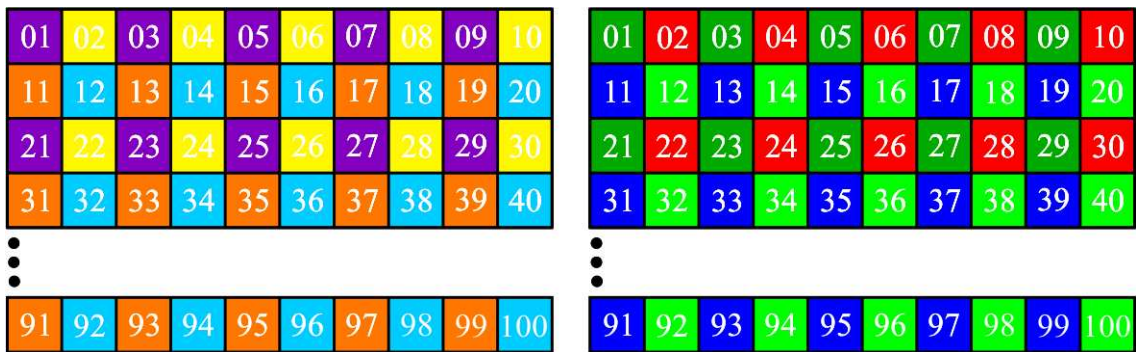
Obr. 41 Střední hodnoty signálu jednotlivých pixelů

V uvedeném grafu můžeme vysledovat určitou periodicitu, projevující se kmitáním sousedních bodů a také desetibodových skupin. Obr. 42 znázorňuje, ve zvětšeném měřítku x-ové osy, první čtyři celé desetibodové skupiny, na kterých bude problematika naměřeného kmitání vysvětlena. Při natažení měřítku obr. 41 bylo prokreslení jednotlivých bodů a spojujících čar nedostatečné, proto byly tyto body a čáry proloženy vektorově a poté byl původní obrázek odstraněn. Obr. 42 tedy netvoří přímo náměr, ale jeho grafickou kopii, ve které jsou navíc jednotlivé skupiny bodů od sebe barevně odlišeny.



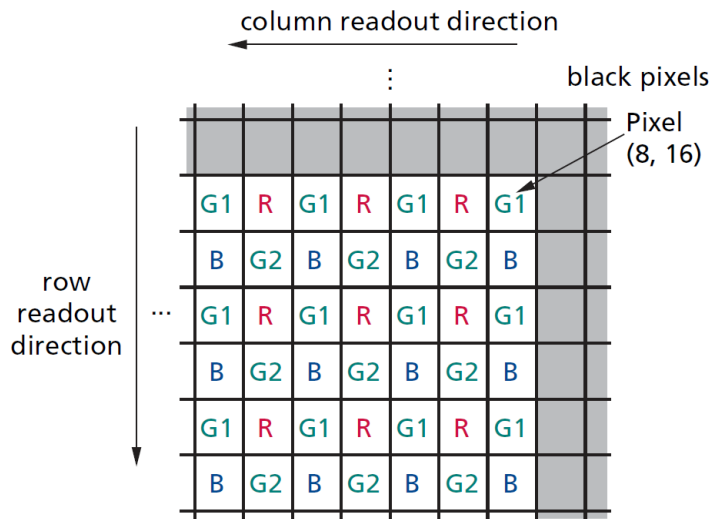
Obr. 42 Grafická interpretace náměru středních hodnot signálu jednotlivých pixelů

Pro vysvětlení polohy jednotlivých bodů v grafu vůči polohám těchto bodů ve měřené ploše je na obr. 43a uvedena tabulka. Každý bod grafu je vypočten jako průměr ze zvoleného počtu bodů pro měření fotonového šumu. Průměry jednotlivých bodů (celkem 100) jsou znázorněny v popisované tabulce tak, jak byly odebírány z měřené plochy. Sada prvních deseti bodů tedy tvoří první řádek, který je označen barvami $b1$ a $b2$. Barva $b1$ tvoří liché členy a barva $b2$ sudé členy tohoto řádku. Situace je podobná pro druhý řádek, ve kterém jsou liché a sudé členy označeny barvami $b3$ a $b4$.



Obr. 43 a) barevně označená poloha bodů předchozího grafu b) Bayerova mřížka

Struktura měřených členů je shodná se strukturou Bayerovi mřížky, uvedené na obr. 43b. Z katalogu měřeného černobílého senzoru bylo zjištěno, že i když je senzor černobílý, struktura pixelových buněk je rozdělena stejně, jak je tomu u senzoru barevného. Tato organizace pixelových buněk je z největší pravděpodobnosti zvolena z důvodu nižší ceny při využití jednoho hardwarového řešení pro oba typy senzorů, kdy se u barevného senzoru navíc přidává pouze Bayerova maska. Obr. 44 znázorňuje „barevné“ rozložení měřeného černobílého obrazového senzoru MT9M001, u kterého je obsluha registrů pro zesílení či offset shodná s barevnou verzí tohoto senzoru.



Obr. 44 Struktura organizace a správy pixelů černobílého senzoru, shodná s verzí barevnou [zdroj 10]

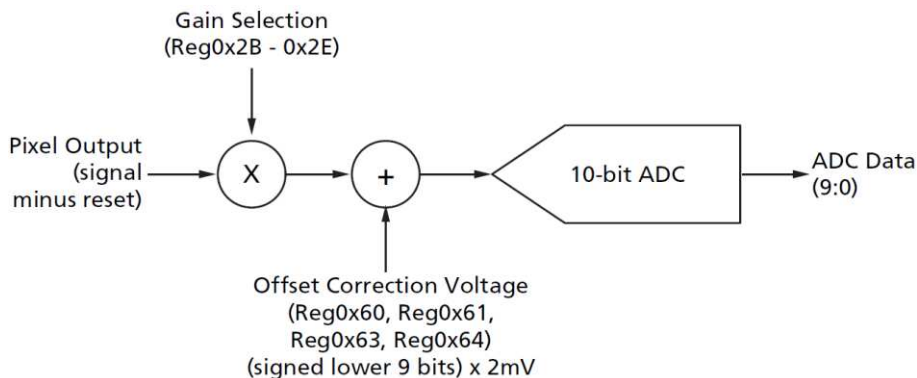
Ještě jednou se podívejme na barevnou strukturu bodů *b1* až *b4* na obr. 42. Pokud bychom těmto bodům chtěli přiřadit buňky R, B, G1 a G2 dle obr. 44, máme celkem čtyři možnosti a to podle náhody, do které z těchto buněk jsme se strefily s pixelem 01 při výběru měřené oblasti. Jedna ze čtyř možných kombinací je uvedena na obr. 43b. V době, kdy byl prováděn uvedený náměr, ještě nebyla do programu integrována funkce pro čtení a zápis do registrů kamery, dle které by šlo danou informaci prozkoumat.

Z výše popsaných skutečnosti také vyplývá, že při měření převodní charakteristiky, u které je v grafu zobrazena průměrná křivka převodní charakteristiky a také minimální a maximální převodní charakteristiky, se může velikost minimální a maximální křivky odvíjet od nastavení výše zmiňovaných registrů.

3.2 Měření temného šumu

Pro měření temného šumu lze plně využít funkci programu pro měření fotonového šumu. Důležitou změnu v měření představuje pouze uzavření krytky objektivu, aby na obrazový snímač nedopadalo okolní osvětlení.

Při měření tepelného šumu, zejména u krátkých expozic, narazíme na problém rozlišení AD převodníku, kdy náměry budou hodně zatížené kvantovací chybou. Tento nedostatek lze částečně odstranit použitím vyššího zesílení senzoru, čímž dojde také k zesílení temného šumu. Obr. 45 znázorňuje sled činností při zpracování signálu z jednotlivých pixelů obrazového snímače.



Obr. 45 Zpracování signálu z pixelu obrazového snímače [zdroj 10]

Náměry temného šumu v této práci prováděny nebyly. Při měření fotonového šumu byla aktivní redukce temného šumu. Náměry fotonového šumu při deaktivované korekci offsetu a dodatečném korigování temného šumu by byly určitě přesnější. Hodnoty expozic pro měření temného šumu by ovšem musely být stejné, jako při měření fotonového šumu. Z časových důvodů zmíněné měření provedeno nebylo, nicméně vytvořený program toto měření plně umožňuje.

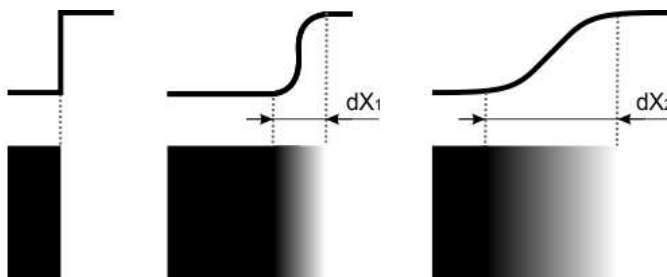
4 Rozlišovací schopnost kamery

Rozlišovací schopnost kamery je dána rozlišovací schopností obrazového senzoru a použitého objektivu. V současné době jsou rozlišovací schopnosti obrazových senzorů díky propracované technologii velice vysoké, z čehož vyplývá, že ve většině případů je slabším článkem kamery použitý objektiv, jehož rozlišení je navíc závislé na jeho správném zaostření.

Rozlišovací schopnost kamery lze měřit více způsoby. Jedním ze způsobů je promítání ostré hrany, umístěné v předmětové rovině, na obrazový senzor. Vyhodnocení rozlišení pak můžeme provést sledováním obrazu hrany, jejíž délka přechodu mezi minimální a maximální jasovou úrovní bude úměrná míře rozostření kamery. Další možností je například využití vhodných testovacích obrazců, z jejichž obrazu se rozlišovací schopnost vyhodnotí dle předem stanovených podmínek.

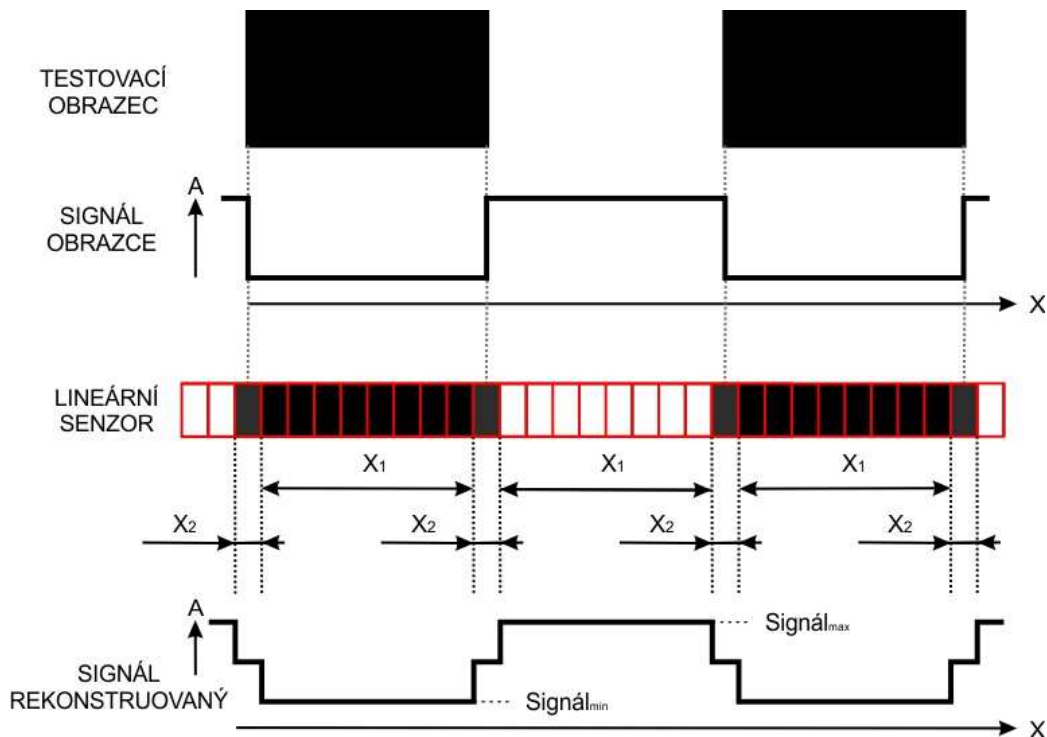
4.1 Rozbor obrazové hrany

Ideální obrazovou hranu, která je uvedena na obr. 46a, můžeme analogicky přirovnat k jednotkovému skoku v teorii signálů. V praxi ovšem kvůli nedokonalosti kamery dochází při snímání takovéto hrany k jejímu rozmazání. Míra rozmazání je závislá na vlastnostech přenosové soustavy kamery. Situaci znázorňují obr. 46b a 46c, u kterých je délka přechodu z minimální jasové hodnoty na maximální označena jako dX_1 a dX_2 .



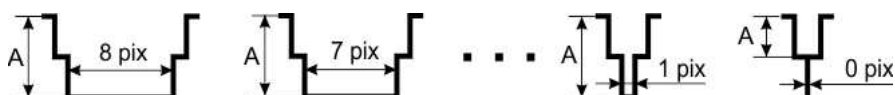
Obr. 46 Znázornění signálu a) ostré b) mírně rozmazané c) hodně rozmazané hrany

Na obr. 47 je graficky znázorněná situace, kdy se šíře pruhu testovacího obrazce snímá počtem pixelů nacházejících se v délce $X_1 + X_2$, v tomto konkrétním případě pomocí devíti pixelů. Obrázek také demonstruje proložení hrany středem pixelu, čímž se z daného pixelu odečte informace rovná příslušnému podílu promítnutí černé a bílé složky. Výsledný signál pak nepředstavuje jednotkový skok, ale postupnou skokovou změnu.



Obr. 47 Rekonstrukce signálu snímané obrazové hrany

V případě, že budeme šířku pruhu v testovacím obrázku zužovat, bude také docházet k zužování signálu, protože ten bude vyhodnocován menším počtem pixelů obrazového snímače. Situaci znázorňuje obr. 48, ze kterého je vidět, že hodnota amplitudy signálu při posledním zúžení, kdy již na žádném pixelu není znázorněna hodnota černé, klesne na polovinu původní hodnoty. Tímto se také sníží hodnota kontrastu obrazu.



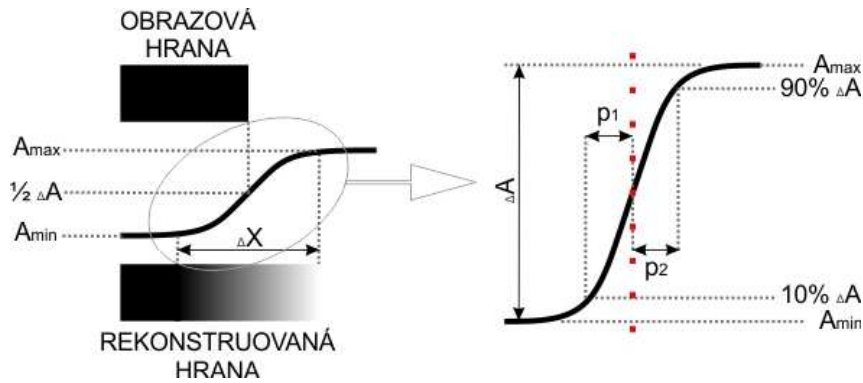
Obr. 48 Rekonstruovaný signál po snímání různě širokých pruhů testovacího obrazce

Kontrast obrazu „K“ se vypočte dle vztahu:

$$K = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} \quad (24)$$

Využití výše uvedeného principu bude použito při měření rozlišovací schopnosti pomocí testovacích obrazců, které bude dále rozepsáno v kapitole “Měření pomocí testovacích obrazců”.

Další možností pro měření rozlišovací schopnosti je sledování náběhu obrazové hrany. Princip měření znázorňuje obr. 49, ve kterém se rozlišovací schopnost měří jako délka náběhu signálu hrany z 10% na 90% amplitudy. Náměr obrazové hrany z jednoho řádku ovšem obsahuje signál z pouze malého počtu pixelů. Proto je potřeba signál hrany rozvinout, čemuž bude věnována kapitola „Měření s pomocí hardware pro posouvání ostrého břitu“.



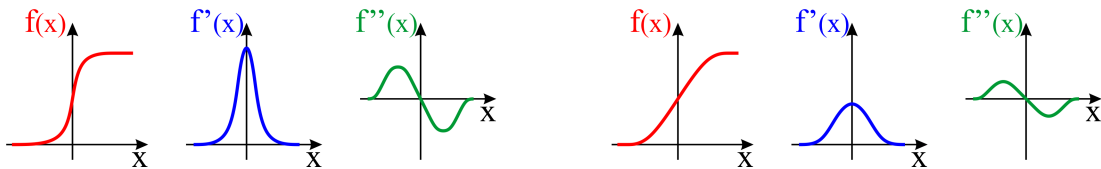
Obr. 49 Definice signálových úrovní rekonstruované obrazové hrany

4.2 Detekce obrazové hrany

Hrana v obraze je dána vlastnostmi obrazového elementu a jeho okolí. Je určena tím, jak náhle se mění hodnota obrazové funkce. Směr největšího růstu funkce udává její gradient, kde pixely s velkým modulem gradientu nazýváme hranami. [zdroj 2]

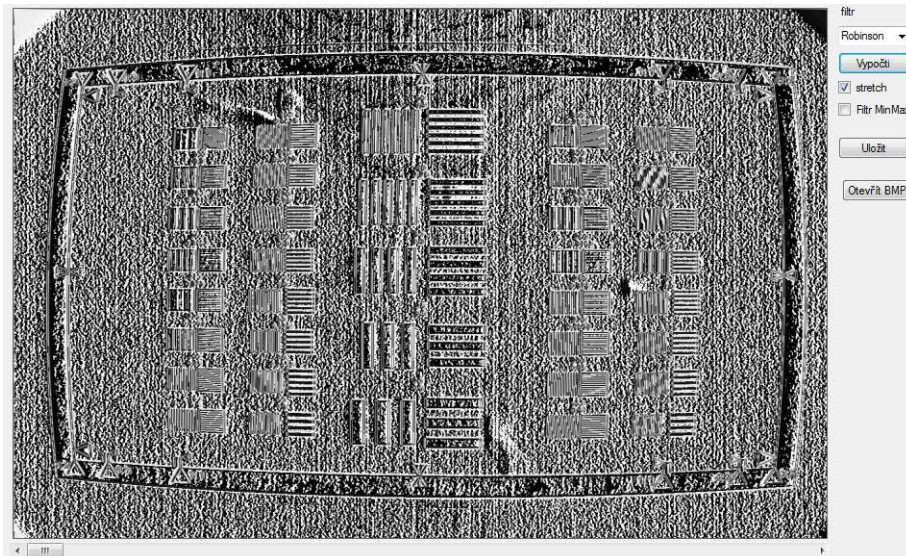
Tvar obrazové hrany může být různý a hodně závisí na vlastnostech kamery a jejím nastavení. Při snímání ostré hrany se můžeme, nastavením kamery, pouze přiblížit k získání skokového signálu. Hrana obrazu má v praxi spíše tvar linie, která je závislá na míře rozostření a je navíc ještě zašuměná.

Pro detekci hrany se mohou využít konvoluční masky aproximující derivace obrazové funkce, jako např. Robertsův, Laplaceův, Prewittův, Sobelův, Robinsonův a Kirschův operátor. Jejich nevýhodou je nutnost volby velikosti masky takové, aby odpovídala velikosti detailů v obrázku. Také jsou hodně citlivé na šum. První derivace obrazové funkce nabývá svého maxima v místě hrany. Lze využít také druhou derivaci, která má v místě hrany naopak nulovou hodnotu. Hledání polohy hrany v místě přechodu nulou je, díky strmosti přechodu, mnohem spolehlivější, než hledání na plochem maximu u první derivace. Situaci znázorňuje obr. 50, ve kterém jsou červenou barvou znázorněny dvě obrazové hrany s rozdílnou strmostí, modrou barvou první derivace a zelenou barvou druhé derivace těchto hran.



Obr. 50 Ukázka první a druhé derivace obrazové hrany [dle zdroje 2]

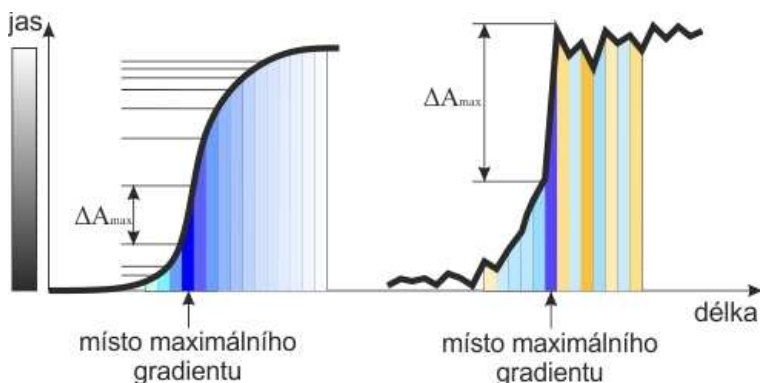
Pro pozorování vlastností aplikace zmiňovaných konvolučních masek byla naprogramována jednoduchá aplikace, ve které lze zvolit požadovanou masku a následně ji aplikovat na otevřený obraz. Na následujícím obrázku je ukázka aplikace Robinsonova operátoru.



Obr. 51 Aplikace Robinsonova operátoru na nasnímaném obrazu

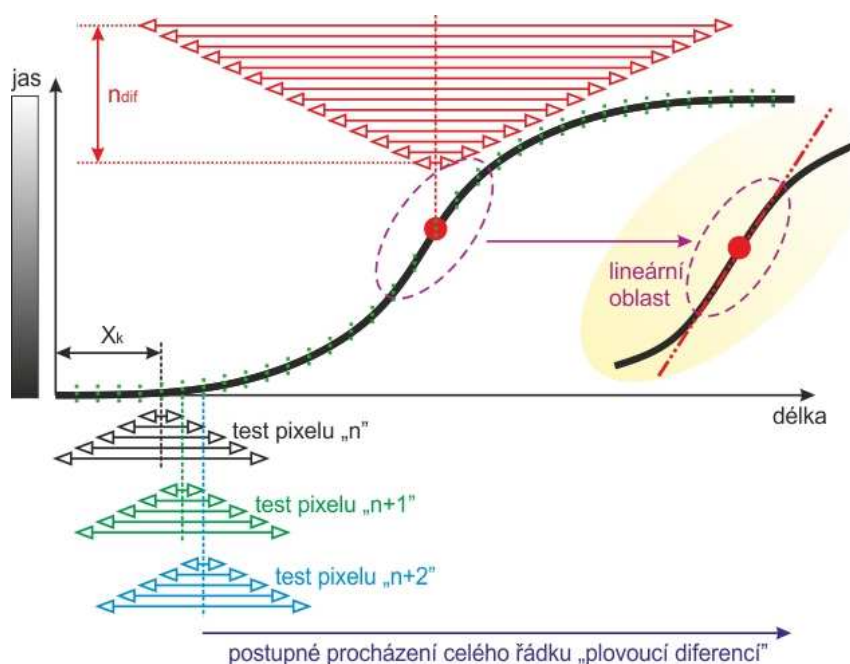
Na obr. 51 je patrná citlivost operátoru na šum v obraze. Pro jeho částečné odstranění lze využít filtraci Gaussiánem a až poté aplikovat požadovaný operátor. Reálné nasazení zmiňovaných operátorů ovšem v této práci využito nebylo, proto ani popsání aplikace není přidána do hlavního programu.

Pro hledání středu obrazových hran je v práci naprogramováno více metod. Pro posuzování hran je mimo jiné využívána funkce difference sousedících pixelů. Ta je ovšem velice citlivá na šum v obraze a dále, v případě rozmazané hrany, která se rozkládá na více pixelech, s ní nelze správně identifikovat prostředek hrany. Obr. 52 vlevo znázorňuje hranu s dlouhým přechodem, ve kterém je sytostí odstínů modré znázorněná velikost difference sousedních pixelů. Z obrázku je patrné, že v tomto případě je správnost detekce středu hrany závislá na jejím tvaru. Obr. 52 vpravo znázorňuje zašuměnou hranu, kde odstíny modré znázorňují velikost kladné difference a odstíny žluté naopak záporné difference.



Obr. 52 Závislost velikosti gradientu na tvaru hrany

Z důvodu odstranění výše popsaného nedostatku byla naprogramována funkce, jejíž princip činnosti je podobný výše popisovaným operátorům, pouze však v jednorozměrném měřítku. Funkce využívá difference z postupně se zvětšující vzdálenosti pixelů, vůči aktuálně vyšetřovanému místu. Využití této funkce je výhodné zejména při více rozmazaných hranách v obraze. Dle obr. 53 bude zmíněná funkce blíže vysvětlena.



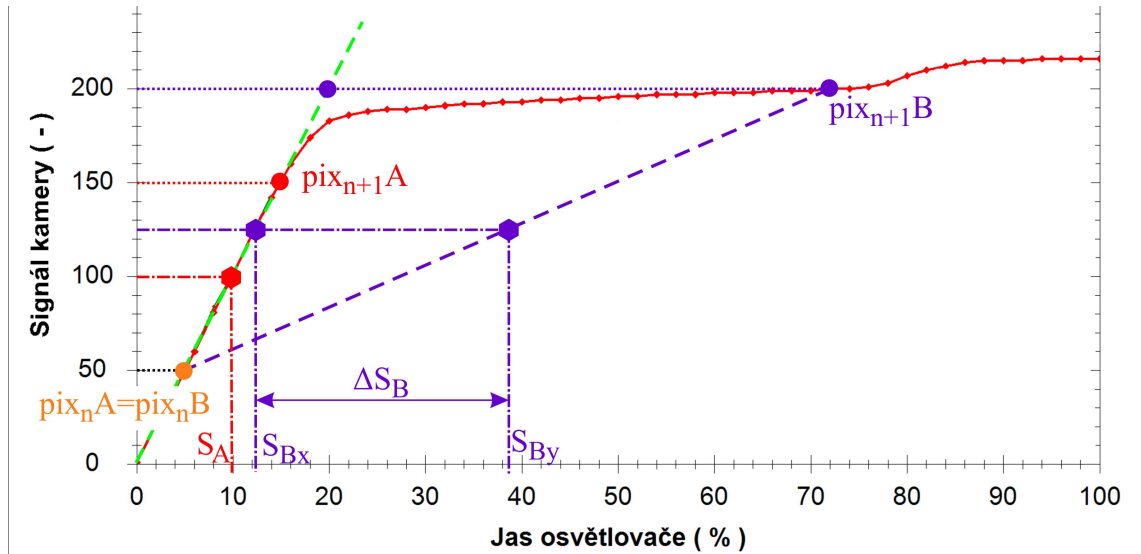
Obr. 53 Znáznění funkce využívající „plovoucí diferencí“

Ve zkoumaném pixelu n je vypočtena hodnota „plovoucí diference“, tedy hodnota, která se skládá z průměru diferencí „ $n-1;n+1$ “, „ $n-2;n+2$ “, „ $n-3;n+3$ “ až „ $n-n_{dif};n+n_{dif}$ “. Tímto způsobem se postupně prochází všechny zkoumané pixely. Výhoda této metody spočívá zejména při zkoumání lineární oblasti hrany, ve které bychom při využití jediné diference z malého okolí získali pro jednotlivé pixely, nacházející se v lineární oblasti, stejné hodnoty diferencí.

Tato vytvořená funkce má ovšem i svoje nevýhody. První nevýhodou je nemožnost zkoumání okrajových pixelů, které jsou od okraje vzdáleny méně, než je hodnota n_{dif} . Další, podstatnější nevýhodou je možnost použití této metody pouze pro zkoumání těch hran, jejichž šířka je větší, než šířka největší použité diference. Funkce byla proto využita pouze pro zkoumání hran z digitálního fotoaparátu, jehož rozlišovací schopnost senzoru byla mnohem vyšší, než rozlišovací schopnost použitého objektivu, z čehož vyplývá, že se hrany obrazu rozkládaly na více pixelů.

Velice jednoduchá a v této práci hodně využívána metoda detekce hran je metoda práhování. U té je důležitá volba práhovací hodnoty. Dále je pro subpixelové výpočty důležitá metoda použité interpolace. V této práci se využívá pouze lineární interpolace, u které je ale důležité zabezpečit lineární převodní charakteristiku kamery, jinak by se interpolací vypočtená hodnota neshodovala se skutečnou hodnotou. Situaci upřesňuje obr. 54, ve kterém je použita naměřená převodní charakteristika (znázorněná červenou barvou) kamery ViSor, která byla uvedena na obr. 22. Představme si rozmazanou hranu rozprostřenou na hodně pixelů obrazového snímače, ze které odečteme jasové body na vybrané přímce, která bude kolmá na osu hrany. Získané jasové body pak mohou představovat jednotlivé kroky jasu osvětlovače, který byl použit pro měření převodní charakteristiky. Vybereme-li dva body, jeden s jasovou hodnotou 50 (na obr. 54 znázorněn jako pix_nA) a druhý s jasovou hodnotou 150 ($pix_{n+1}A$), které se nachází v lineární oblasti převodní charakteristiky, získáme s použitím lineární interpolace správný výsledek S_A , jehož jasová hodnota je 100. Pokud provedeme další měření, u něhož zachováme první bod ($pix_nA = pix_nB$) a druhý bod zvolíme s jasovou hodnotou 200 ($pix_{n+1}B$), vyjde nám při úvaze, že využíváme lineární převodní charakteristiku,

bod, který je na obrázku označen S_{By} . Při skutečné lineární charakteristice (na obrázku označená zelenou čárkovanou čarou) by tento bod vycházel v místě S_{Bx} , čímž se dopustíme chyby ΔS_B .



Obr. 54 Závislost hodnoty lineární interpolace na převodní charakteristice

4.3 Funkce pro zobrazení relativní hodnoty zaostření

Aby byl při měření rozlišovací schopnosti výsledek měření co nejvíce podobný skutečné hodnotě, musí být objektiv kamery co nejlépe zaostřen na testovací objekt. Samozřejmě, že je tuto situaci možné řešit subjektivním pozorováním, u kterého si navíc můžeme pomoci zvětšením obrazu, ovšem nebudeme moci s jistotou tvrdit, že předchozí, byť i velice malá změna pootočení ostřicího kroužku objektivu, nedávala lepší výsledek zaostření, než dává po provedené změně. Proto byla do programu přidána funkce, která v reálném čase (závislé na komunikační rychlosti kamery a zatížení systému) vypočítává a v grafu znázorňuje relativní ostrost kamery.

Před aktivací funkce je potřeba myší zvolit měřenou oblast, v opačném případě je zobrazena chybová hláška, která uživatele na výběr oblasti upozorní. Také kurzor myši je změněn na šipku s otázkou. Po výběru oblasti lze měření relativní ostrosti spustit. Měření záměrně neprobíhá z celého obrazu, ale pouze z vybrané libovolně velké oblasti. Myšlenka pro naprogramování této funkce, jako i možnosti výběru místa a velikosti oblasti pro její měření, vznikla z analogie ostření u digitální zrcadlovky, kde je možností pro výběr bodu ostření více. Malá plocha pro měření zaostření má výhodu zejména u nižší hloubky ostrosti, kdy má uživatel lepší možnosti výběru místa, na které má být zaostřeno. To samé platí v našem případě a navíc, výběr menší plochy je vhodný také z důvodu nižší výpočetní náročnosti.

Měření se provádí na základě vyhodnocování diference sousedních pixelů ze zvolené oblasti. V programu jsou naprogramovány funkce pro měření diference pixelů vzdálených od sebe o 2 a také o 4 místa. Z důvodu náměru vyšších hodnot diference u hodně rozmazaného obrazu je volána funkce počítající diferenci pixelů vzdálených od sebe o 4 místa. Diference je počítána ve směru řádků a ve směru sloupců samostatně. Již samotná vypočtená diference by pro relativní hodnotu ostrosti byla dostačující, ovšem narazili bychom na problém při potřebě změnit clonu objektivu, se kterou se mění jeho světelnost. Zvýšením clonového čísla, tedy snížením velikosti díry clony, dochází ke snížení jasu obrazu a tedy i hodnoty počítané diference. Změna clony, tedy pokud budeme brát v úvahu úplně zaostřený stav objektivu, kdy se neprojeví hloubka ostrosti, nemá na hodnotu zaostření vliv, ovšem hodnota počítané diference se mění. Proto by bylo vhodné hodnotu diference dělit hodnotou jasu, čímž bychom dosáhli odstranění zmiňovaného problému a navíc bychom normalizovali hodnotu relativního zaostření, tedy pro maximální zaostření bychom vypočítali hodnotu 1. Situace je ovšem komplikovanější, protože takový způsob měření by narušil byť jenom jediný vadný pixel kamery, u kterého by v extrémním případě byla hodnota signálu nulová, nebo maximální. Výpočet se tedy provádí následovně:

- z uživatelem zvoleného pole ZP se vypočtou diference pixelů vzdálených od sebe o hodnotu „z“ ve směru řádků DIF_x i sloupců DIF_y dle vztahů:

$$DIF_x[i,j] = \text{abs}(ZP[i+z,j] - ZP[i,j]) , \quad (25)$$

$$DIF_y[i,j] = \text{abs}(ZP[i,j+z] - ZP[i,j]) , \quad (26)$$

přičemž velikost pole DIF_x bude rovna $((i-z)*j)$ a velikost pole DIF_y bude rovna $(i*(j-z))$.

- kvůli eliminaci vadných pixelů se vypočtená pole DIF_x a DIF_y seřadí vzestupně a z deseti procent hodnot s nejvyšší diferencí se vypočte aritmetický průměr pro oba směry diference, $DIF_{x-\text{max}}$ a $DIF_{y-\text{max}}$.

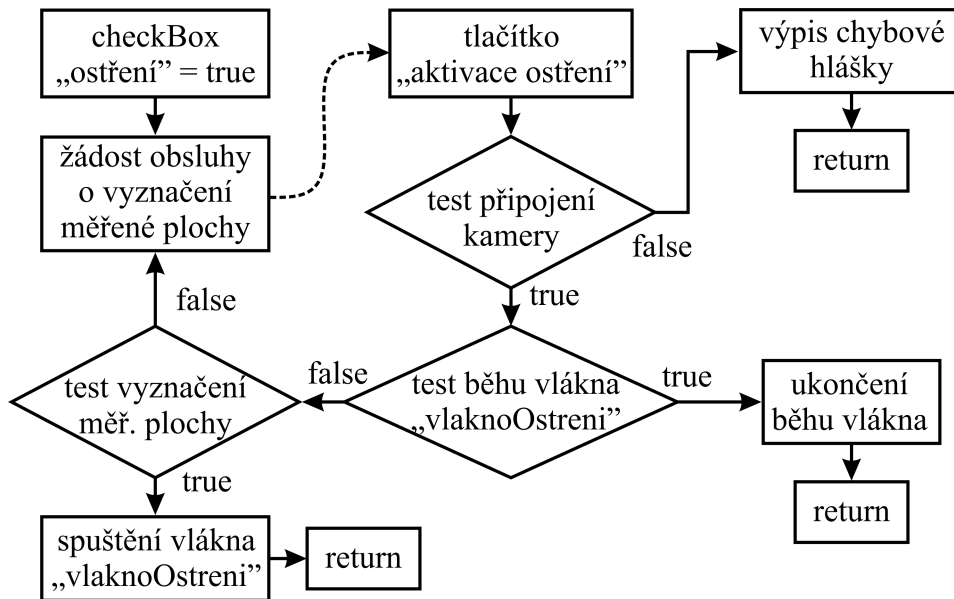
- hodnota jasu není kvůli možným vadným pixelům počítána jako rozdíl maximální a minimální hodnoty jasu, ale místo toho se počítá průměrná hodnota jasu JAS_{prum} ze zvoleného pole ZP .

- ze získaných hodnot se vypočtou výsledné hodnoty diferencí $DIF_{\text{vysl-x}}$ a $DIF_{\text{vysl-y}}$ dle vztahů:

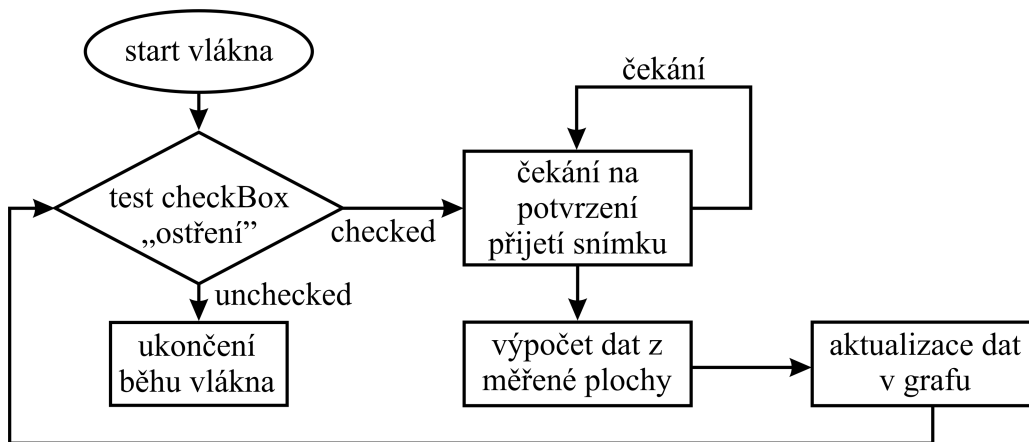
$$DIF_{\text{vysl-x}} = DIF_x / JAS_{\text{prum}} , \quad (27)$$

$$DIF_{\text{vysl-y}} = DIF_y / JAS_{\text{prum}} . \quad (28)$$

Na obr. 55 a obr. 56 jsou znázorněny vývojové diagramy popisované funkce.

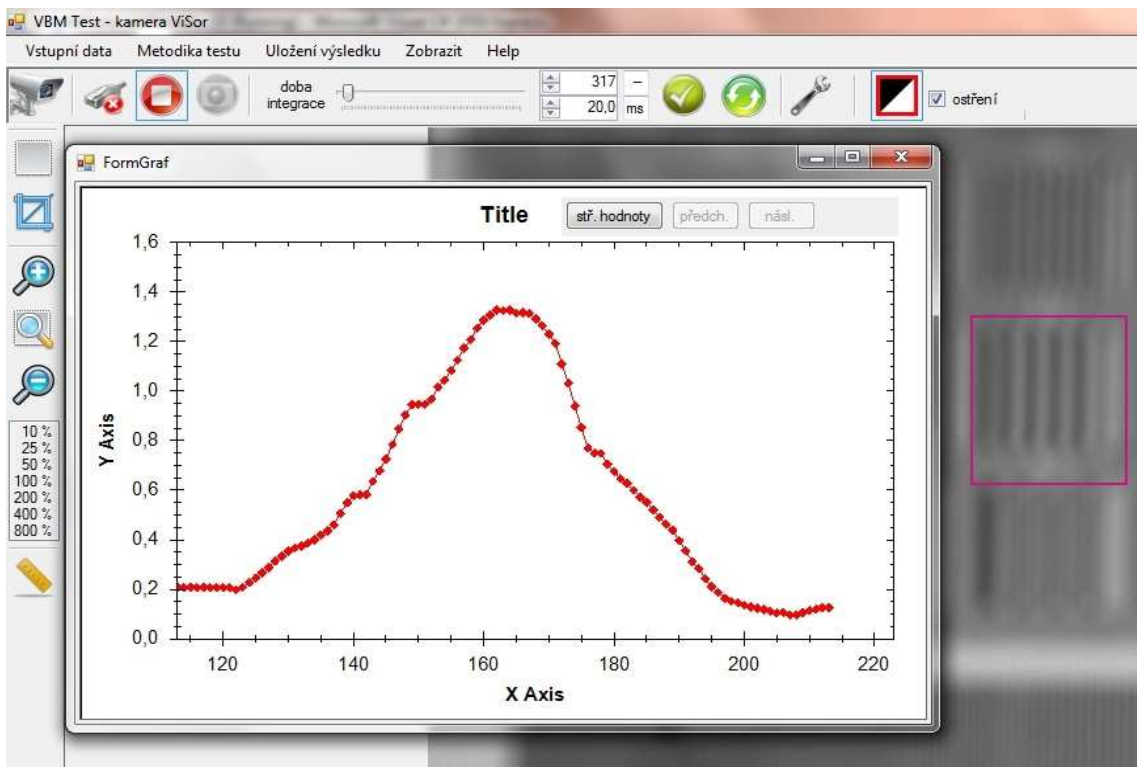


Obr. 55 Vývojový diagram měření relativní ostrosti

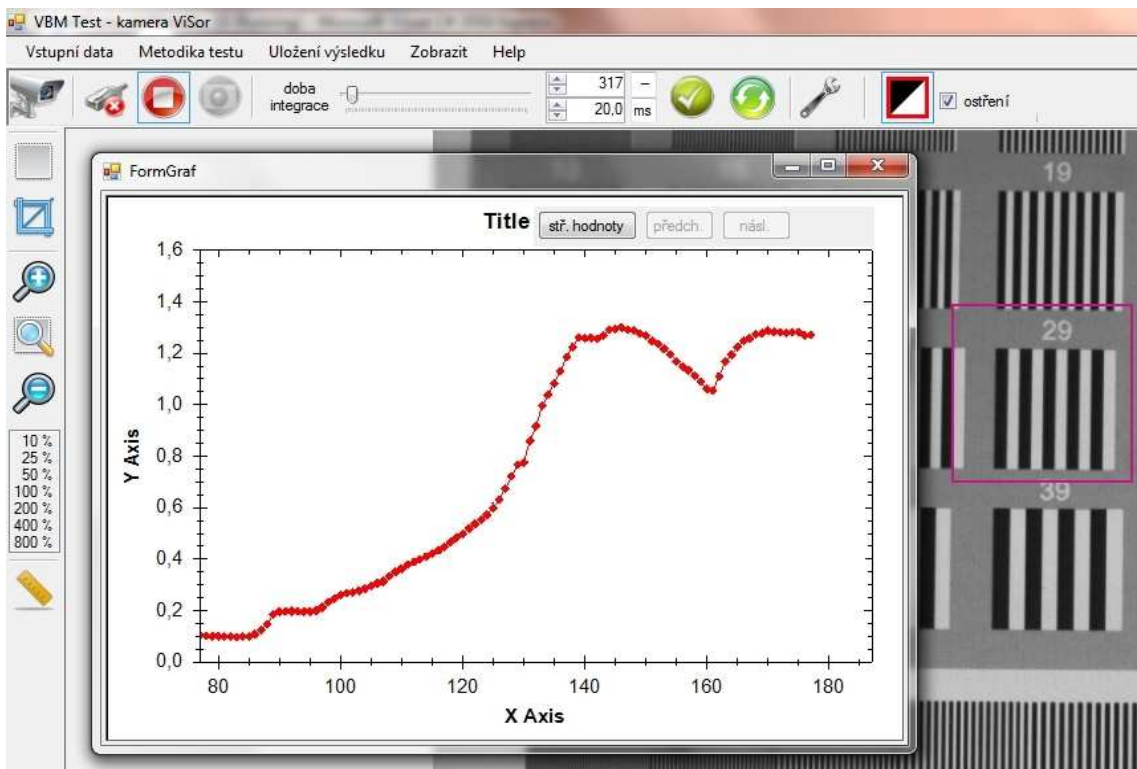


Obr. 56 Vývojový diagram vlákna pro měření relativní ostrosti

Do grafu relativní ostrosti je vždy po přijetí nového snímku a vypočtení hodnot diferencí vynesena maximální hodnota z vypočtených hodnot $DIF_{\text{vysl-x}}$ a $DIF_{\text{vysl-y}}$. Graf se každým nově přijatým snímkem posouvá o novou vypočtenou hodnotu maximální diference, čímž je možné okamžitě sledovat změny při přeostrřování objektivu a historii změn, jak je vidět na obr. 57, který znázorňuje aktuálně rozmazaný obrazec a obr. 58, ve kterém je naopak obrazec zaostřen.



Obr. 57 Sledování relativní ostroty při aktuálně rozmazaném obrazu



Obr. 58 Sledování relativní ostroty při aktuálně zaostřeném obrazu

4.4 Měření pomocí testovacích obrazců

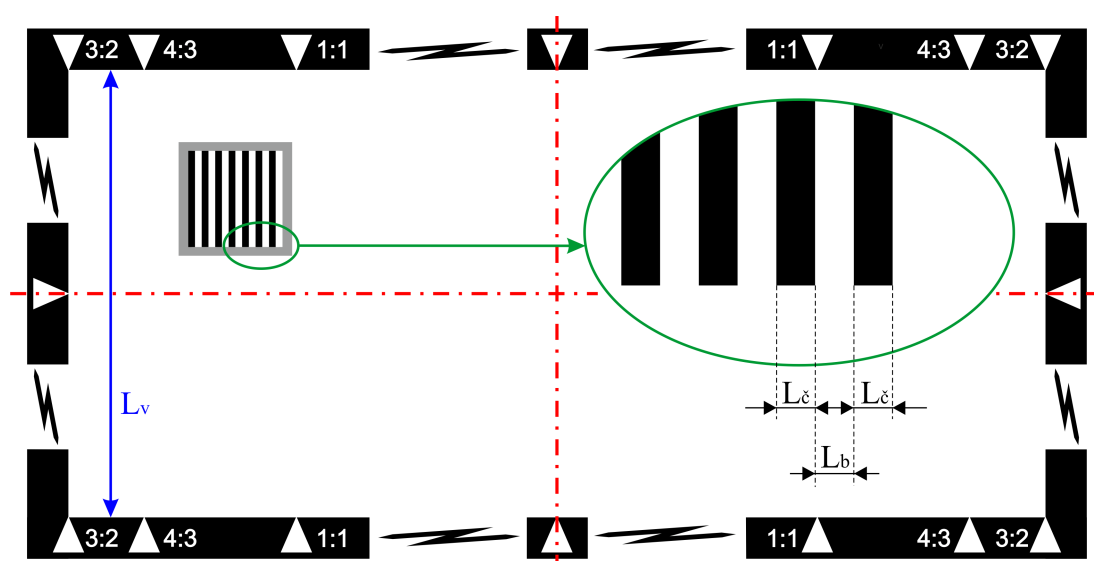
Pro testování rozlišovací schopnosti a radiálního zkreslení bylo potřeba vytvořit vhodné testovací obrazce. Jejich tvorba probíhala v grafickém prostředí CorelDraw. Vytvořené soubory byly uloženy vektorově ve formátu „cdr“ a „pdf“. Z formátu „cdr“ lze v CorelDraw v případě potřeby vyexportovat libovolný z mnoha nabízených obrazových formátů. Formát „pdf“ byl zvolen z důvodu jeho masivního využívání, dostupnosti a vhodným možnostem následného nastavení tisku.

4.4.1 Rozbor návrhu obrazců a jejich tisku

Všechny navržené obrazce jsou uloženy vektorově v barevném formátu CMYK a využívají pouze tři jasové složky, černou ($C=0, M=0, Y=0, K=100$), bílou ($C=0, M=0, Y=0, K=0$) a šedou ($C=0, M=0, Y=0, K=50$).

Obr. 59 znázorňuje rámování, které je u všech testovacích obrazců jednotné a neslouží pro okrasu, ale nabízí dvě možnosti využití. První je možnost využití centračních značek, na obrázku protnutých červenou čerchovanou čarou, pro správné nastavení vzájemné polohy kamery a testovacího obrazce. Druhá vlastnost je, že rozměry rámu mají vůči ostatním prvkům obrazce přesně definovanou velikost, čímž lze např. výšku rámu L_v využít jako kalibrační hodnotu pro definici výšky při měření rozlišovací schopnosti.

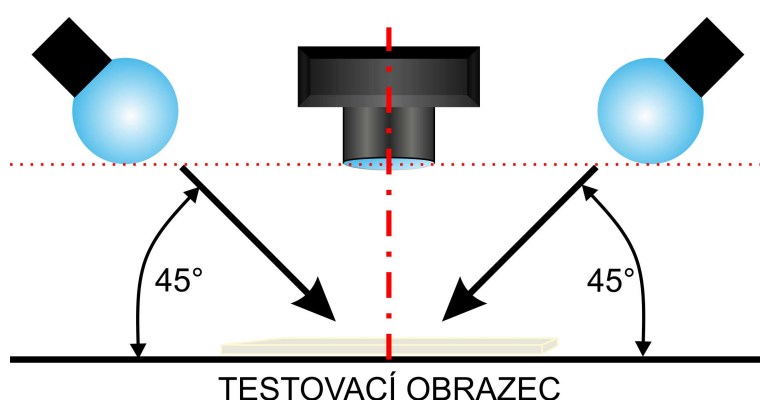
Znázornění značek, definujících poměr velikosti obrazového senzoru, bylo převzato z rozlišovací tabulky pro digitální a filmové fotoaparáty RESfd firmy DanesPicta, kvůli výhodám plynoucích z jejich využití.



Obr. 59 Znázornění rámu a definice rozměrů testovacího obrazce

Testovací obrazce obsahují po každé straně rámu kódovou značku pro definici jejich využití, např. „test *TPxx*“, kde „*TP*“ znamená Test Pruhů a „*xx*“ dále rozvíjí verzi testu.

V prvotní fázi vývoje byly testovací obrazce tištěny na bílý kancelářský papír pomocí laserové tiskárny. Napálený toner z tiskárny ovšem vykazuje vysoký lesk, proto při přímém nasvícení docházelo k nežádoucím odleskům. Aby se tomu zabránilo, bylo použito osvětlení běžně známé např. z fotografických ateliérů, kdy jsou dva difúzní světelné zdroje vůči obrazci umístěné pod úhlem takovým, aby při odrazu odlesky nesměrovaly ke kameře. Také je zde vhodné dodržet podmínku, aby osa vzdálenosti světelných zdrojů, na obr. 60 označena červenou tečkovanou čarou, byla vzdálená od testovacího obrazce dál, než objektiv kamery. V opačném případě by se kvůli zamezení bočního osvětlení objektivu musela použít sluneční clona.



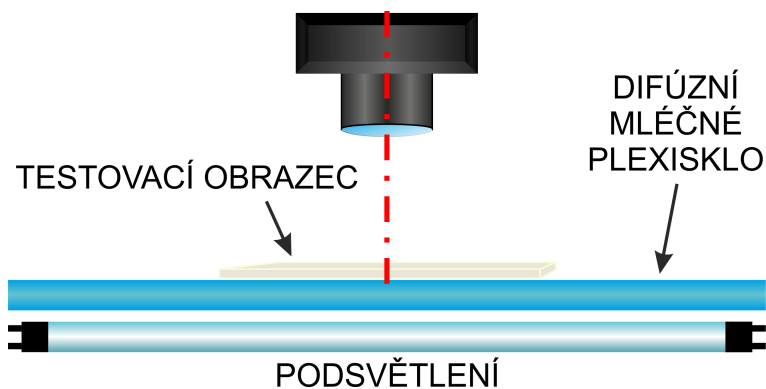
Obr. 60 Přední nasvícení testovacího obrazce

Povrch testovacího obrazce RESfd firmy DanesPicta je matový, což odlesky eliminuje. Pro vyzkoušení zmatnění povrchu testovacího obrazce byl proveden pokus, u kterého se povrch papíru po vytištění nastříkal bezbarvým matovým lakem, prodávaným ve výtvarných potřebách. Ukázalo se, že tato varianta není vhodná kvůli lakem zanechávaným kapičkám, které naopak testování ještě zhoršovaly.

Výše zmíněné nevýhody odstraňuje finální verze provedení testovacích obrazců, které jsou tištěny, opět pomocí laserové tiskárny, ale na průhlednou fólii. Samotný způsob zpracování souboru pro tisk zůstává nezměněn. Rozdíl nastává až při nastavení parametrů tiskárny, který spočívá v nastavení tisku jako „tisk na transparentní fólii určenou pro laserové tiskárny“.

Velkým rozdílem při použití testovacích obrazců, vytištěných na transparentní fólii, je způsob jejich osvětlení. Zatímco při osvětlování testů vytištěných na papír se používá přední nasvícení, u průhledné fólie použijeme spodní podsvícení. Opačná verze osvětlení by ani v jednom případě nebyla vhodná. Podsvícení u testu na papíře by znamenalo velký útlum jasu způsobeného samotným papírem a navíc by byla patrná nehomogenní struktura papíru. Přední osvětlení fólie by zase způsobovalo velké odlesky.

Obr. 61 znázorňuje podsvícení testovacího obrazce. Mimo samotné osvětlovací těleso je velice důležitým prvkem difúzní materiál, umístěný mezi zdrojem osvětlení a testem. Bez jeho přidání by bylo osvětlení na ploše nehomogenní a takový osvětlovač by tedy nebyl pro použití k testování vhodný. Důležitým parametrem je také použitý světelný zdroj. Pokud se bude jednat o žárovku nebo zářivku, které jsou napájeny ze síťového zdroje, bude při měření důležité dodržovat délku expoziční doby, která by v tomto případě musela být násobkem periody síťového napětí, tedy 20ms.



Obr. 61 Spodní podsvícení testovacího obrazce

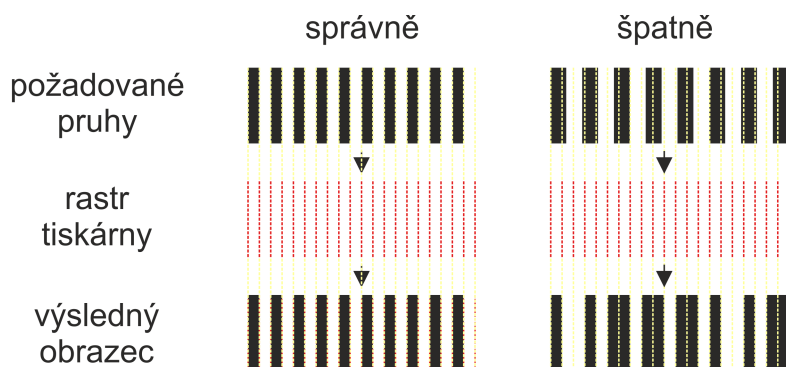
Ukázalo se, že způsob vyhotovení testovacího obrazce na transparentní fólii je pro měření výhodnější. Má ale také určité nedostatky, mezi které patří zejména nedokonalá pohltivost světla černě vytištěnou barvou, která je závislá na vrstvě napáleného toneru.

4.4.2 Obrazce pro měření rozlišovací schopnosti

Na trhu je velké množství testovacích obrazců určených pro měření rozlišovací schopnosti, jejichž grafické prvky, přímo určené pro měření, jsou různých typů a tvarů. Příkladem mohou být například rovnoměrně uspořádané rovnoběžné pruhy, postupně se zužující rovnoběžné pruhy, parabolické sbíhající se pruhy, siemensovy růžice s různým počtem prvků apod. Tyto obrazce mohou mít dle typu testu ostré černobílé hrany, nebo může být přechod mezi černou a bílou sinusový.

Testovací obrazce vytvořené v této práci využívají pouze ostré černobílé hrany. Je to z důvodu relativně nízké rozlišovací schopnosti tisku použité laserové tiskárny, konkrétně 600dpi, která je sice dostačující pro vytvoření testu s velice hustým rastrem, ale již nedokáže tento rastr s vysokým rozlišením stínovat do sinusového přechodu hran.

Při tvorbě testovacího prvku, který je složen z jednotlivých pruhů, musí být splněny následující podmínky. Šířka vykreslovaného pruhu musí být celočíselným násobkem periody rastru tiskárny, protože tiskárna by zbývající rozměr vykreslit nedokázala a došlo by k převzorkování požadovaného obrazce. Dále musí být splněno, že vykreslovaný pruh musí být vůči rastru správně vycentrován, jinak by grafický program nevycentrované hrany vyplnil odstínem odpovídajícím procentuálnímu zastoupení hraničících barev, čímž bychom ztratili hranu s ostrým přechodem.



Obr. 62 Demonstrace převzorkování testovacího obrazce tiskárnou

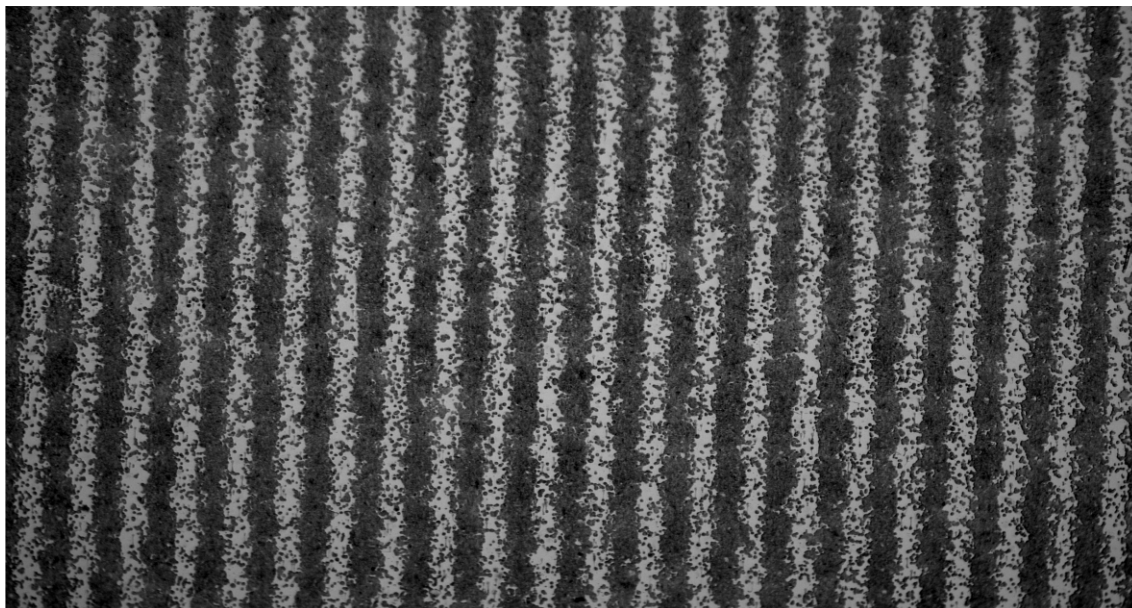
Experimentálním způsobem bylo testováno, jaké nejhustší pruhy dokážou být pomocí použité laserové tiskárny vytištěny. V grafickém programu byly testovací obrazce vytvářeny vektorově a poté byly exportovány pro tisk s rozlišením 600dpi. Použitím mřížky, jejíž hustota byla zvolena dle rastru tiskárny, byly jednotlivé pruhy kresleny se zapnutou funkcí „přitahování k mřížce“, čímž byla zaručena přesnost jejich polohy. Černé pruhy byly vykreslovány tak, aby byla jejich střída s mezerou mezi pruhy 1:1. Touto metodou se podařilo vytisknout obrazec, jehož šířka pruhů L_c i šířka mezery L_b byly tři body. Obrazec, který měl šířku pruhu i mezery dva body, se již nepodařilo vytisknout správně, protože celý obrazec vyjel z tiskárny černý.

Rozlišení vytištěného obrazce s pruhy šířky třech bodů je 100 lpi (Line Per Inch), neboli 3,937 lpm (Line Per Millimeter). Sledování takového rozlišení pouhým okem je již trochu náročné, proto byla pro sledování použita lupa. Pozorováním bylo zjištěno, že i když byla střída originálního obrazce posílaného do tiskárny 1:1, vytištěný obrazec měl šířku černého pruhu širší, než šířku mezery mezi pruhy. Dle této zkušenosti, se snahou získat ještě vyšší rozlišení obrazce, byl proveden další pokus, kterým bylo vytvoření obrazce se šířkou pruhů jeden bod a šířkou mezer mezi pruhy dva body. Získaný obrazec s rozlišením 200 lpi se při pozorování pouhým okem jevil jako šedá plocha. Skutečný fakt, že na obrazci byly vykresleny pruhy, byl potvrzen až použitím lupy. Navíc se zdálo, že střída takového obrazce je 1:1. Výřez obrazce zmíněného rozlišení je uveden na obr. 63.

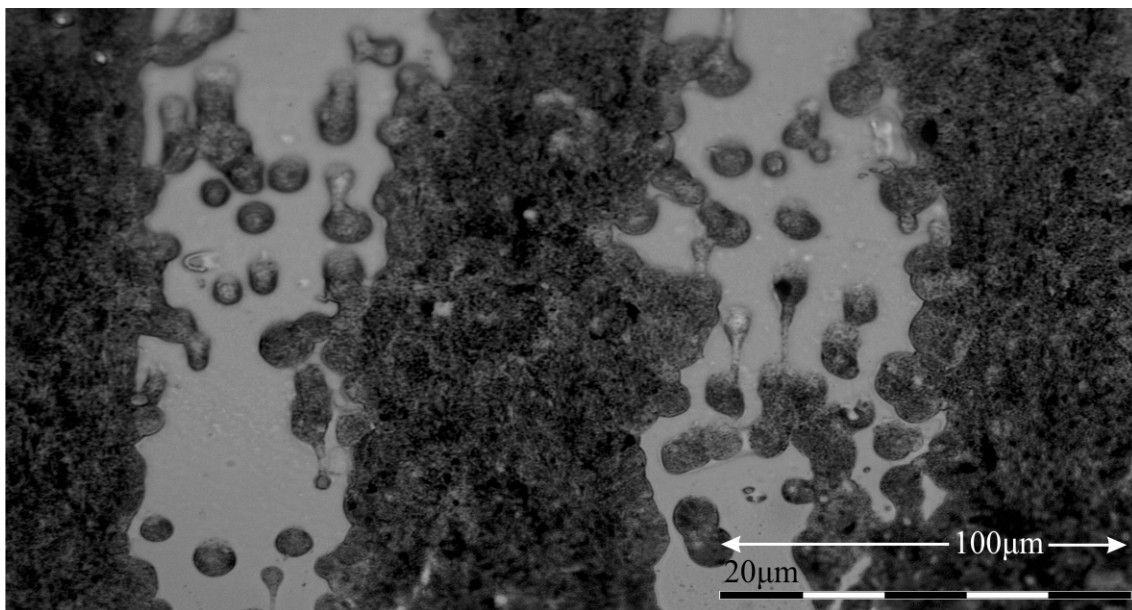


Obr. 63 Nej hustší vytvořený testovací obrazec

Pro účely lepšího prozkoumání nej hustšího vytvořeného obrazce, byl tento obrazec nasnímaný pomocí mikroskopu. Na následujících obrázcích (64, 65) je vidět tento obrazec při použitém zvětšení mikroskopu 4x a 40x.



Obr. 64 Nej hustší vytvořený obrazec nasnímaný pomocí mikroskopu se zvětšením 4x

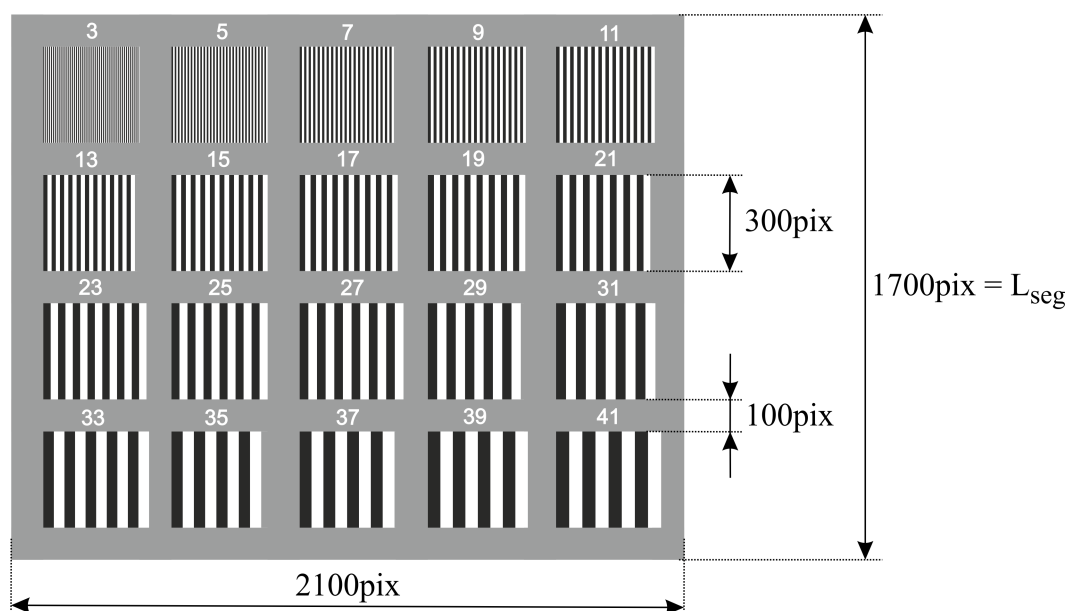


Obr. 65 Nej hustší vytvořený obrazec nasnímaný pomocí mikroskopu se zvětšením 40x

Uvedené mikroskopické obrázky potvrzují domněnku, že laserová tiskárna tiskne vykreslené pruhy širší, než jsou v tištěném souboru. To je zřejmě způsobeno samotným principem laserové tiskárny, u níž toner přilne pouze v místech válce s opačnou polaritou, než na kterou je sám nabitý. Změnu náboje na kovovém válci s tenkou selenovou vrstvou způsobuje nasvícení laseru, jehož působením dochází k prudkému snížení odporu a tím k vybití náboje z nasvícené plochy do středu kovového válce [zdroj 18, 19]. Šířka pruhu bude tedy závislá na rozložení náboje. Uprostřed tmavého pruhu, kde je náboj odčerpán nejvíce, je tloušťka naneseného toneru největší a klesá s přibývajícím nábojem, který je největší v místě mezery mezi pruhy. Další pozorovatelnou zajímavostí jsou drobné fleky způsobující zrnění. Domněnkou je, že tyto malé částice toneru mezi pruhy mohou být způsobeny buďto nehomogenní vrstvou selenu na kovovém válci, nebo spíše náhodným rozprášením toneru, naneseném na papíře, které může být způsobeno drobnými vibracemi při pojezdu papíru a vybíjením jeho náboje ještě v době před zatavením toneru.

Zmíněné, výše popsané nevýhody tisku laserové tiskárny jsou nejvíce pozorovatelné při tisku testů s hustým rastrem. K zrnění dochází pouze v blízkém okolí hrany, které sice degraduje ostrost hrany, ale při nižším rozlišení testů již tuto chybu můžeme zanedbat.

Pro měření rozlišovací schopnosti byly vytvořeny pruhové obrazce různého rozlišení, které jsou umístěny v jednom testovacím obrazci. Jedna z použitých kombinací je uvedena na následujícím obrázku. Čísla uvedená nad jednotlivými pruhy udávají šířku hodnot L_c a L_b . Ohraničení pruhů šedou plochou ($C=0, M=0, Y=0, K=50$) je zvoleno záměrně. V případě, kdy je rozlišení kamery pro zobrazení dané skupiny pruhů nedostatečné, dochází v obrazu k jejich rozmazání do odstínu šedé, tedy jasové hodnotě podobné odstínu okolí.

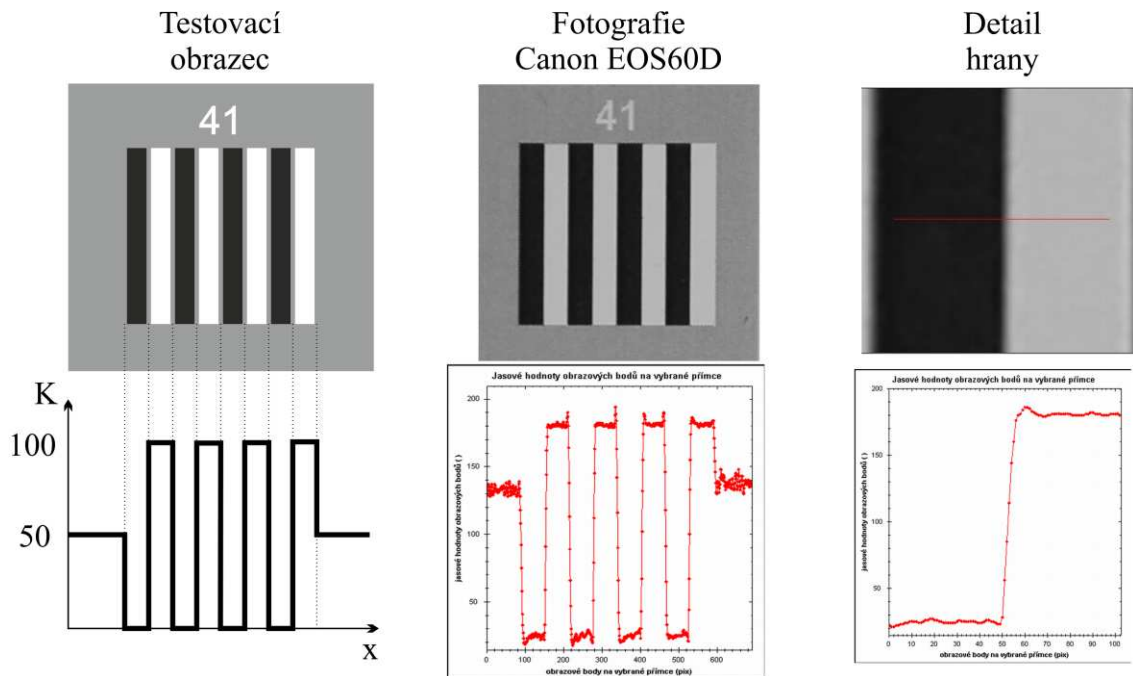


Obr. 66 Segment testovacího obrazce

4.4.3 Vyhodnocování měření rozlišovací schopnosti

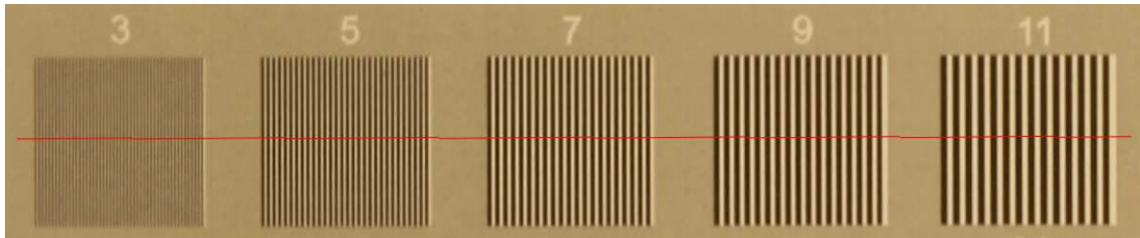
Při měření rozlišovací schopnosti se výsledek většinou udává v jednotkách „počet párů čar na milimetr“ (lpm), nebo „počet párů čar na výšku obrazu“. Pro měření rozlišovací schopnosti objektivu je vhodnější využít první možnost, protože objektiv může být použit pro více typů obrazových senzorů různých rozměrů. Pro vyhodnocení pak musíme znát přesnou velikost obrazového senzoru, nebo alespoň jednu z jeho stran, abychom mohli přepočíst naměřenou hodnotu rozlišení vztaženou k pixelům na jednotku délky.

Měření rozlišovací schopnosti pomocí pruhových segmentů, které jsou uvedeny na obr. 66, neumožňuje náměr rozlišovací schopnosti kontinuálně, nýbrž pouze výběr hodnoty rozlišení dle konkrétního políčka, které ještě splňuje předem zvolené parametry. Ještě před jejich stanovením se podíváme na obraz pruhů s takovou periodou, která mnohonásobně převyšuje rozlišovací schopnost kamery.



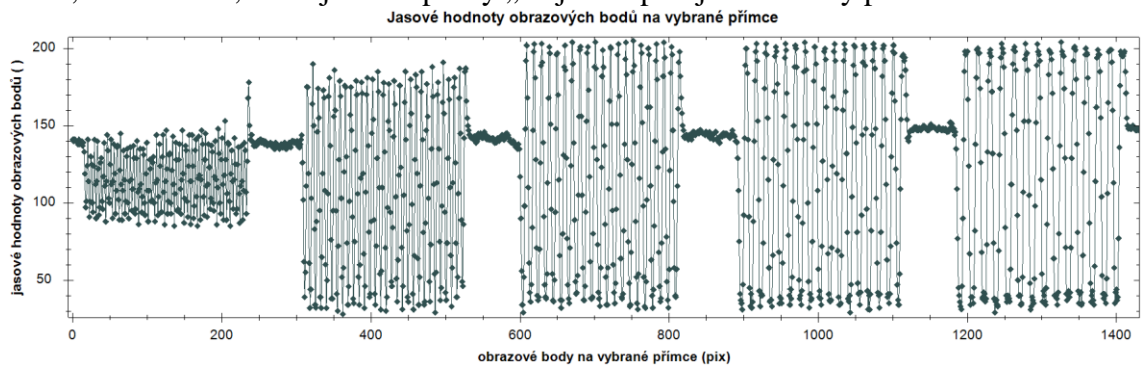
Obr. 67 Obrazec a jeho signál a) z originálu testu b) z fotografie c) z detailu hrany fotografie

Ve výřezu vyfotografovaného obrazu, ve kterém jsou pruhy L_a a $L_b = 41$, je vidět pěkné prokreslení jednotlivých pruhů. Z jejich jasového profilu, ve kterém jsou minima a maxima až na malé zákmity relativně stabilní, lze vypočítat hodnotu kontrastu měřeného úseku dle vztahu (24). Hodnotu kontrastu můžeme využít pro stanovení podmínky pro klasifikace jednotlivých obrazců různé hustoty. Pokud bude kontrast vyšetřovaného obrazce daného rozlišení nižší než 50% z nejvyššího kontrastu nalezeného v testovacím obrazci, budeme daný obrazec považovat za již nevyhovující. Výpočet maximálního kontrastu testovacího obrazu provedeme z místa, ve kterém je velká plocha černé a bílé barvy, tedy např. z oblasti rámu obrazce, který byl uveden na obr. 59. Na obr. 68 je zobrazen výřez nasnímaného obrazce, který byl vyfotografován pomocí zrcadlovky Canon EOS60D s objektivem Sigma 24-70mm; 1:2,8; EX DG. Na tomto výřezu bude proveden zmíněný výpočet kontrastu.

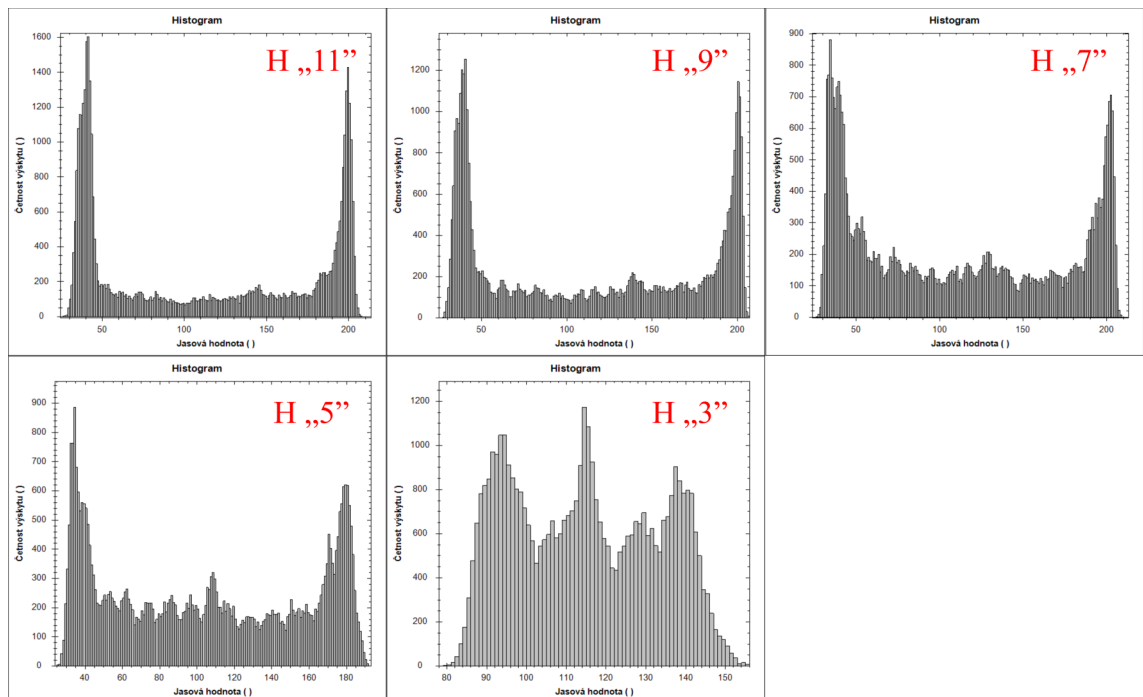


Obr. 68 Výřez fotografie testovacího obrazce

Pokud se v uvedeném výřezu na obr. 68 podíváme na jasový profil vybrané přímky, který je uveden na obr. 69, vidíme, že hodnota kontrastů pruhů „7“, „9“ a „11“ je téměř stejná. Tyto pruhy jsou dostatečně prokresleny a hodnota jejich kontrastu je shodná s hodnotou kontrastu v místě rámu obrazce. Proto můžeme danou hodnotu kontrastu, jejíž hodnota je $170/230 \doteq 0,74$ považovat za výchozí, maximální. Všechny náměry pruhových obrazců, jejichž hodnota kontrastu bude nižší než 0,37, tedy budeme považovat za nevyhovující. Hodnota kontrastu pruhů „5“ se mírně snížila na hodnotu 0,72 a u pruhů „3“ již rapidně poklesla na hodnotu 0,23. Závěrem tohoto měření tedy bude, že rozlišení, které je dáno pruhy „3“ již nespĺňuje nastavený požadavek měření.



Obr. 69 Jasové hodnoty na vybrané přímce v obr. 68



Obr. 70 Histogramy jednotlivých segmentů testovacího obrazce znázorněného na obr. 68

Dalším výborným nástrojem pro zkoumání kontrastu je histogram. Na obr. 70 jsou znázorněny histogramy z jednotlivých segmentů testovacího obrazce, uvedeného na obr. 68. Označení $H_{„11“}$ znázorňuje histogram z testovacích pruhů šíře 11 apod. První tři histogramy ($H_{„11“}$, $H_{„9“}$ a $H_{„7“}$) mají shodné jasové hodnoty svých extrémů. Se zvyšujícím se rozlišením pruhových segmentů ovšem klesá četnost jejich výskytu. Pokud se zaměříme na pásmo mezi nalezenými extrémy černé a bílé, zjistíme patrný nárůst plochy, jenž je tvořena jednotlivými jasovými složkami mezi extrémy. Toto pásmo, jehož plocha je závislá na míře rozmazání, označíme jako pásmo šedé. V histogramu $H_{„5“}$ došlo k poklesu jasové složky bílého extrému a v histogramu $H_{„3“}$ k výraznému přiblížení extrémů černé a bílé a navíc, extrém výskytu šedé překročil jejich hodnoty.

Výše zmiňovanými postupy můžeme posoudit, který ze segmentů testovacího obrazce, ještě jako poslední, splňuje zvolenou požadovanou podmínku. Pro samotný výpočet rozlišovací schopnosti dále potřebujeme znát velikost obrazového senzoru a parametry projekce, pomocí kterých bychom přepočítali rozlišení testovacího obrazce na rozlišovací schopnost kamery. Protože testovací obrazce mají jednotlivé rozměry přesně definované, bude snadnější využít poměrového měření, u kterého v programu změříme pravítkem daný rozměr testovacího obrazce v pixelech a pomocí získané konstanty se dopočítá výsledek rozlišení.

Na obr. 66 byl uveden jeden segment testovacího obrazce. Konkrétně ve vytvořeném testu TP01 se nachází šest těchto segmentů, které jsou vůči sobě horizontálně a vertikálně natočeny. Čísla, uvedená nad jednotlivými pruhovými segmenty, udávají šířku L_c a L_b v jednotkách pixelů. Perioda pruhů je tedy dvojnásobkem uvedené hodnoty. Rozlišovací schopnost daného pruhového segmentu R_{seg} se vypočte dle vztahu:

$$R_{seg} = \frac{\text{výška segmentu}}{L_c + L_b} = \frac{\text{výška segmentu}}{\text{číslo uvedené nad pruhy}}, \quad (29)$$

kde výška segmentu představuje výšku, ke které budeme vztahovat jednotku rozlišení pruhového segmentu, což může být např. hodnota L_v z obr. 59, nebo hodnota L_{seg} z obr. 66. Pokud zvolíme druhou možnost, tedy hodnotu $L_{seg} = 1700$ pixelů, bude hodnota rozlišení R_{seg} dle vztahu (29), např. pro „pruhy 5“, jenž splňují podmínku kontrastu, rovna:

$$R_{seg} (\"5\") = \frac{1700}{5+5} = 170 \text{ [počet párů čar na výšku } L_{seg} \text{]} .$$

Prováděný náměr byl nasnímán zrcadlovkou Canon EOS60D, jejíž obrazový senzor má velikost 22,3 x 14,9 mm (H_{obrX} x H_{obrY}) a rozlišení 5184 x 3456 pixelů (L_{obrX} x L_{obrY}). Délka L_{seg} byla v programu naměřena s hodnotou

$$L_{seg} = 1242 \text{ pix,}$$

tedy rozlišení na výšku celého obrazu $R_{obr} (\"5\")$ bude rovno

$$R_{obr} ("5") = \frac{L_{obrY} \cdot R_{seg} ("5")}{L_{seg} \cdot H_{obrY}} = \frac{3456 \cdot 170}{1242 \cdot 14,9} \doteq 31,7 \text{ [lpm]} . \quad (30)$$

Jak již bylo zmíněno, nevýhodou měření pomocí vytvořeného testovacího obrazce je volba výsledku z omezeného počtu použitých segmentů daného rozlišení. Např. v tomto případě víme, že segment (L_c a $L_b = 3$) nevyhověl požadované podmínce. Pokud bychom měli k dispozici segment (L_c a $L_b = 4$) a byla by u něj splněna podmínka měření, rozlišovací schopnost přístroje by byla:

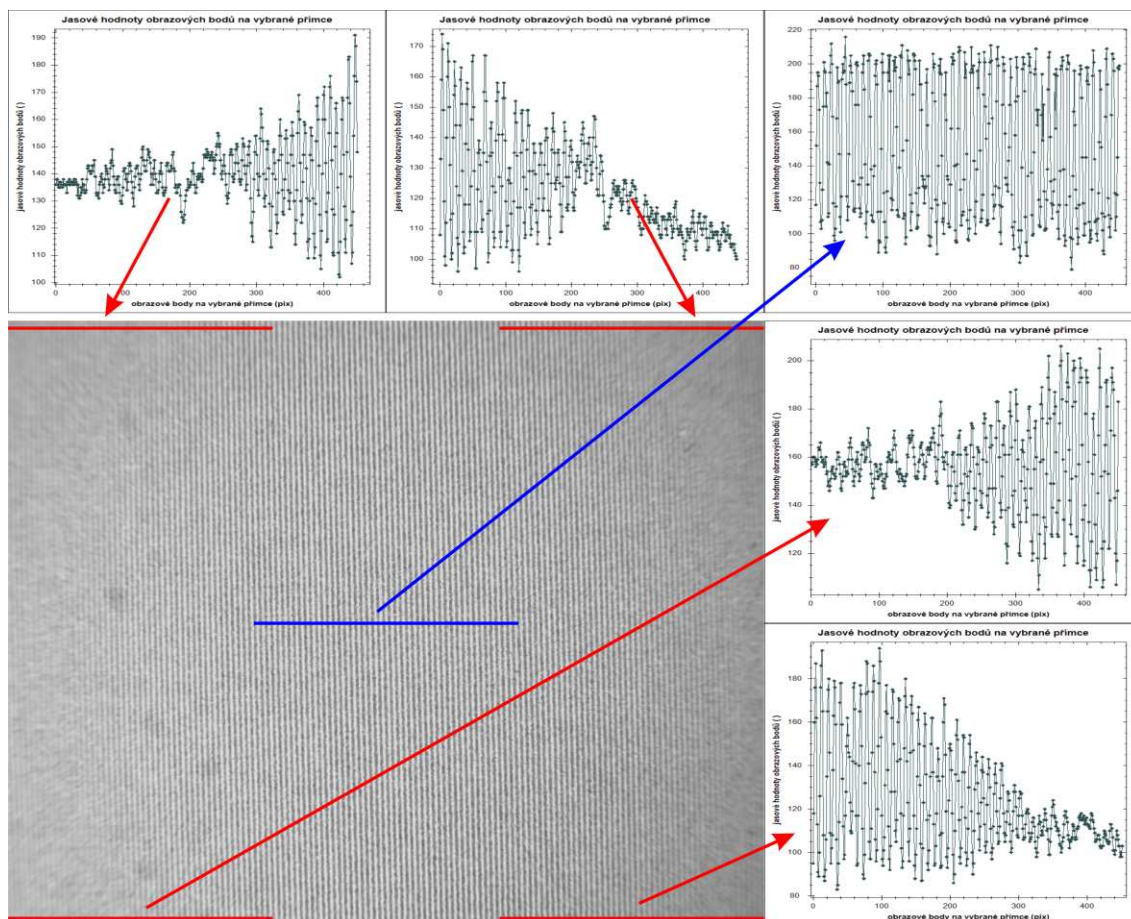
$$R_{obr} ("4") \doteq 39,7 \text{ lpm} .$$

Pro zmíněné výpočty je potřeba znát velikost obrazového senzoru použitého v měřené kameře. Do programu jsou zakomponovány velikosti dostupných obrazových senzorů, ze kterých lze zvolit požadovaný. To lze provést výběrem z příslušného rozbalovacího panelu, jenž je umístěn v pravé horní části obrazovky. V případě, že v seznamu požadovaný senzor není, lze jeho rozměry zadat ručně. Výjimku tvoří kamera ViSor, po jejímž připojení se nastavení velikosti senzoru, ve zmiňovaném panelu, provede automaticky.

Další nutnou hodnotu pro výpočet rozlišovací schopnosti tvoří proměnná L_{seg} . Její hodnotu lze v programu měřit za pomoci funkce pravítka. Výpočet rozlišovací schopnosti, tedy implementace výše uvedených vztahů, zatím nebyla do programu přidána a to z časových důvodů.

4.4.4 Obrazce pro měření plošného rozložení ostrosti

Pro toto měření lze využít obrazec s rovnoměrnou strukturou, tedy např. velice jednoduchý testovací obrazec s rovnoběžnými pruhy, jejichž parametry L_c a L_b jsou konstantní. Princip měření spočívá ve sledování prokreslení snímaných pruhů v různých částech pořízeného obrazu. Měření má smysl provádět spíše při nižších hloubkách ostrosti objektivu, kdy lze lépe sledovat plošné změny ostrosti, nebo kontrastu. Toto měření je vhodné například při testování správnosti optické osy kamery, kdy kameru umístíme kolmo vůči testovanému obrazci a při změnách zaostření sledujeme symetrii ostrých ploch obrazu.



Obr. 71 Snímek svislých pruhů a jeho jasové profily na vybraných přímkách

Náměr uvedený na obr. 71 byl nasnímán kamerou ViSor s objektivem Meopta VIDEO OPTICON 1,4/16 a s použitím dvou mezikroužků šířky 5mm.

Pro jednotlivá místa obrazu můžeme vypočítat hodnotu kontrastu dle vztahu (24).

Ze středu obrazu byly vyčteny hodnoty:

$$A_{\max} = 210, A_{\min} = 90 \quad \Rightarrow \quad K = 120/300 = 0,4 .$$

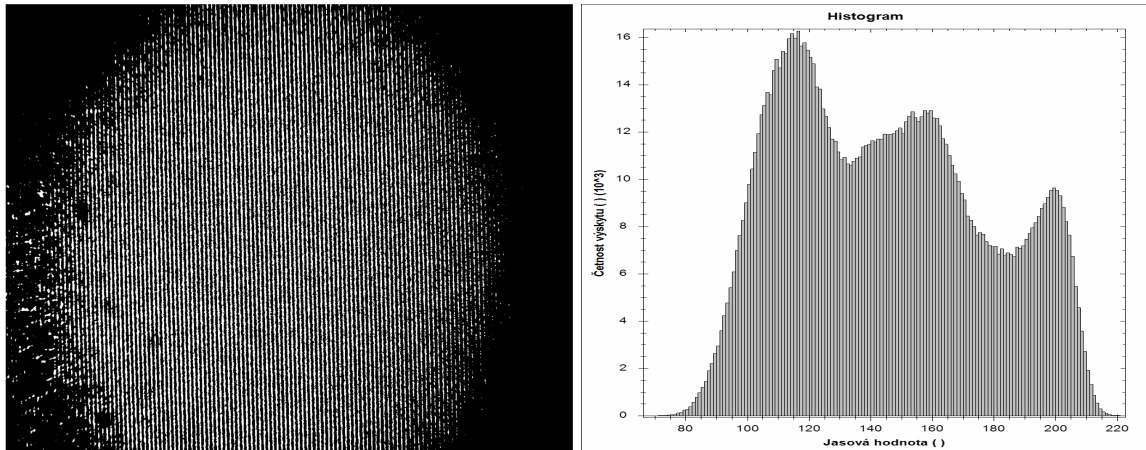
Hodnoty v levém horním okraji:

$$A_{\max} = 137, A_{\min} = 135 \quad \Rightarrow \quad K = 2/272 = 0,0074 .$$

Podobně nízké hodnoty kontrastu vychází ve všech rozích obrazu.

Dalším vhodným nástrojem, umožňujícím jiný pohled na symetrii ostrých ploch snímané scény, je využití jednoduché funkce práhování. Nastavením vhodné práhovací hodnoty lze pro sledování rozložení ostrosti využít skutečnosti, že v rozostřených plochách se mění jasová hodnota. Na obr. 72a je znázorněna měřená scéna s využitím práhování s nastavenou práhovací hodnotou 174. Z obrázku je patrné symetrické rozložení ostrých míst v obraze. Obr. 72b znázorňuje histogram pozorované scény, v němž jsou patrné tři dominantní vrcholy funkce. Levý a pravý vrchol popisuje správně

zobrazené tmavé a světlé pruhy, prostřední naopak rozmazanou oblast. Nastavením práhovací hodnoty 174 (jasové hodnoty <174 jsou černé, ostatní bílé) se tedy „ořízla“ rozmazaná oblast, tvořící prostřední oblast znázorněného histogramu. Podobného efektu pro sledování ostrého středu lze docílit nastavením práhovací hodnoty cca 100-120, u něhož budou rozostřené plochy vykresleny bílou barvou.



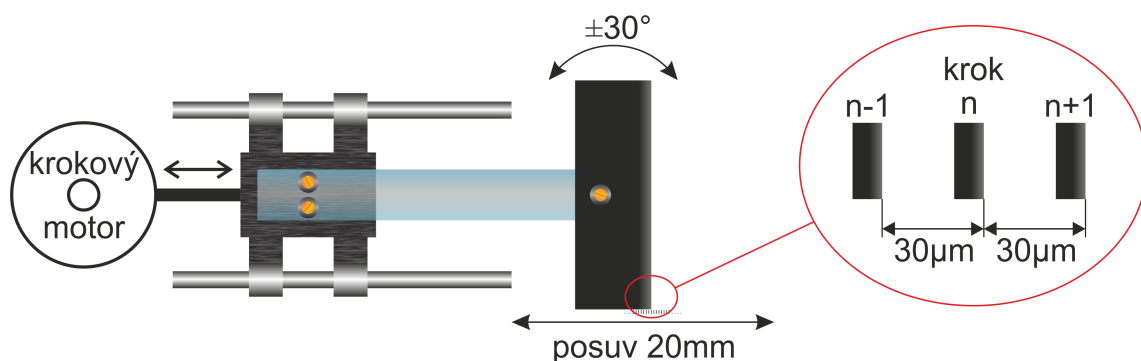
Obr. 72 Zkoumaný obraz: a) jeho prahování hodnotou 174, b) jeho histogram

S využitím pruhového obrazce, jehož hustota pruhů bude hodně vysoká, lze plošné rozložení ostrosti sledovat ještě dalším způsobem. Pokud porušíme jednu z nejdůležitějších vět z teorie signálu, tj. vzorkovací větu, která je popsána v kapitole 1.2.3 „Rozlišovací schopnost“, kdy záměrně použijeme nízkou rozlišovací schopnost obrazového senzoru pro daný obrazový test, dosáhneme při výborně zaostřeném objektivu aliasingu, který se zobrazí pouze v místech největší ostrosti objektivu. Ostatní místa zůstanou díky vysoké hustotě pruhů rozmazány.

4.5 Měření s pomocí hardware pro posouvání ostrého břitu

4.5.1 Přípravek pro posouvání hrany

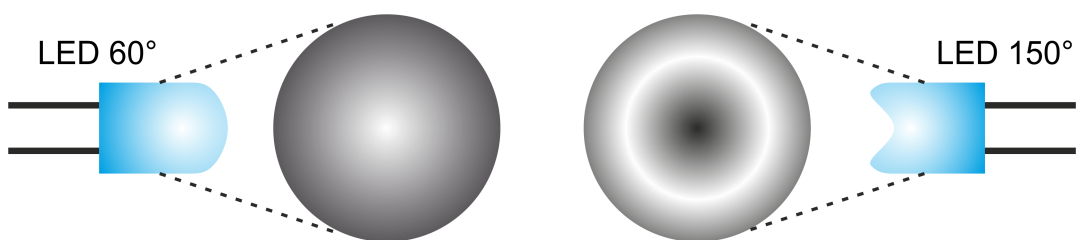
Tento přípravek vznikl z důvodu potřeby rozvíjet hranu při měření rozlišovací schopnosti. K jeho výrobě byl použitý mechanický pojezd z 5¼ palcové disketové mechaniky. Ten obsahuje krokový motor, ze kterého je rotační pohyb převáděn na lineární pomocí tří ocelových pásků, ze kterých se při pohybu jedním směrem dva navíjejí a jeden odvíjí a obráceně. Díky tomu nedochází k přenosové vůli, jako např. při přenosu točivého momentu pomocí ozubených kol.



Obr. 73 Schematické znázornění pohyblivé části přípravku pro posouvání hrany

Z disketové mechaniky bylo odstraněno vše, kromě pojezdové mechaniky a krokového motoru. Z té ještě byla odstraněna magnetická hlava a nepotřebné výčnělky. Tím se uvolnil prostor pro přidělení ostrého břitu, který je k pojezdové mechanice připevněn pomocí plexiskla, jenž je z jedné strany pevně přišroubováno k pojezdové mechanice a z druhé strany má jednu díru pro připevnění břitu s následnou možností rotace. Z důvodu získání co nejpřesnější hrany bylo zvoleno jednoduché a dostupné řešení, kterým je ostrý břit s vysouvacího a lámacího nože. Ten byl pro tyto účely podélně zkrácen a zabroušen do požadované délky. Uprostřed byla vybroušena díra pro možnost pohyblivého uchycení do již zmiňovaného plexiskla. Jelikož materiál břitu je ocel, která je lesklá a má vysokou odrazivost povrchu, byl břit natřen ve dvou vrstvách černou matovou olejovou barvou. Ta ale zanechala po hranách drobné výčnělky, proto bylo pro jejich odstranění ostrím břitu mírně přejeto po jemném brusném papíru.

Dále bylo potřeba vyřešit osvětlení. Kdybychom osvětlovali břit z přední strany, docházelo by k nežádoucím odleskům, protože i když je břit začerněn, jeho povrch samozřejmě ideálně světlo nepohlcuje. Ideálním řešením tedy bylo podsvětlení, pomocí kterého se získá vysoký kontrast měřené hrany. Toto podsvětlení bylo řešeno podobně jako osvětlení řízeného osvětlovače, tedy pomocí matice LED. V tomto případě ale potřebujeme dosáhnout lepší homogenity osvětlení, abychom se co nejvíce přiblížili k ideálnímu skokovému signálu, u něhož jsou v případě obrazu požadovány pouze dvě jasové úrovně, tj. černá a bílá. Kvůli mírné nehomogenitě osvětlení u řízeného osvětlovače byly při výrobě podsvětlení břitu, s očekáváním lepšího výsledku, pokusně použity LED, jejichž vyzařovací úhel je 150°. Ukázalo se, že úhel osvětlení je skutečně větší, ovšem s horším osvětlením samotného středu. Pro znázornění problematiky jsou zmíněné rozdíly použitých LED zobrazeny na obr. 74. Obrázek není ve správném měřítku, je pouze ilustrační.



Obr. 74 Ilustrace nehomogenity osvětlení použitých LED

Pro vyřešení tohoto problému byla vymyšlena dvě možná řešení. Prvním bylo zabroušení jinak hladkého povrchu LED, k získání větší difuze. Při použitém počtu diod by to ale bylo zbytečně pracné a navíc by se nezaručilo stejné opracování u všech kusů. Proto bylo zvoleno druhé, efektivnější řešení, kterým je použití dvou mléčných plexiskel místo jednoho. Ty jsou navíc od sebe vzdálené, čímž je dosaženo ještě lepších výsledků homogenity.

Jelikož v tomto případě není potřebné přesné řízení jasu v průběhu měření, bylo pro napájení LED zvoleno pouze stejnosměrné napětí, s možností manuální regulace výkonu potenciometrem.

4.5.2 Posuv ostrého břitu krokovým motorem

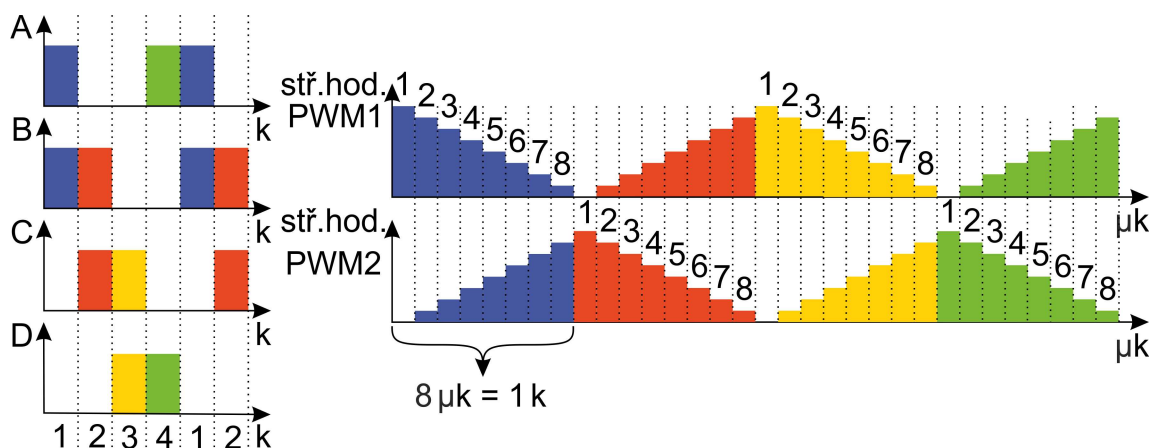
Pro využití metody měření rozlišovací schopnosti s rozvinutím hrany bylo nutné zabezpečit synchronizaci kamery a posuvu snímané hrany. K tomu bylo potřeba zabezpečit komunikaci přípravku s hlavním programem. Popisovaný přípravek, stejně jako přípravek řízeného osvětlovače, využívá řídicí desku, popisovanou v kapitole 8. Ta posílá potřebné signály sloužící pro rotaci krokového motoru.

Použitý krokový motor má napájení cívek napětím 12V. Řídicí deska se stará pouze o řídicí signály, jejichž výkon a napěťová úroveň jsou pro přímé připojení k motoru naprosto nedostatečné. Proto bylo nutné k motoru vyrobit výkonovou část, jehož schéma je uvedeno v příloze. Aby nemohlo dojít k poškození mikroprocesoru ze strany motoru, jsou tyto části od sebe galvanicky odděleny optočlenem.

V první fázi vývoje přípravku bylo pro rotaci krokovým motorem využíváno pouze základní řízení krokového motoru se signály „AB, BC, CD, DA“, které ale neumožňovalo získat dostatečně malé kroky pojezdu. V takovém případě bylo nutné zvětšit vzdálenost mezi přípravkem a kamerou. Tato vzdálenost se odvíjí od požadovaného počtu kroků potřebných pro posuv promítnuté hrany o vzdálenost jednoho pixelu na obrazovém snímáči a od ohniskové vzdálenosti objektivu.

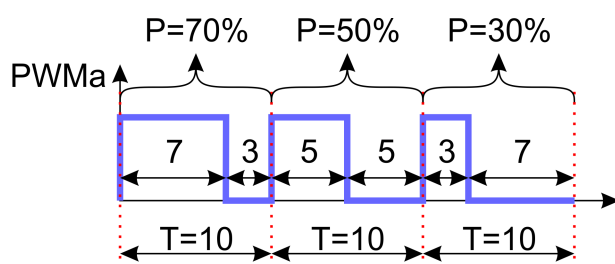
Z výše uvedeného nedostatku byla v další fázi vývoje přidána funkce mikropojezdu krokového motoru. K tomu bylo také nutné předělat řídicí desku, která v první verzi neobsahovala logický integrovaný obvod AND, který se ve finální verzi využívá k logickému násobení signálu pro výběr dané cívky motoru a PWM signálu pro nastavení její výkonu.

Pro zmenšení délky kroku pojezdu byl jeden krok motoru rozdělen do osmi mikrokroků. Toho se docílilo přeprogramováním mikroprocesoru a použitím zmíněného logického obvodu. Výkon, pro vždy dvě aktivní cívky, je regulován pomocí PWM. Obr. 75 znázorňuje signály, které jsou využívány pro řízení mikropojezdu. Graf po levé straně je shodný s řízením krokového motoru po celých krocích. K těmto signálům přibýly signály PWM1 a PWM2, jejichž výkonová posloupnost kroků byla v první fázi testování mikropojezdu lineární.



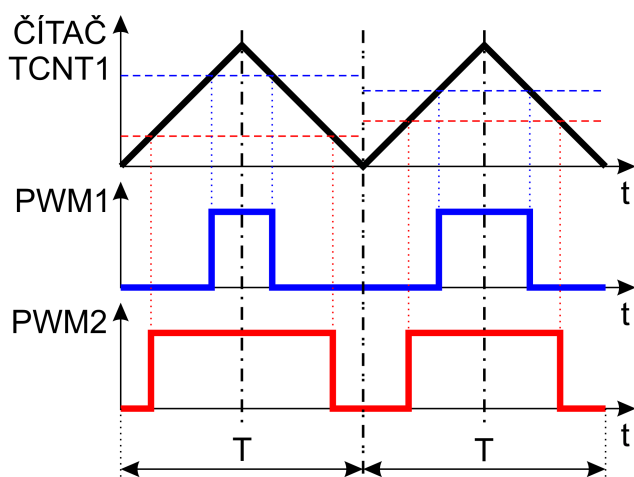
Obr. 75 Grafické znázornění signálu mikropojezdu

Řízení výkonu dvou aktuálně napájených cívek krokového motoru lze udělat pomocí běžné změny střídavy, jak je uvedeno na obr. 76. K tomu by stačilo využít pouze jeden čítač mikroprocesoru, ze kterého by se generovaná střída, na obrázku pojmenována jako PWMa, využila např. pro napájení PWM1 a pro napájení PWM2 by se tato střída negovala. Po poradě s vedoucím práce jsme ovšem došli k názoru, že tento způsob použití PWM nebude vhodný, kvůli jemným mechanickým zákmitům rotoru mezi aktuálně napájenými cívkami, protože v každém momentu by byla napájena pouze jedna z nich.



Obr. 76 Běžné generování střídavy pomocí PWM

Řešení tohoto problému nabízí využití fázově a frekvenčně korigovaného režimu PWM, jehož jedna perioda je sice oproti běžnému režimu dvojnásobná, protože čítač v průběhu jedné periody čítá nahoru i dolů, ale umožňuje generování dvou PWM signálů, které jsou vůči sobě umístěny symetricky. Čítač „Timer/Counter1“ mikroprocesoru ATmega8 má pro PWM k dispozici dva registry pro řízení dvou výstupních pinů, kdy každý z nich má samostatně nastavitelnou úroveň překlopení logické úrovně. Pokud bychom chtěli řízení, jako v předchozím případě, kdy součet délky aktivních hran signálů PWM obou kanálů jedné periody byl roven celé periodě, stačí nastavit komparační úroveň prvního registru jako „K1“ a druhého jako „STROP – K1“. Situaci znázorňuje obr. 77.



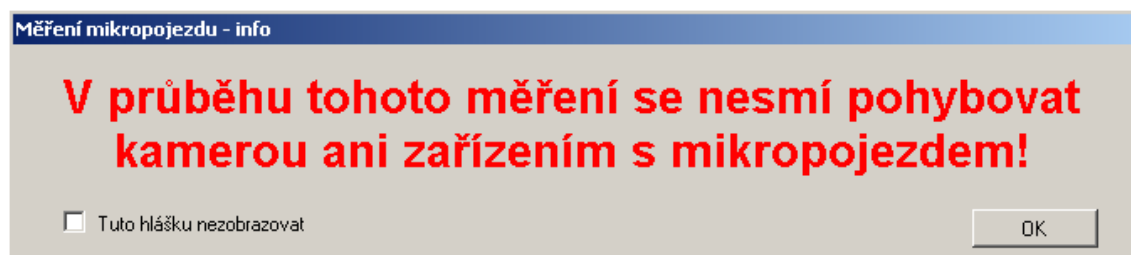
Obr. 77 Fázově a frekvenčně korigovaný režim PWM (dle zdroje 16)

Tento způsob řízení eliminuje zákmity rotoru díky symetrickému rozložení použitých signálů PWM, protože v průběhu jedné periody dojde k drobnému zákmitu jak na jednu, tak na druhou stranu.

Po otestování použité metody řízení mikropojezdu sice bylo vidět, že se krok pohybu zmenšil, ovšem již na první pohled byl patrný nelineární pojezd. Pro otestování délky jednotlivých kroků byla pro hlavní program naprogramovaná funkce, která ve finále posloužila také k linearizaci mikropojezdu. Tato funkce využívá samotnou kameru s využitím makroobjektivu, přesněji řečeno běžného objektivu a mezikroužku. Použitím mezikroužku bylo dosaženo většího zvětšení, čímž se délka jednoho kroku rozložila na více pixelů. Pro testování bylo vytvořeno samostatné vlákno, které obsluhuje kameru i přípravku pro posuv bříty.

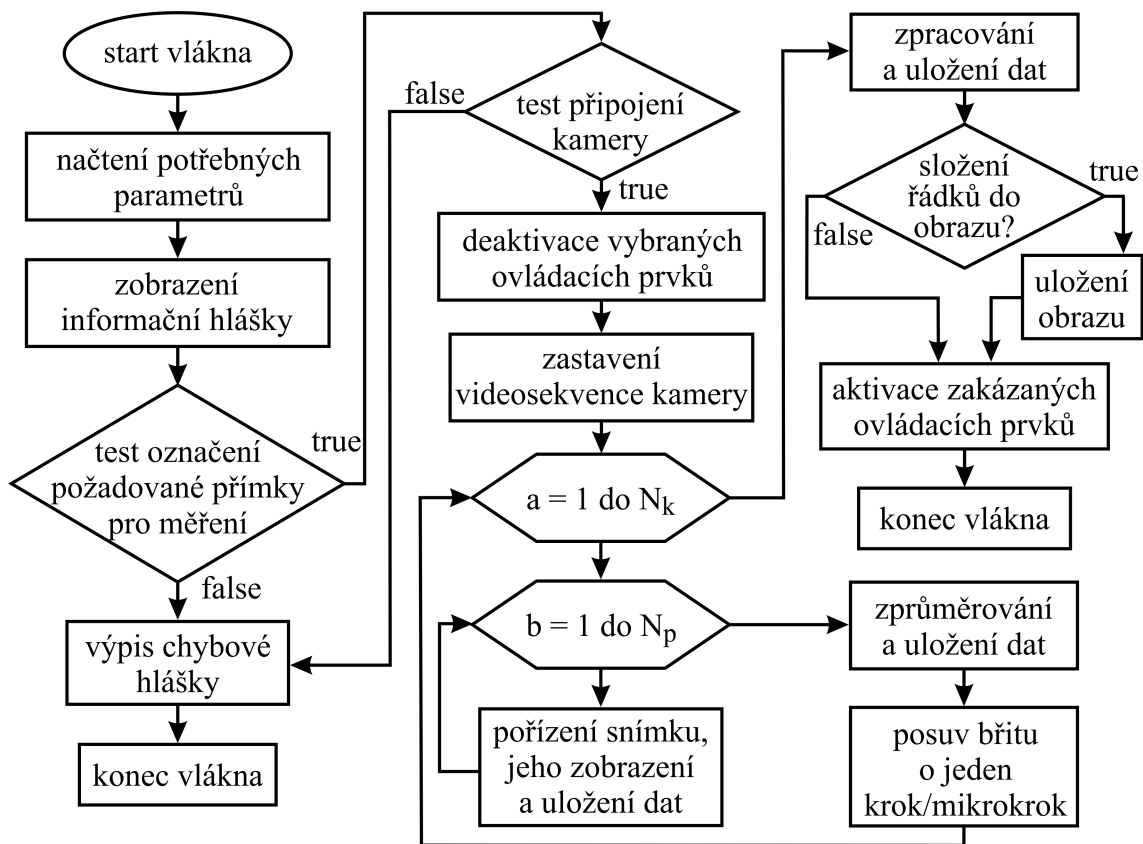
4.5.3 Vlákno pro kalibraci mikropojezdu

Po stisku tlačítka „Spustit měření mikropojezdu“ je sled události podobný, jako u ostatních funkcí hlavního programu, které pro měření využívají samostatné vlákno. Nejdříve se testuje, zdali již vlákno „kalibraceMikroposuvu“ není aktivní. Pokud ano, ukončí se, pokud ne, vytvoří se jako nové vlákno. Poté se načtou uživatelem přednastavené hodnoty. Dále, jelikož měření je velice citlivé na zachování vzájemné polohy kamery a přípravku, je zobrazena hláška upozorňující obsluhu na tuto skutečnost. U této hlášky lze zaškrtnout, že se již nemá při dalším měření zobrazit.



Obr. 78 Informační hláška vlákna pro měření mikropojezdu

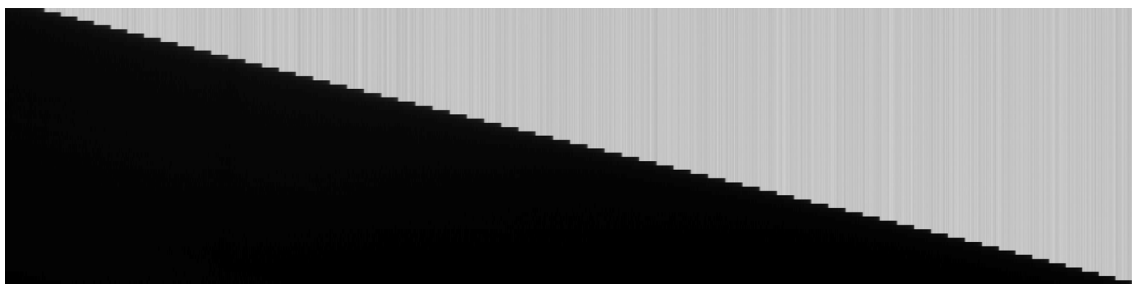
Před spuštěním vlákna je nutné zvolit řádek, ze kterého se budou zpracovávat náměry. Uživatel si může zvolit, zdali chce jednotlivé řádky z náměrů ukládat a když ano, může si zvolit cestu pro jejich uložení. Také je zde možnost po ukončení měření uložené řádky spojit do jednoho obrazu, ve kterém budou posuvy bříty znázorněné jako schody. Tyto schody by byly při pouhém uložení jednotlivých řádků na sebe velice úzké, díky čemuž by nebyly dobře pozorovatelné. Proto se každý z řádků ukládá vícenásobně nad sebe, přičemž tento počet je vypočten a zaokrouhlen v programu tak, aby výsledný formát obrazu byl cca 2:3. Zjednodušený vývojový diagram vlákna pro kalibraci mikropojezdu je znázorněn na obr. 79. Konstanta N_k znamená uživatelem zvolený počet kroků, nebo mikrokroků a konstanta N_p vyjadřuje počet snímků pořízených v jednom kroku pro následné zprůměrování. Zdali se bude břit posouvat po celém kroku, nebo mikrokroku, volí uživatel označením příslušného zaškrtačacího tlačítka.



Obr. 79 Vývojový diagram vlákna pro kalibraci mikropojezdu

Náměr polohy bříty při pojezdu po celých krocích

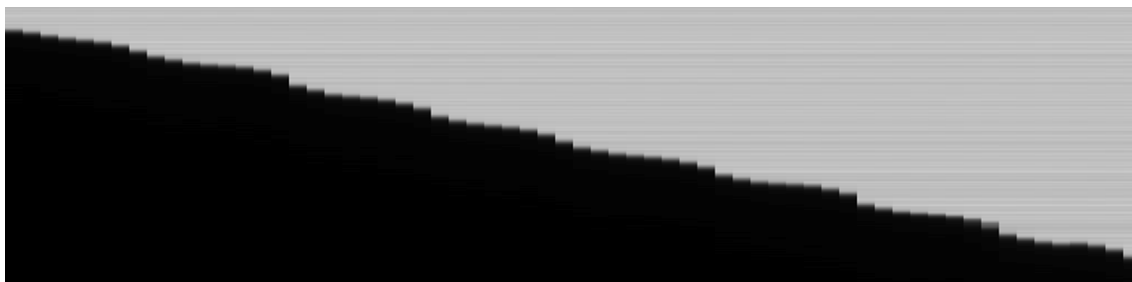
Toto měření bylo provedeno kvůli zjištění linearitu pojezdu krokového motoru v režimu chodu po celých krocích. Délka posuvu bříty provedením jednoho kroku vychází přibližně 0,26mm. Na obr. 80 je obraz složený z jednotlivých náměrů pojezdu celého kroku a je na první pohled vidět, že pojezd je lineární.



Obr. 80 Výřez obrázku složeného z jednotlivých celých kroků pojezdu

Náměr polohy břitu při pojezdu po mikrokrocích

Obr. 81 znázorňuje nelinearitu pojezdu v režimu mikrokrokování, kdy výkon napájení aktivních cívek pro jednotlivé mikrokroky je regulován lineárně. Jak již bylo znázorněno na obr.75, jeden celý krok je rozdělen do osmi mikrokroků, jejichž periodicitu je vidět i na uvedeném obrázku. Kdybychom tento pojezd využili pro měření rozlišovací schopnosti s rozvinutím hrany, docházelo by k velkým chybám rozložení jednotlivých bodů charakteristiky. Proto bylo potřeba mikropojezd linearizovat.

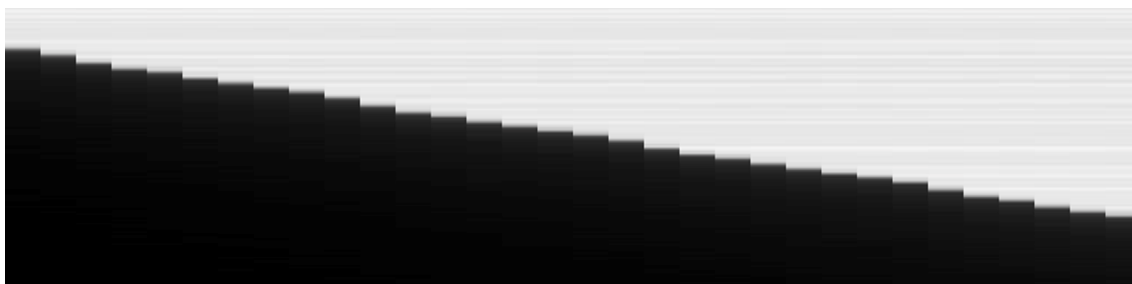


Obr. 81 Výřez obrázku složeného z jednotlivých kroků mikropojezdu, bez použití linearizace

Linearizace mikropojezdu

Výše znázorněný problém nelineárního chodu krokového motoru v režimu mikrokrokování, při lineárním řízení výkonu jeho cívek, je způsoben nelineárním rozložením sil magnetického pole v jednotlivých mezipolohách celých kroků. Např., necht' je aktuální stav pootočení rotoru dán 100% výkonem cívky *A* a 0% výkonem cívky *B*, tj. magnetický pól nástavce rotoru bude natočen u cívky *A*. Přepneme li výkon cívky *A* na 90% a *B* na 10%, nedojde k rotaci o desetinu celého kroku, protože magnetický pól bude od cívky *B* oproti cívce *A* vzdálen o mnohem větší vzdálenost a tím nebude mít cívka *B* dostatečný výkon na pootočení rotoru o desetinu úhlového natočení celého kroku.

Pro umožnění linearizace byly do mikroprocesoru naprogramovány různé tabulky, umožňující nastavení stropů PWM1 a PWM2 (pro jednotlivé mikrokroky dle obr. 75). Postupně bylo zkoumáno, jak se změnou tabulkových hodnot mění směrodatná odchylka z jednotlivých mezikroků mikropojezdu. V závěru byla vybrána tabulka, pro kterou vycházela směrodatná odchylka náměru nejnižší.

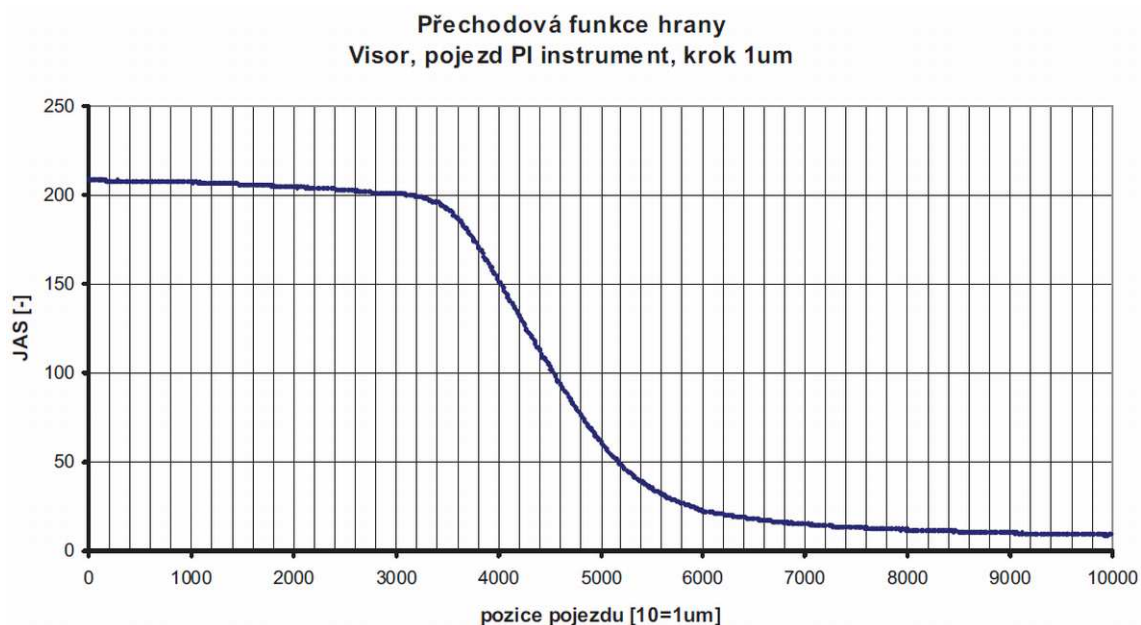


Obr. 82 Výřez obrázku složeného z jednotlivých kroků mikropojezdu, s použitím linearizace

4.5.4 Využití přípravku pro měření rozlišovací schopnosti

Měření rozlišovací schopnosti s využitím rozvoje hrany mělo být v této práci využito pro přesnější měření rozlišovací schopnosti a to zkoumáním délky náběhu hrany. Měření mělo využívat vlákno, podobné vláknu pro kalibraci mikropojezdu. Z časových důvodů se naprogramovat měření rozlišovací schopnosti touto metodou nepodařilo.

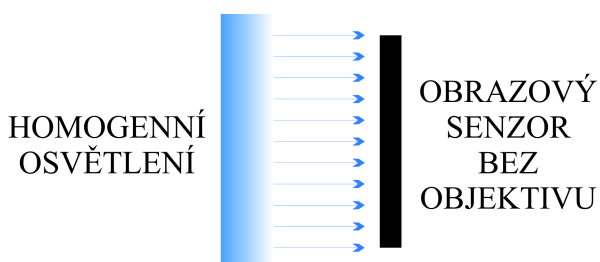
Zmíněným problémem se zabývá diplomová práce „Přesné měření polohy kamerami CCD a CMOS“ uvedená ve zdroji 21. Obr. 83 znázorňuje hranu získanou mikropojezdem precizního přípravku s krokem $10\mu\text{m}$.



Obr. 83 Graf přechodu hrany – kamera ViSor, pojezd PI instruments, krok $10\mu\text{m}$, průměrováno z 25 snímků [zdroj 21]

5 Měření homogenity fotocitlivosti

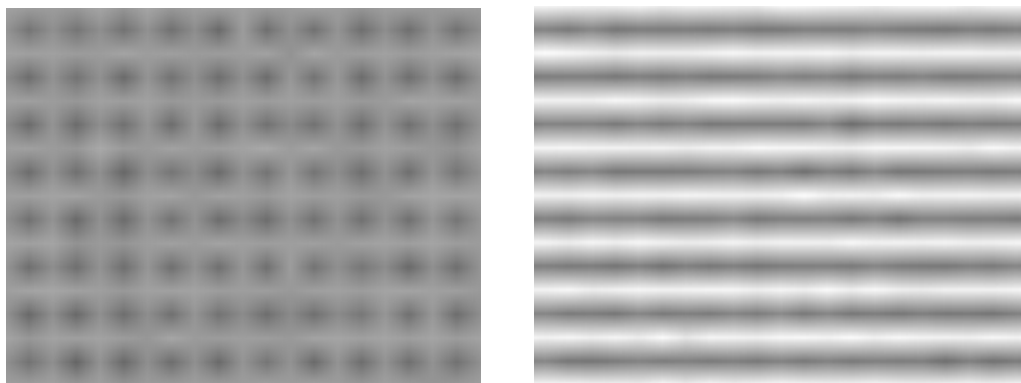
Při měření homogenity fotocitlivosti obrazového senzoru potřebujeme nutně zaručit homogenní osvětlení, jinak by se chyba homogenity osvětlení přičetla k měřené chybě homogenity senzoru. Abychom se vyhnuli možným problémům narušení homogenity osvětlení působením objektivu, např. jeho vinětací, budeme toto měření provádět přímým osvětlováním obrazového senzoru. Pro odstranění šumu bude vhodné výsledný měřený obraz průměrovat z většího počtu snímků. Blokové schéma měření je zobrazeno na obr. 84.



Obr. 84 Blokové schéma měření homogenity fotocitlivosti

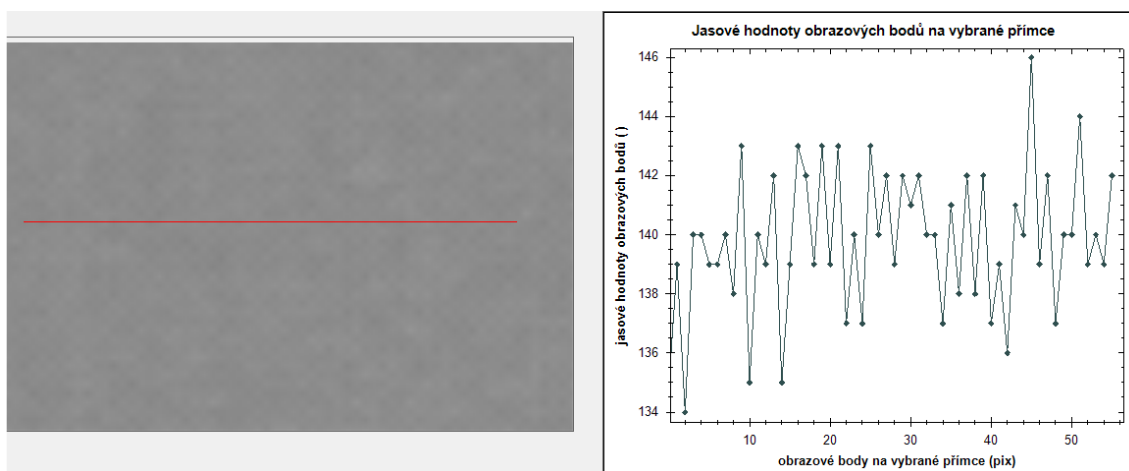
Zobrazení pravého panelu pro měření homogenity fotocitlivosti lze v programu vyvolat z hlavního menu pomocí nabídky „Metodika testu – měření homogenity snímače“. Pro měření je nutné připojení kamery a také nastavení počtu snímků pro průměrování. Po nasnímání a zprůměrování požadovaného počtu snímků se aktivují tlačítka, umožňující uložení zprůměrovaného snímku, nebo jeho zobrazení v novém okně, ve kterém je možné zkoumání jasového profilu a zobrazení histogramu.

Ukázalo se, že výše uvedené podmínky jsou pro měření homogenity fotocitlivosti nedostatečné, protože nebylo bráno v úvahu nastavení offsetů složek pixelů R, B, G1 a G2, které jsou v defaultním režimu kamery nastavovány automaticky, dle aktuálních náměrů temného šumu. Na obr. 85 jsou znázorněny dva detaily náměrů kamery ViSor ze snímání homogenní plochy. V době provádění těchto náměrů byly registry kamery, které mají vliv na nastavení parametrů složek R, B, G1 a G2 v defaultním režimu. Každý z uvedených obrázků je snímáný s rozdílnou integrační dobou kamery.

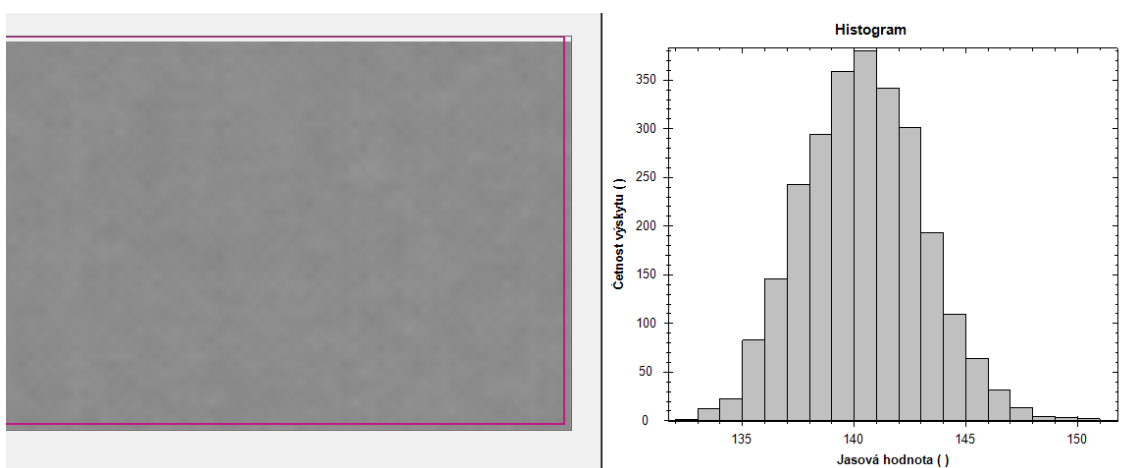


Obr. 85 Vliv působení analogové automatické korekce offsetu jednotlivých složek R, B, G1 a G2 na výsledný obraz kamery

V obrazovém senzoru MT9M001, použitém v kameře ViSor, jsou registry pro změnu hodnoty offsetů jednotlivých barevných složek nastavitelné pomocí registrů 0x60, 0x61, 0x63 a 0x64. Při nastavení automatické korekci těchto registrů bylo několikrát po sobě provedeno jejich čtení, u kterého se potvrdilo automatické nastavování kamerou tím, že se hodnoty těchto registrů v čase měnily. Aby bylo možné provádět správné měření, je nutné tyto registry nastavit manuálně a v případě černobílého senzoru jim přiřadit stejné hodnoty. Automatický režim nastavování offsetů lze vypnout změnou hodnoty registru 0x5F na hodnotu 0x8984 a registru 0x62 na hodnotu 0x8C9B. Na obr. 86 a obr. 87 je výřez z náměru, který byl zprůměrnován ze 64 snímků a byl prováděn při manuálním nastavení registrů 0x60, 0x61, 0x63 a 0x64 na stejnou hodnotu, konkrétně na hodnotu nula. Při tomto manuálním nastavení již lze mírné změny jasových hodnot, které jsou na obrázcích pozorovatelné, přivlastnit různé citlivosti jednotlivých pixelů snímače.



Obr. 86 Jasový profil vybrané přímky z výřezu obrazu pořízeného snímáním homogenní plochy



Obr. 87 Histogram z výřezu obrazu pořízeného snímáním homogenní plochy

Na obr. 86 je pozorovatelný rozkmit jasových hodnot na vybrané přímce. Při posuzování homogenity obrazového snímače, kdy budeme sledovat rozkmit jasových hodnot, můžeme měření provádět lokálně z malé vybrané plochy, nebo globálně pro celý obrazový senzor. V případě globální volby měření pak musíme nutně dodržet podmínku globálního osvětlení obrazového senzoru dle obr. 84. Ukázalo se, že dodržení

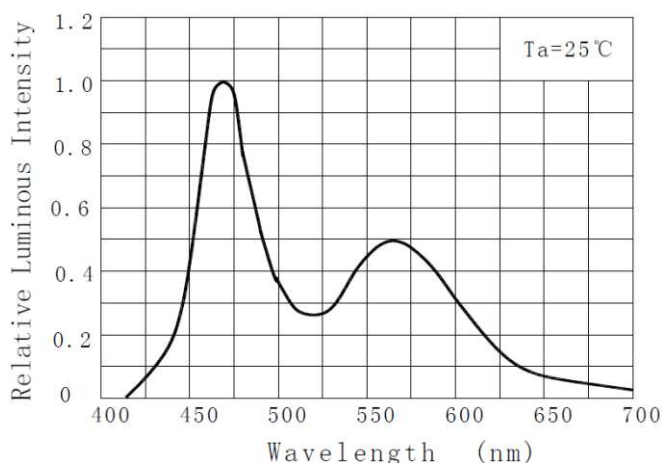
této podmínky při měření kamery, jehož obrazový senzor je umístěn v krabici, je problém a to z důvodu špatného přístupu osvětlovače k obrazovému senzoru. Z měřené kamery ViSor navíc vyčnívá obruba se závitem pro objektiv, což ve finále způsobilo mírné snížení jasů v krajích obrazového senzoru podobně, jako způsobuje vinětace objektivu. Z tohoto důvodu je vhodnější provádět měření pouze z malé vybrané části senzoru.

Z jasového profilu přímky na obr. 86 je vidět, že minimální jasová hodnota byla 134 a maximální 146, což je o necelých 9% více oproti minimální. Na obr. 87 je znázorněný histogram z vybrané plochy obrazu. Počet obsažených jasových hodnot a četnost jejich výskytu lze při posuzování homogenity fotocitlivosti také s výhodou využít.

5.1 Měření citlivosti obrazového senzoru

Tato kapitola se zabývá pouze možnostmi, jak citlivost obrazového senzoru měřit, ovšem samotné měření v práci provedeno nebylo. Toto měření by vyžadovalo další přípravek, který se z časových důvodů nepodařilo vytvořit.

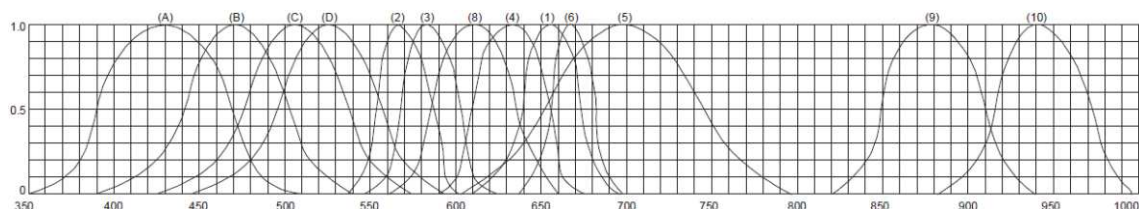
Z fyzikální podstaty citlivosti pixelové buňky obrazového senzoru, která je popsána v rozboru problematiky, nelze pro měření citlivosti využít vytvořený osvětlovač. Ten obsahuje bílé LED, u kterých je spektrum jasových složek široké a rozložení intenzity jasů pro různé vlnové délky je nelineární. Závislost relativní intenzity osvětlení na vlnové délce použitých LED znázorňuje obr. 88.



Obr. 88 Závislost relativní intenzity osvětlení na vlnové délce použitých 60° bílých LED [zdroj 14]

Signál obrazového senzoru, přesněji řečeno množství nahromaděného náboje senzorovou buňkou, je závislé nejenom na intenzitě ozáření, ale také na její vlnové délce, jak je uvedeno např. na obr. 8. Pokud tedy budeme chtít vypočítat množství náboje, podílejícího se na výsledném signálu dané buňky obrazového senzoru, musíme pro osvětlení zvolit, v ideálním případě, monochromatické záření. Množství náboje pak vypočteme ze známé intenzity ozáření a koeficientu efektivity snímače pro použitou

vlnovou délku záření. Z uvedeného vyplývá, že pro měření citlivosti snímače nelze využít v této práci vytvořený osvětlovač obsahující matici bílých LED. Tuto matici je nutné vytvořit z některého dostupného barevného provedení LED. Při výběru vhodné LED pak bude nutné zvolit takovou, jejíž rozsah vlnových délek záření bude co nejmenší a dominantní vlnová délka záření bude shodná s vlnovou délkou, u které má obrazový senzor nejvyšší efektivitu. Obr. 89 znázorňuje různé, barevné LED a rozložení intenzity jejich světla v závislosti na vlnové délce.



Obr. 89 Intenzita světla závislá na vlnové délce u různých, barevných LED [zdroj 15]

Jak již bylo zmíněno výše, dominantní vlnovou délku LED zvolíme takovou, aby se shodovala s vlnovou délkou záření, u které má obrazový senzor nejvyšší efektivitu. Tato volba bude výhodná z důvodu největšího množství nahromaděného náboje pro danou intenzitu ozáření. Důležitější vlastnost tohoto výběru je ovšem jiná. Bod maximální efektivity tvoří stacionární bod, přičemž výhoda jeho využití bude právě při nedodržení požadovaného monochromatického záření LED. V blízkém okolí stacionárního bodu, tedy bodu maximální efektivity, bude její hodnota konstantní a rozložení světelného výkonu použité LED v malém rozmezí vlnových délek nebude natolik omezující.

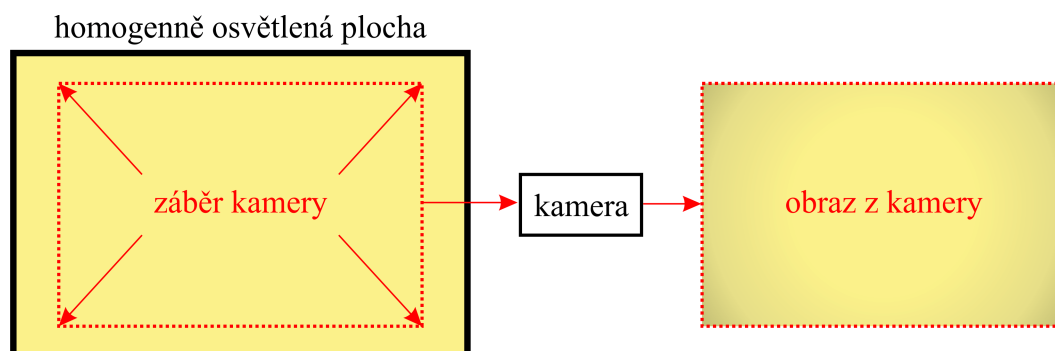
Pro ještě větší přiblížení se k monochromatickému záření lze použít spektrální filtr, kterého pásmová propust bude hodně nízká a bude shodná s dominantní vlnovou délkou použité LED.

6 Měření geometrických a optických vlastností objektivu

Přesné geometrické zobrazení předmětu a jeho správná jasová interpretace jsou při využití kamery, jako nástroje pro měření, velice důležité. Zde hraje velkou roli kvalita použitého objektivu, jehož jednotlivé vlastnosti již byly rozebrány v kapitole „Rozbor problematiky“. V této kapitole se zaměříme na měření vinětace, radiálního zkreslení a bude zde také zmíněna možnost měření hloubky ostrosti.

6.1 Měření vinětace

Prvním důležitým krokem při měření vinětace je zabezpečení homogenního osvětlení a to po celé snímané ploše. K tomu je možné využít negatoskop, u kterého je homogenita jasu velice vysoká a velikost jeho osvětlené plochy je také ve většině případů dostačující. Nutností zůstává dodržení správné délky expozice, jako celočíselného násobku periody síťového napětí.

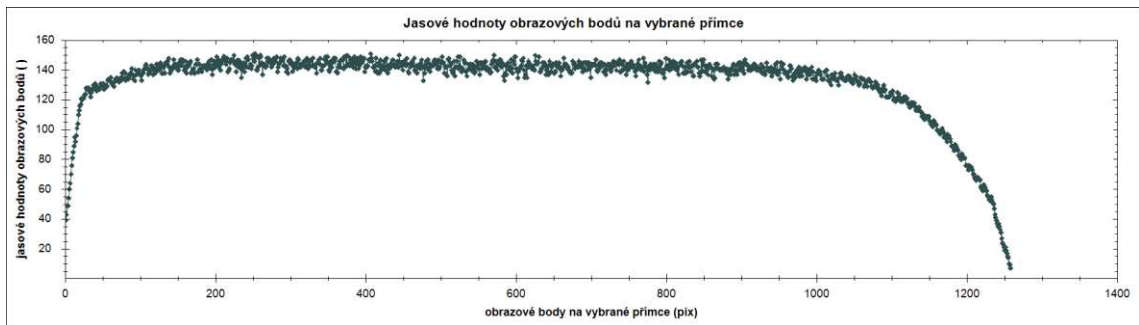


Obr. 90 Homogenní plocha osvětlovače versus vinětací zatížený obraz z kamery

Na obr. 90 je obraz z kamery zatížen vinětací, která se projevuje ztmavením rohů obrazu. Pro měření vinětace je tedy dostačující zjištění jasové informace správně zobrazené oblasti, tedy prostředku obrazu a minimální hodnoty jasu obrazu, která se nachází v jeho rozích. V programu je možné nalezené minimální a maximální jasové hodnoty zobrazit, ovšem opět zde narážíme na problém, kdy se v obrazu mohou nacházet jasové hodnoty s velkou odchylkou vůči průměrné, které mohou být získané z poškozených pixelů. Proto pro vyhodnocení vinětace nestačí nalezení maximální a minimální hodnoty jasu.

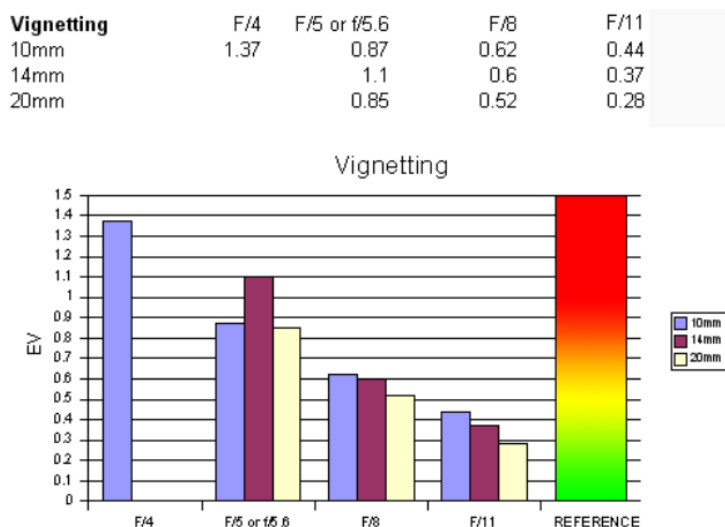
Pro měření vinětace se tedy nabízí další dvě možnosti. První je využití jasového profilu na vybrané přímce, kterou potáhneme po úhlopříčce obrazu. Při vyhodnocování pak můžeme zanedbávat lokální minima a maxima a pro výpočet vinětace využít body, které uznáme za vhodné. Další možností je zobrazení histogramu z celého obrazu, který by měl být, v ideálním případě, složen pouze z jediné jasové úrovně, s počtem výskytu rovným počtu pixelů obrazového snímače. Se zvětšující se vinětací se bude histogram rozšiřovat a výška jeho maxima bude klesat.

Stejným postupem, jako při měření homogenity snímače, můžeme využít pro odstranění šumu průměrování obrazu ze zvoleného počtu snímků. Měření bylo provedeno u objektivu Avenir 3,5-8mm, F1,4 SSV0358, který je určen pro obrazové senzory 1/3". Senzor kamery ViSor, Micron MT9M001 má ovšem velikost 1/2". Na tomto příkladě lze tedy pozorovat vinětaci, která je způsobena samotnou mechanicko-optickou konstrukcí objektivu, která v obrazu vytváří „trubkový“ efekt. Jasové hodnoty získané na úhlopříčce obrazu jsou znázorněny na obr. 91, ze kterého je vidět, že jasové hodnoty v rozích obrazu jsou téměř nulové.



Obr. 91 Jasové hodnoty pixelů na diagonále obrazu pořízeného objektivem Avenir

Dále bylo provedeno měření širokoúhlého objektivu Sigma 10-20mm s pomocí digitální zrcadlovky Canon EOS60D. Uvedený objektiv se vyznačuje vysokou hodnotou vinětace. Na obr. 92 je znázorněn náměr jeho vinětace z online dostupné recenze.



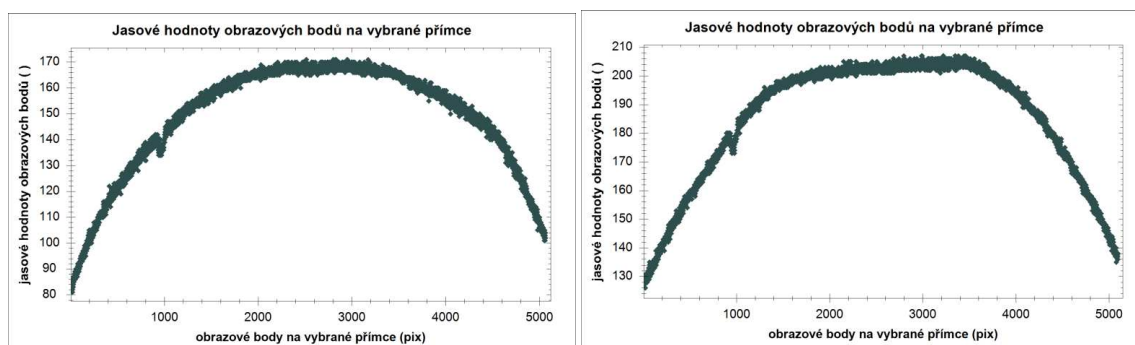
Obr. 92 Vinětace objektivu Sigma 10-20mm [zdroj 20]

Z uvedeného obrázku je vidět, že v praxi se velikost vinětace označuje parametrem EV (Exposure Value), který udává hodnotu expozice a lze vypočíst dle vztahu:

$$EV = \log_2(N^2/t), \quad (31)$$

kde N udává clonové číslo a t udává expoziční čas. Při zachování velikosti clony tedy znamená zvýšení hodnoty EV o +1 dvounásobně delší expoziční čas, tedy dvounásobný počet fotonů, které dopadnou na obrazový senzor.

Náměry uvedené na obr. 93 ukazují jasové hodnoty na diagonále obrazu nasnímaného s použitím objektivu Sigma 10-20mm.



Obr. 93 Jasové hodnoty pixelů na diagonále obrazu pořízeného objektivem Sigma: vlevo 10mm, vpravo 20mm

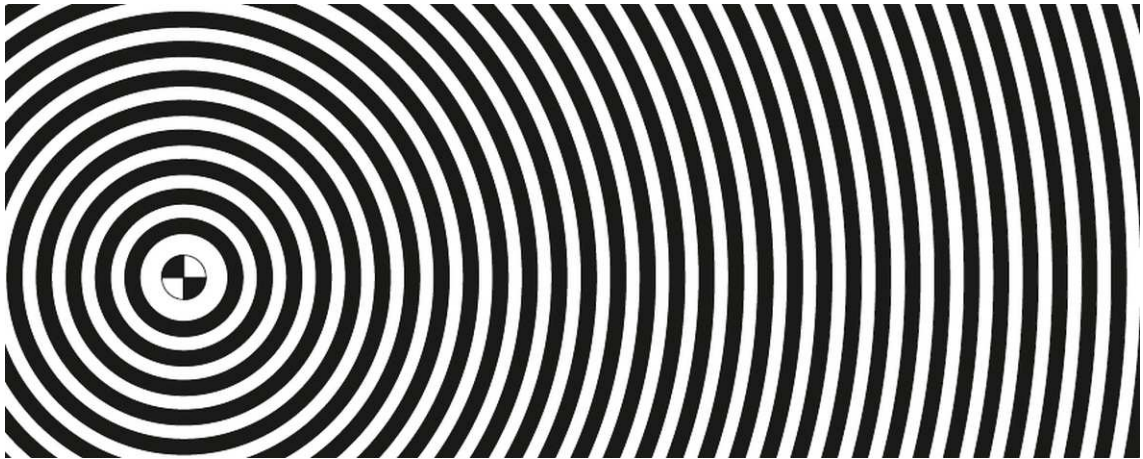
Uvedené jasové profily jsou vhodné spíše pro účely porovnávání vinětace jednotlivých objektivů mezi sebou a to zkoumáním poklesu jasové hodnoty vůči naměřenému vrcholu. Pro výpočet, kolikrát méně fotonů dopadlo v krajních polohách snímače, tedy v místě nejvyšší hodnoty vinětace, bychom potřebovali znát převodní charakteristiku obrazového snímače, který byl použit pro měření. Dále bychom narazili na problém s účinností senzoru, závislé na vlnové délce záření, nemluvě o tom, že pro osvětlení nebylo využito monochromatické záření. Měření by šlo provést při neznalosti zmíněných parametrů metodou pokusného fotografování s rozdílnými hodnotami expozice, u kterého bychom sledovali změny jasové hodnoty.

6.2 Měření radiálního zkreslení

Při tvorbě obrazce pro měření radiálního zkreslení (RS), při kterém dochází k soudkovité nebo polštářkovité deformaci obrazu, lze vycházet z obr. 13, ve kterém se zkoumal poloměr deformace.

6.2.1 Obrazce pro měření radiálního zkreslení

Pro měření radiálního zkreslení byl vytvořený testovací obrazec obsahující pruhy, jejichž poloměr se lineárně zvětšuje. Šířka jednotlivých pruhů je tedy konstantní. Na obr. 94 je znázorněn výřez popisovaného obrazce. Uprostřed pruhů je korelační značka, která byla ještě v době programování práce v Matlabu využívána pro automatickou detekci středu značky pomocí funkce korelace. Současná verze programu zatím v sobě funkci pro automatickou detekci značky integrovanou nemá.

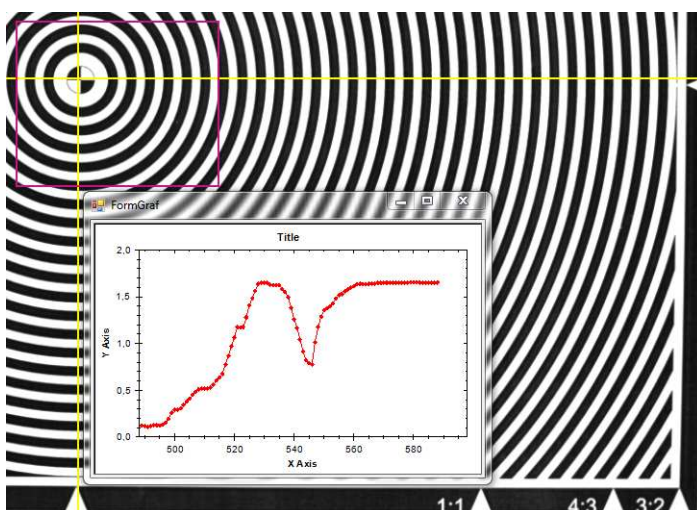


Obr. 94 Výřez testu pro měření radiálního zkreslení

Obrazců pro měření radiálního zkreslení je vytvořeno více. Mezi sebou se ale liší pouze šířkou použitých pruhů a to z důvodu použitelnosti testovacích obrazců pro kamery s různou rozlišovací schopností. Při nízké rozlišovací schopnosti kamery by byla hranová detekce hustých pruhů problematická.

6.2.2 Měření radiálního zkreslení programem

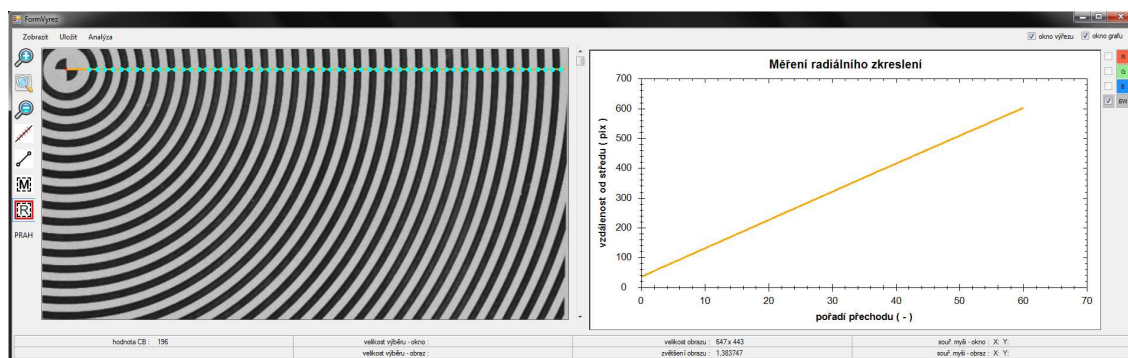
Měření začíná snímáním testovacího obrazce kamerou, při kterém je nutné dodržet jeho správnou symetrii. S výhodou lze využít pomocné centrační osy programu. Dále je pro správné zaostření vhodné využít funkci pro zobrazení relativní hodnoty zaostření. Detail plochy obrazovky při provádění těchto akcí je znázorněn na obr. 95.



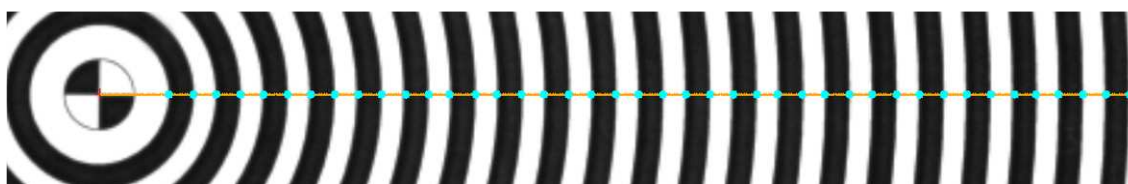
Obr. 95 Zaostření a centrace při snímání testovacího obrazce

Samotné měření se provádí v okně výběru, proto je nutné provést požadovaný výběr měřené oblasti a poté v hlavní nabídce menu vybrat „Metodika testu – zpracování výřezu“. Při provádění výběru pro měření radiálního zkreslení můžeme vybrat celou plochu obrázku, nebo stačí výběr jednoho ze čtyř kvadrantů testovacího obrazce a to tak, aby v něm byla vidět středová značka. Výběr tedy může vypadat například jako detail měření uvedený na obr. 95.

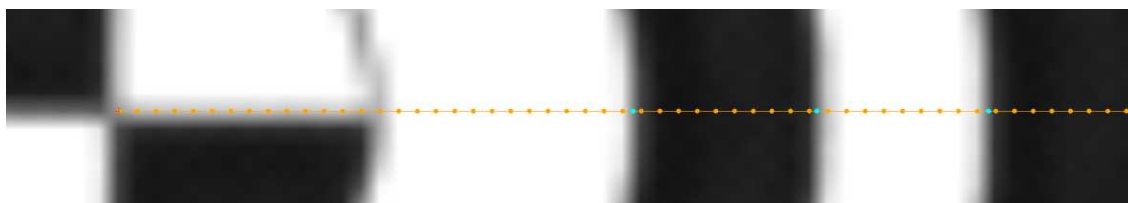
V okně „FormVyrez“, které se zobrazí následně po stisku „Metodika testu - zpracování výřezu“ se v jeho levé části zobrazí provedený výřez obrazu a v pravé části připravený panel grafu. V hlavní nabídce zvolíme položku „Analýza – radiální zkreslení“, čímž se okno obrazu roztáhne na celou obrazovku a to z důvodu, že je nutné provést označení středu středové značky. Pro přesnější označení je vhodné dále obraz zvětšit použitím příslušného tlačítka pro zvětšení. Označení provedeme stiskem klávesy „Shift“ a pravým kliknutím myši do prostředku značky. Následně se každým dalším kliknutím levé myši v kterémkoli místě v obraze propojí vybraný bod ze středovým bodem přímkou, přičemž novým označením se zruší označení předchozí. Po provedení požadovaného výběru přímky pro měření radiálního zkreslení se měření aktivuje stiskem tlačítka „rsOK“, čímž se na vybrané přímce hranovou detekcí s využitím lineární interpolace vypočtou hranové body. Při měření je opět z důvodu využití lineární interpolace nutné dodržet lineární převodní charakteristiku kamery.



Obr. 96 Ukázka měření radiálního zkreslení v okně „FormVyrez“

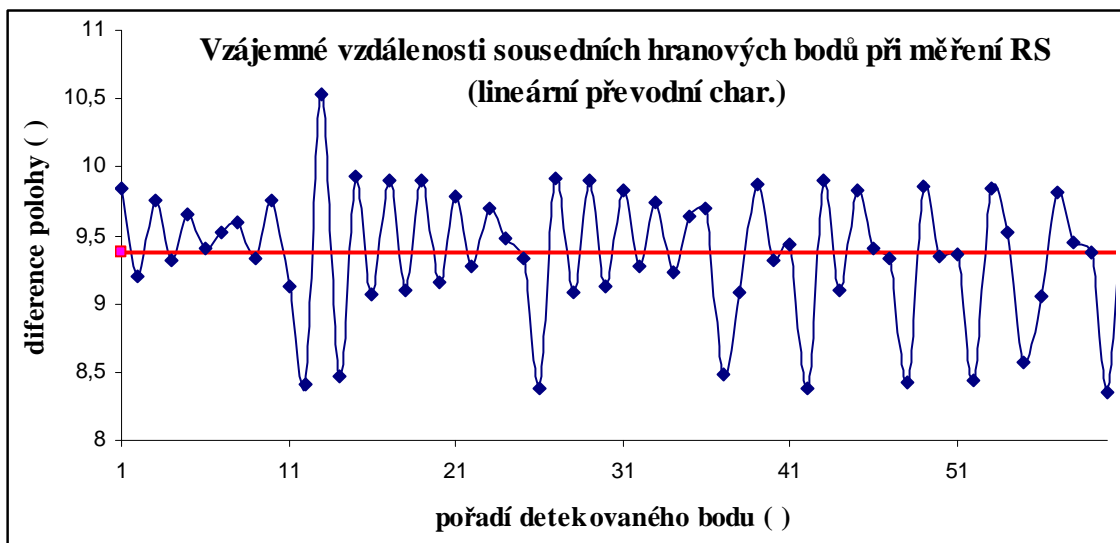


Obr. 97 Ukázka detekce hran při měření radiálního zkreslení

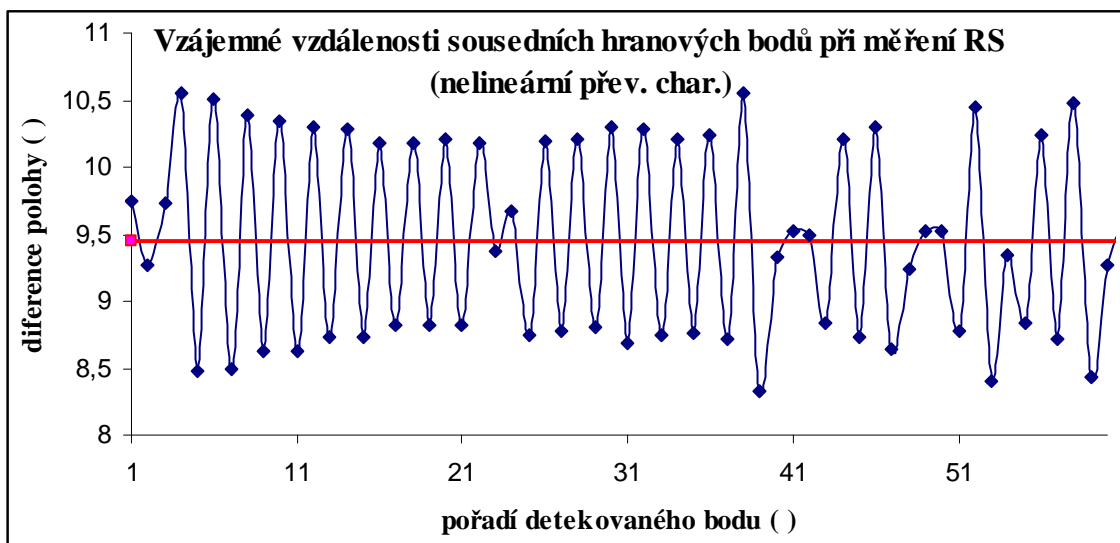


Obr. 98 Ukázka detekce hran při měření radiálního zkreslení v detailu

Na obrázcích 96, 97 a 98 jsou znázorněny výřezy testovacího obrazce po provedení hranové detekce. Modré body označují vypočtené hranové body. V detailním obrázku 98 je vidět také oranžové body, které označují středy jednotlivých pixelů na vybrané přímce. Znázorněné obrázky byly nasnímány kamerou ViSor s použitím objektivu Meopta VIDEO OPTICON 1,4/16. Provedený náměr není vhodný pro demonstraci radiálního zkreslení, protože použitý objektiv má kvalitní optickou konstrukci. Na uvedeném náměru bude znázorněna nutnost dodržení lineární převodní charakteristiky. Graf uvedený na obr. 99 znázorňuje diferenci jednotlivých detekovaných bodů při použití zesílení 2, u kterého je převodní charakteristika lineární a graf na obr. 100 naopak náměr, kdy převodní charakteristika kamery ViSor lineární nebyla (zesílení 1).

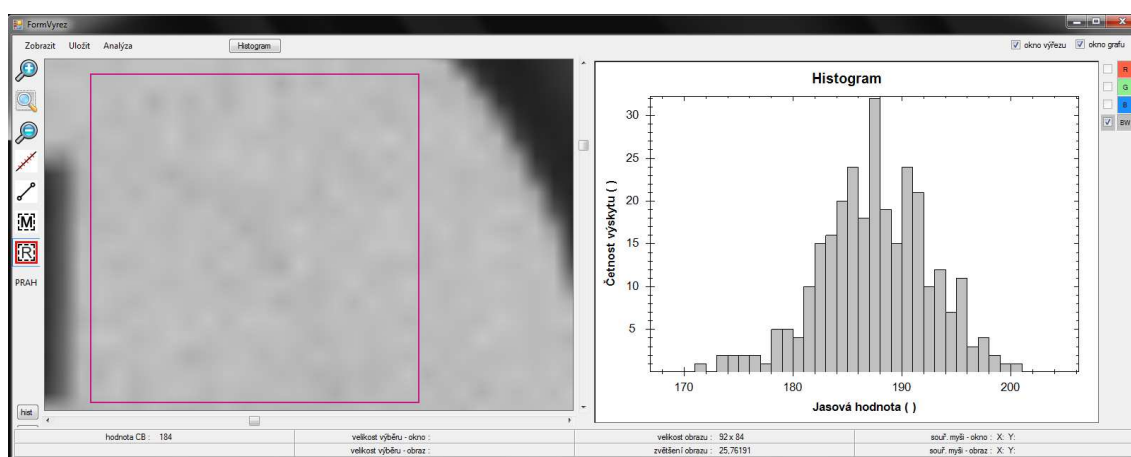


Obr. 99 Vzájemné vzdálenosti sousedních hranových bodů při měření RS s lineární převodní charakteristikou kamery



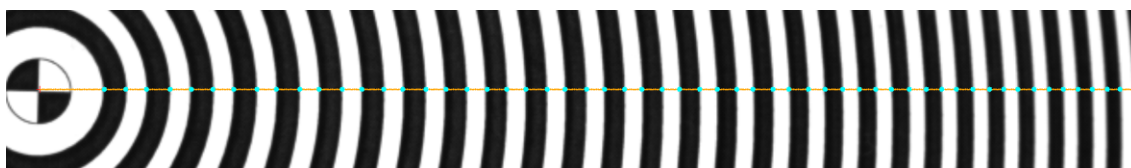
Obr. 100 Vzájemné vzdálenosti sousedních hranových bodů při měření RS s nelineární převodní charakteristikou kamery

Oba uvedené grafy obsahují odchylky od střední hodnoty (znázorněná červenou čarou), ale v grafu na obr. 100 jsou tyto odchylky mnohem vyšší. Rozptyl hodnot prvního grafu vychází 0,24 a rozptyl hodnot druhého 0,54, z čehož jasně vyplývá nevhodnost použití nelineární převodní charakteristiky. Dále bylo zkoumáno, proč dochází k uvedeným zákmitům v grafu. Je domněnkou, že tyto zákmity jsou způsobeny šumem. Každý z obou uvedených náměrů byl totiž proveden pouze z jediného snímku, tedy bez filtrace šumu, která by šla aplikovat pouze při provedení většího počtu snímků. Detail obrazce z plochy, která by měla být v ideálním případě homogenní, je uveden v levé části obr. 101, ve kterém je patrná přítomnost šumu, což dokazuje také zobrazený histogram, u kterého je vidět, že jasové hodnoty označené plochy nabývají hodnoty cca od 170 až po 200.

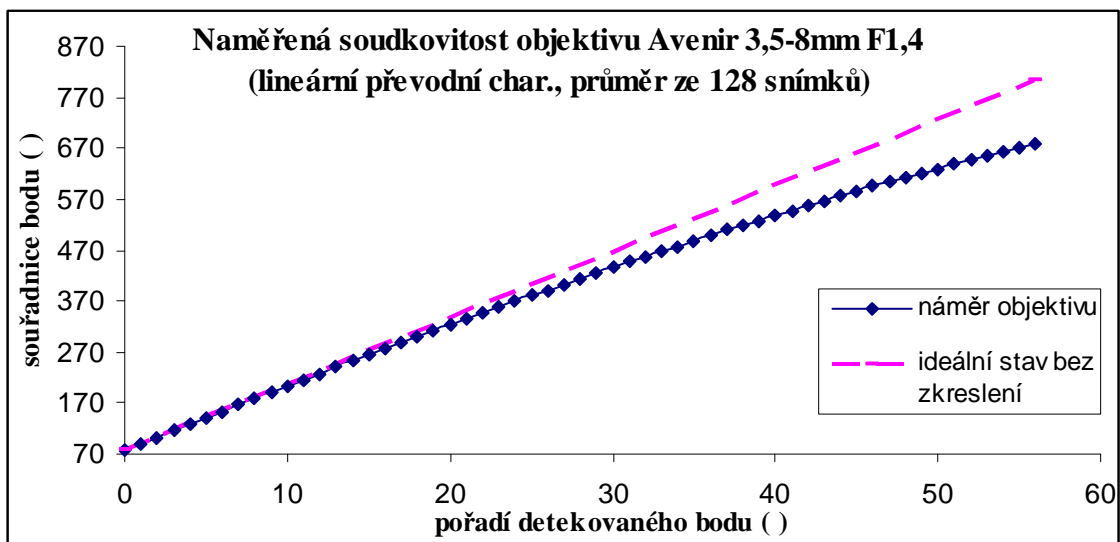


Obr. 101 Přítomnost šumu při provedeném měření RS

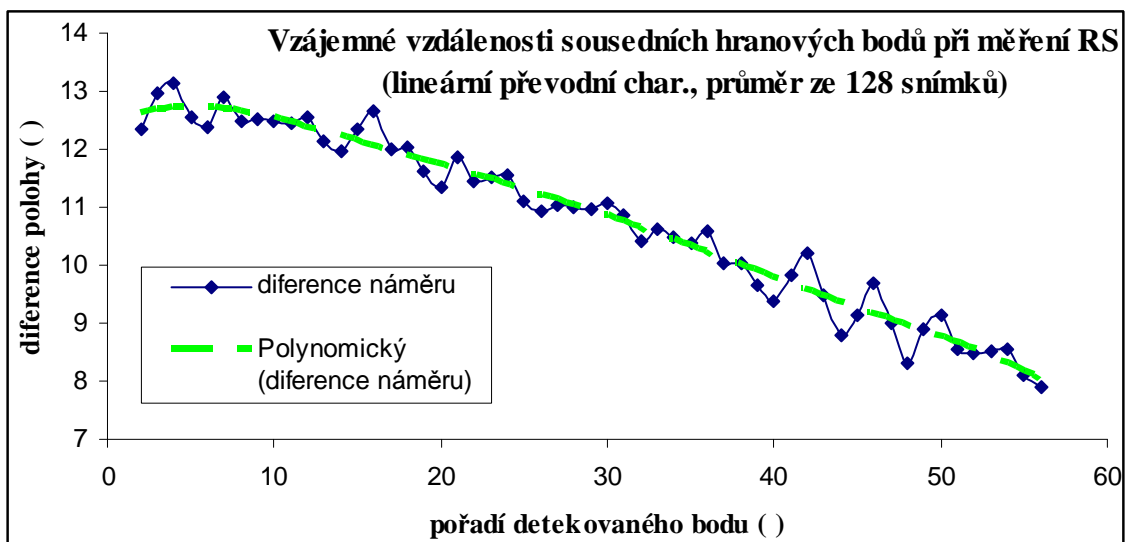
Ze zapůjčených objektivů měl největší radiální zkreslení objektiv Avenir SSV0358, 3,5-8mm, F1,4. Největší radiální zkreslení se u něj projevvalo při jeho nejnižší ohniskové vzdálenosti 3,5mm. Na obr. 102 je znázorněn výřez testovacího obrazce, s označenou detekcí hran, ve kterém je patrné postupné zužování jeho pruhů. Obrázky 103 a 104 ukazují grafy náměrů radiálního zkreslení zmiňovaného objektivu.



Obr. 102 Viditelné postupné zužování pruhů důsledkem radiálního zkreslení



Obr. 103 Poloha hranových bodů při měření RS objektivu Avenir



Obr. 104 Vzájemné vzdálenosti sousedních hranových bodů měření RS objektivu Avenir

Z uvedených naměrů vyplývá, že použití posledně měřeného objektivu je pro měření polohy a rozměrů objektů kamerou naprosto nevhodné. Šířka nejvzdálenějšího, posledního pruhu tvoří pouze 60% šířky prvního pruhu. Délka měřených pruhů měla být v ideálním případě rozložena na 811 pixelů, místo naměřených 679, což představuje rozdíl 19,5%. I když byl u tohoto měření z důvodu odstranění šumu obraz zprůměrován ze 128 snímků a měření bylo provedeno s lineární převodní charakteristikou kamery, přesto se v grafu vzájemné vzdálenosti sousedních hranových bodů zobrazily zákmity, kterých důvod přítomnosti nebyl identifikován.

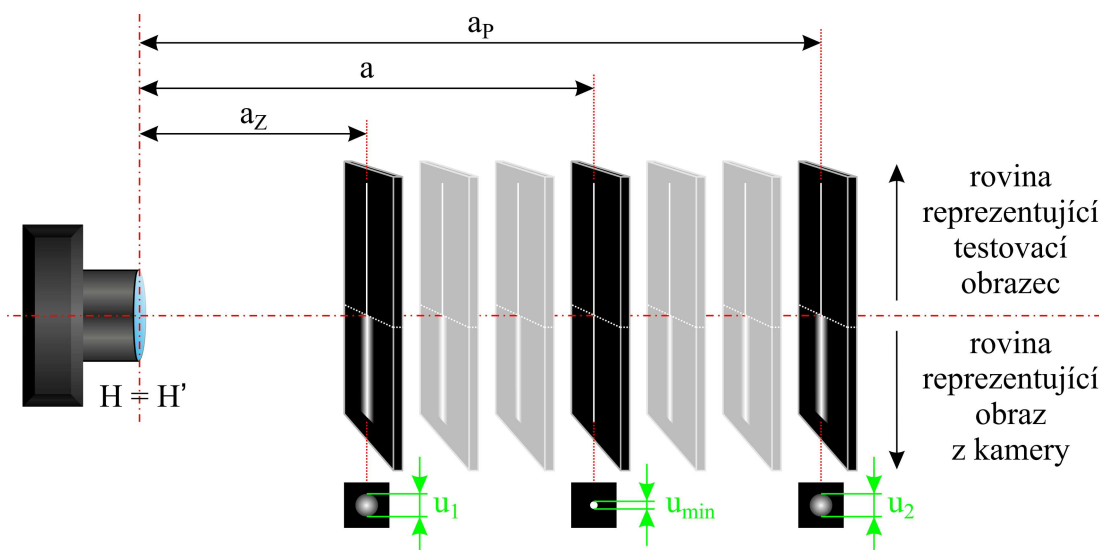
6.3 Měření hloubky ostrosti

Hloubka ostrosti objektivu závisí na velikosti nastavené clony a dále na ohniskové vzdálenosti objektivu. Vytvoření přípravku pro měření hloubky ostrosti v celém rozsahu ostření objektivu samozřejmě nelze, z důvodu konečné délky přípravku, což by při ostření na nekonečno nebylo možné. Vzniklý nápad vytvoření přípravku pro měření hloubky ostrosti je tedy využitelný spíše pro ostření na blízkou vzdálenost a jeho využití je plánováno zejména pro laboratorní výuku v laboratoři videometrie.

Pokud je objektiv s obrazovou ohniskovou vzdáleností „f“ zaostřen na vzdálenost „a“ a připustí se nedokonalé zobrazení s průměrem kroužku neostrosti „u‘“, může se při nastaveném clonovém čísle „k“ nacházet předmět v rozsahu vzdáleností „a_p“ až „a_z“. [zdroj 17]

$$a_z = \frac{a}{1 + \frac{k \cdot u' \cdot (a - f')}{f'^2}} \quad (32)$$

$$a_p = \frac{a}{1 - \frac{k \cdot u' \cdot (a - f')}{f'^2}} \quad (33)$$



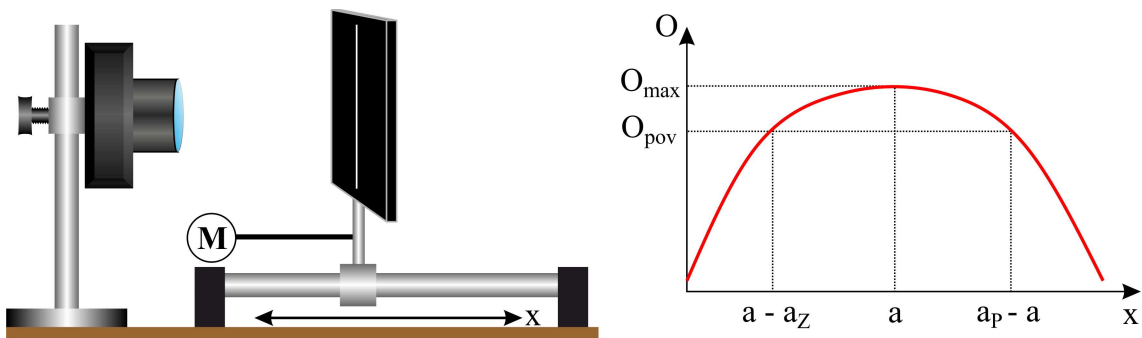
Obr. 105 Míra rozostření testovacího pruhu závislá na vzdálenosti od bodu zaostření

Na obr. 105 je hodnota nejvyššího zaostření označena „ u_{min} “. Pro měření hloubky ostrosti povoleného kroužku rozostření „ u “ tedy nejdříve potřebujeme zaostřit objektiv na vzdálenost „ a “, od které pak budeme v obou směrech měřit vzdálenosti „ $a - a_z$ “ a „ $a_p - a$ “. Další možností je měření hloubky ostrosti pro dané zaostření objektivu, kdy maximální zaostření žádané scény nastavíme změnou vzdálenosti „ a “, např. pojezdem. Na pojezdu testovacího obrazce je stavěna myšlenka přípravku pro měření hloubky ostrosti.

6.3.1 Přípravek pro měření hloubky ostrosti

Pro měření hloubky ostrosti můžeme využít optickou lavici. Na ní můžeme umístit testovací obrazec sestávající se z úzkého bílého pruhu na černém pozadí. Takové měření je prováděno na laboratorních cvičeních předmětu VBM, ve kterém se na osciloskopu zkoumá šířka pruhu přímo ze signálu z kamery.

Myšlenka vytvoření přípravku pro měření hloubky ostrosti spočívá ve vytvoření optické lavice s motorickým pojezdem, jehož pohyb bude řízen z počítače na základě aktuálně vyhodnocených náměrů z kamery. Prvním krokem je tedy nastavení vzdálenosti „ a “, u níž bude pruh obrazce kamerou maximálně zaostřen. K tomu je možné využít funkci pro zobrazení relativní hodnoty zaostření, která byla popsána v kapitole „Rozlišovací schopnost kamery“. Algoritmus řízení bude hlídat relativní hodnotu zaostření. V případě, že tato hodnota roste, zůstane směr pojezdu motoru zachován a to až do doby, kdy zmíněná hodnota začne klesat. V tomto okamžiku se pojezd vrátí do maximálně naměřené relativní hodnoty zaostření. Ideové schéma přípravku je zobrazeno na obr. 106. Červená křivka grafu pak může představovat relativní hodnotu zaostření, která bude používána pro nastavení polohy maximálního zaostření testovacího pruhu.

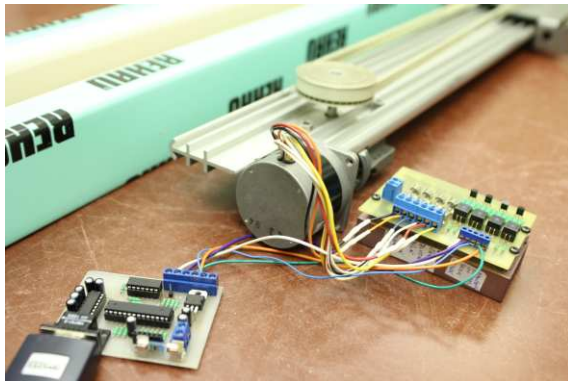


Obr. 106 Princip měření hloubky ostrosti za pomoci motorizované optické lavice

Nápad pro vytvoření popisovaného přípravku vznikl v době získání kvalitního pojezdu, který byl součástí přístroje, jenž měl být zlikvidován. Robustní hliníková lišta tvořena kolejničí, na níž je pojezdový vozík uchycen pomocí čtyř silonových koleček s ložisky, je zobrazena na obr. 107. K této liště byly přidělané dvě ozubená kola, z nichž jedno je uchyceno k převodovce poháněné krokovým motorem. Pojezd vozíku je uchycen k ozubenému řemeni, který je pevně natažen mezi ozubenými koly a je řízený pomocí řídicí desky, jejíž popis je uveden v kapitole 8. Řídicí deska posílá do krokového motoru impulsy přes výkonovou část, která je principiálně stejná, jako výkonová část pojezdu pro posouvání ostrého břitů, je pouze dimenzovaná pro větší výkon. Na obr. 108 je znázorněn detail, ve kterém je vidět krokový motor s výkonovou částí a také řídicí desku.



Obr. 107 Konstrukce pojízdné optické lavice



Obr. 108 Detail řízení pojízdné optické lavice s využitím řídicí desky

Délka optické lavice je 145 cm a délka její pohyblivé části je 110 cm. Pro pojezd mezi koncovými polohami je potřeba 16500 pulsů krokového motoru, přičemž pro jednu otáčku krokového motoru je potřeba 200 pulsů. Pojezd je tedy velice jemný a pojezdový vozík lavice, díky robustním materiálům a kvalitě provedení, vykazuje velikou tuhost. Práce na tomto přípravku a také potřebnému software pro měření hloubky ostroty ovšem musela být z časových důvodů pozastavena.

7 Popis vytvořeného programu

Již v předchozích kapitolách, které se zabývaly měřením jednotlivých parametrů kamerových systémů, byly popsány některé funkce vytvořeného programu. V této kapitole budou rozepsány další vlastnosti a funkce programu, které mohou obsluhu při práci s programem ulehčit, či zpřesnit samotné měření.

7.1 Základní popis programu

Program je napsán ve vývojovém prostředí „Microsoft Visual Studio C# 2010 Express“. Spouští se souborem „TestovaniKamery.exe“, bez nutnosti předchozí instalace. Ke běhu programu je nutné mít v PC nainstalovaný balíček „Microsoft .NET Framework 4“.

Součástí programu je knihovna „VisorManagedInterface.dll“, umožňující připojení a komunikaci s kamerou ViSor, kterou vytvořil Ing. Pribula a také knihovna „DSCamera.dll“, umožňující připojení a komunikaci s webkamerami, kterou vytvořil Bc. Lipenský a která dále využívá dostupnou knihovnu „DirectShowLib-2005.dll“. Pro zobrazení grafů je využita veřejně dostupná knihovna „ZedGraph.dll“.

Vzhled programu je navržen podobně, jako běžný software pro Windows. V horní části se nachází lišta hlavního menu a lišta pro ovládání kamer. Ve spodní části je umístěná stavová lišta. Po levé straně je lišta pro nastavení parametrů obrazu a po pravé straně jsou umístěny aktuálně potřebné panely s prvky, určenými pro samotné měření. Většina ikon, které jsou v programu použité, jsou stažené ze zdroje [f].

7.2 Funkce pro práci s otevřeným obrazem

Nejdůležitější funkce programu jsou samozřejmě funkce pro testování kamery ze získaného obrazu. Aby ale bylo možné s obrazem lépe pracovat, jsou do programu přidány základní funkce, které se u programů pro zobrazení obrazu běžně používají. Mezi ně patří možnost změny zvětšení obrazu, jeho posouvání, zobrazení na celou plochu, možnost provádění výběru, zobrazení mřížky, pomocných os a také stavové lišty, ve které jsou uvedeny některé důležité informace.

Po prvním otevření obrazu se získají informace o jeho velikosti v pixelech, které se porovnají s aktuální velikostí panelu, který je určen pro zobrazení obrazu. Následně proběhne výpočet pro takové zvětšení, aby byl obraz v panelu zvětšen co nejvíce, ale aby nedošlo k ořezu kterékoliv ze stran a současně, aby nebyl změněn poměr jeho stran. Obraz je centrován na prostředek panelu. Ve stavové liště se zobrazí informace o originální velikosti obrazu a aktuální hodnotě zvětšení.

V případě potřeby zobrazení detailů je možné obraz zvětšovat. Po každé aktivaci tlačítka zvětšení se velikost obrazu násobí konstantou „1,2“. Pokud výška nebo šířka obrazu překročí velikost panelu, zobrazí se příslušný scrollbar, umožňující posuv obrazu v daném směru. Obdobně se při zmenšení obraz dělí konstantou „1,2“. Aktuální velikost zvětšení a posuvu je uložena v paměti. V případě funkce videosekvence kamery

je tedy zobrazován obraz s nastaveným zvětšením a posuvem po celou dobu snímání, s možností kdykoliv dané parametry měnit. V případě potřeby opětovného se vrácení k zobrazení na celou obrazovku, je toto možné stiskem tlačítka „zobrazení na celou obrazovku“.

Z principu funkce výše popsaných možností změny zvětšení vyplývá, že velikost aktuálního zvětšení nebude ve většině případů celé číslo. Pokud budeme chtít pozorovat např. testovací obrazec s hustým rastrem, bude docházet při nedodržení celočíselného násobku zvětšení k převzorkování obrazu a k možnosti vzniku aliasingu. Proto je do programu přidána funkce možnosti zvětšení obrazu udávaná v procentech, tedy např. 100%, 200% apod. Použitím této možnosti bude zaručeno, že nebude docházet k přepočtu jednotlivých bodů obrazu.

Některé funkce požadují před samotným spuštěním výběr měřené oblasti. V tomto programu jsou použity dvě možnosti výběru. První možnost výběru je aktivována tlačítkem pro výběr a následným označením a tažením myši v obrazu. Poté lze vybranou část zobrazit v okně pro další zpracování a měření. Druhá možnost výběru spočívá ve vyžádání označení obrazu, až po aktivaci dané funkce. V tomto případě se změní kurzor myši na obrázek šipky s otazníkem, která žádá obsluhu o vyznačení požadované oblasti měření. V obou případech se počátek výběru aktivuje stiskem levého tlačítka myši. Posouváním myši se překresluje vybraný obdélník a výběr je možné provádět v kterémkoliv směru. V programu je ošetřeno, aby se v případě překročení krajní polohy obrazu zastavil výběr na poslední možné hodnotě v daném směru, čímž je zaručeno, že nedojde k označení záporných souřadnic, nebo souřadnic větších, než je velikost samotného obrazu. Výběr je ukončen puštěním levého tlačítka myši.

V některých případech, např. když chceme pozorovat radiální zkreslení, nebo sledovat ohraničení jednotlivých pixelů, je vhodné využít funkci zobrazení mřížky. Vzdálenost jednotlivých čar mřížky je proměnná a je závislá na velikosti a aktuálním zvětšení obrazu. Mřížka není vpisována do samotného obrazu, ale je vykreslována v samostatné vrstvě využívající funkci „graphics“. K překreslení mřížky, jako i samotného obrazu a všech pomocných značek dochází při každé změně zvětšení nebo posuvu obrazu.

Při snímání testovacího obrazce, u kterého je vhodné centrovat na střed testu, je možné využít zobrazení pomocných os. Tato funkce rozdělí obraz na výšku i šířku čarou, čímž vytvoří kříž. Testovací obrazce mají rovněž uprostřed svých stran vykreslené značky, určené právě pro tento účel.

Funkce využívající měření jasu měří tento jas na ploše 10x10 pixelů. Umístění této plochy je po startu programu přednastaveno na prostředek obrazu. Zobrazení ohraničení není aktivní, aby zbytečně nerušilo zobrazení samotného obrazu. V případě potřeby lze zobrazení ohraničení povolit a tím zobrazit čtverec, jehož strany po obvodu kopírují zmíněnou plochu.

Důležité informace o otevřeném obrazu a některých prováděných činnostech jsou zobrazovány ve stavové liště, umístěné ve spodní části obrazovky programu. Jsou to například velikost otevřeného obrazu, aktuální velikost zvětšení, souřadnice polohy myši, hodnota jasu bodu polohy myši, velikost a souřadnice prováděného výběru, délka a souřadnice pravítka apod.

7.3 Funkce pro měření

Jednotlivé funkce pro měření jsou dostupné v hlavním menu a bočních panelech. Po startu programu jsou všechny tyto funkce blokovány. Aktivace či deaktivace jednotlivých panelů a tlačítek je řízena na základě aktuální činnosti programu.

Funkce, u kterých nám k výsledku měření postačuje samotný nasnímaný obraz, či skupina obrazů, jsou aktivovány bezprostředně po připojení kamery, nebo načtení obrazu z disku. Jsou to funkce, které již byly zmiňovány v kapitole „Funkce pro práci s otevřeným obrazem“ a dále funkce pro měření fotonového šumu, homogenity fotocitlivosti snímače, vinětace a zkoumání jasových bodů na vybrané přímce. Jedná se tedy o funkce, které ke své činnosti nepotřebují připojení externího hardware. Funkce pro měření převodní charakteristiky vyžaduje před začátkem měření připojení řízeného osvětlovače, který byl popsán v kapitole 2.2.1.

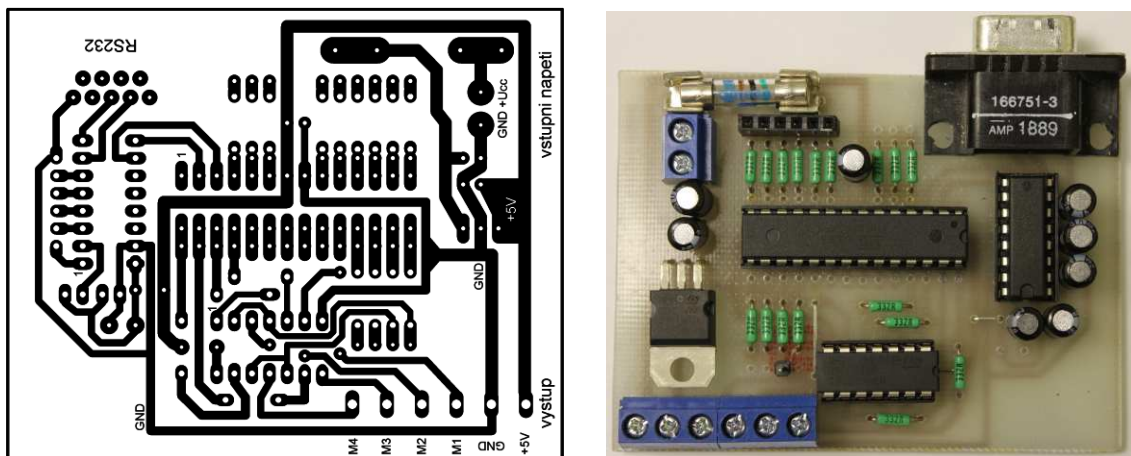
8 Řídící deska

Navržená řídicí deska slouží k ovládání osvětlovače a přípravku pro posouvání hrany, které lze po připojení ovládat z hlavního programu. Také byla použita pro pokusné řízení přípravku pro měření hloubky ostrosti.

Hlavní část řídicí desky tvoří mikroprocesor firmy Atmel ATmega8. Další obvody slouží pro samotné napájení, umožnění komunikace po sériové lince a pro možnosti připojení zmiňovaných přípravků. Schéma řídicí desky je uvedeno v příloze.

Součástky jsou osazeny na jednovrstvém plošném spoji. Napájecí napětí řídicí desky je v rozmezí povoleného napájecího napětí stabilizátoru 7805. Aby však nedocházelo ke zbytečným ztrátám ve stabilizátoru, je vhodné volit napětí maximálně 12V. Řídící deska je pro účely laboratorní výuky umístěná v plastovém krytu kvůli prevenci možného zkratu. V průběhu zpracování této práce již probíhalo měření laboratorních úloh, ve kterém se řídicí deska využívala. Z důvodu potřeby řídicí desky pro další rozvoj práce, v tomto období, byl vyroben její další kus.

Program pro mikroprocesor ATmega8 je napsaný v assembleru ve vývojovém prostředí AVRstudio4 a do mikroprocesoru je nahráný pomocí programátoru PRESTO, který vyrábí firma ASIX.



Obr. 109 a) návrh plošného spoje řídicí desky b) finální produkt řídicí desky

8.1 Komunikace s řídicí deskou

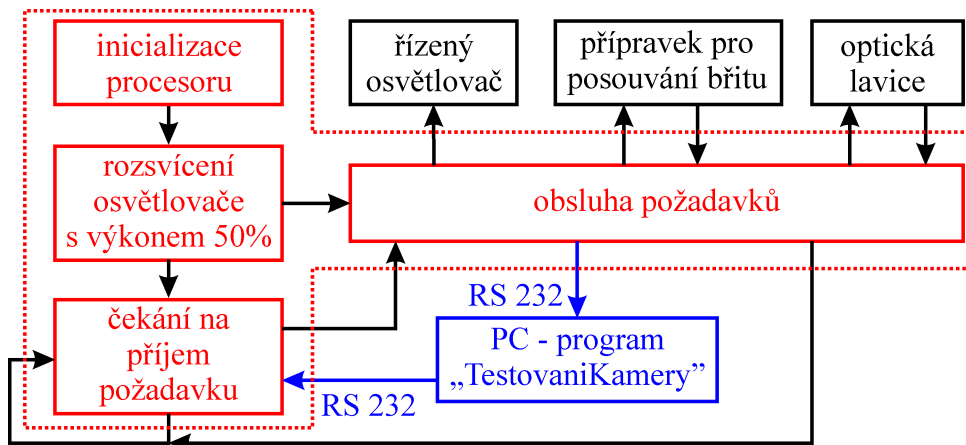
Oboustranná komunikace řídicí desky s počítačem je obstarávána pomocí sériové linky. Použitý mikroprocesor obsahuje vestavěnou UART jednotku, jejíž naprogramovaná komunikační rychlost je 9600Bd. Dále je nastaven počet datových bitů na osm, jeden start bit a jeden stop bit.

Aby bylo možné ovládat hardware připojený k řídicí desce z hlavního programu, je nutné nejdříve navázat komunikaci po správném COM portu. V případě použití převodníku USB na COM port, se tento sám chová jako připojené zařízení a při

navazování komunikace by došlo k připojení k převodníku i v případě odpojené řídicí desky, aniž by byl detekován problém. Proto je po navázání komunikace vyslán požadavek ID, který čeká odpověď od řídicí desky. V případě, že ho přijme, dojde v hlavním programu k aktivaci ovládacích panelů využívajících komunikaci s řídicí deskou. V opačném případě je po uplynutí nastaveného časového intervalu pokus o připojení ukončen a je zobrazena chybová hláška s nápisem „Komunikace s řídicí deskou se nezdařila“.

Protože počet příkazů, které je potřeba obsloužit řídicí deskou není velký, je komunikace směrem k řídicí desce realizována pouhým vysláním jednoho ASCII znaku, který je jedinečný pro každý příkaz. Před každým odesláním znaku je kontrolován stav připojení COM portu. Pro příjem dat po sériové lince od řídicí desky je bezprostředně po navázání komunikace s COM portem vytvořeno vlákno, které příjem znaků zabezpečuje.

Po připojení řídicí desky k napájecímu napětí dojde v případě její správné činnosti, po inicializaci, k nastavení 50% výkonu jasu řízeného osvětlovače. Následně se čeká na příjem požadavku, kterého obsluha je ale závislá na připojení externího hardware. Situaci znázorňuje obr. 110.



Obr. 110 Bloková funkce řídicí desky a její zapojení do měřícího systému

9 Možné rozvinutí programu

Metod pro měření různých parametrů kamer je mnoho a k vytvoření tohoto programu byly omezené časové možnosti, tudíž obsahuje pouze několik málo měření. Také je do programu integrováno pouze ovládání průmyslové kamery ViSor a ovládání webkamer. Pro případ, že by chtěl někdo v budoucnu do tohoto programu přidat další funkce pro měření, nebo ovládání další kamery, je zde přidána tato kapitola, která by měla přidání požadovaného kódu ulehčit. Poslední část kapitoly se zabývá dalším možným využitím programu.

9.1 Integrace další kamery

Pro přidání nové kamery bude potřeba obsloužit zejména tlačítko pro její připojení a dále tlačítka pro komunikaci s kamerou, tedy např. tlačítko pro vyžádání snímku či režim videosekvence apod. Tlačítka pro základní ovládání kamery jsou umístěny v hlavním menu „hlavniMenuStrip“ a liště pro ovládání kamery „kameraToolStrip“. Pro již integrované kamery jsou vytvořeny proměnné „Camera“ a „WebCamera“, které jsou inicializovány jako proměnné typu dané kamery. Všechny funkce využívající kameru nejdříve zkoumají, zdali je některá z těchto proměnných různá od „null“. Aby tedy nebylo nutné ve všech funkcích přidávat do zkoumané podmínky další proměnnou pro nově přidanou kameru, bude výhodné pro připojení nové kamery využít některou z výše uvedených a pouze ji přetypovat. Následující kód zjednodušeně znázorňuje činnost po stisku tlačítka pro připojení kamery.

```
private void connectButton_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (Camera == null)
    {
        try
        {
            Camera = new ...
            ...
        }
        catch (Exception exct)
        {
            MessageBox.Show("..." + exct.Message, "...",
                MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Warning);
        }
    }
    else
    {
        Camera.Dispose();
        Camera = null;
        ...
    }
}
```


Současná verze programu využívá pro jednotlivá měření vlákna i časovače. V případě připojené kamery ViSor, kdy je využívána proměnná kamery „Camera“, probíhá žádost o příjem snímku z vlákna, které bylo vytvořeno pro danou funkci měření. Tato vlákna jsou synchronizována pomocí funkce „WaitOne“ tak, že čekají na dokončení příjmu snímku a až poté vykonávají další činnost. Při využití webkamery probíhá žádost o snímek za pomoci časovače, u kterého lze přeprogramovat frekvenci dotazování se na stav přijetí snímku a také obsluhu přijatého snímku. Je tedy na programátorovi, kterou možnost si zvolí a na základě této volby si vybere proměnnou pro svojí kameru buďto „Camera“ nebo „WebCamera“.

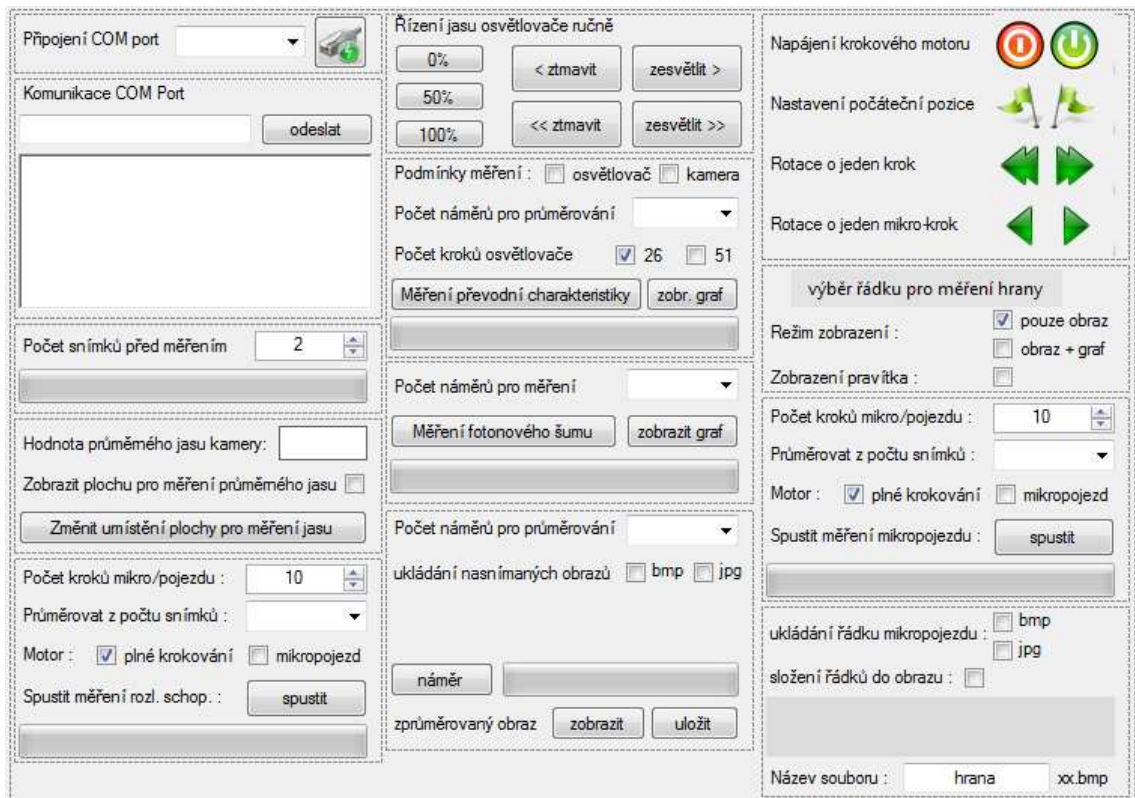
Dalším důležitým krokem je uložení přijatého obrazu z kamery do proměnné „zobrazenyObrazZkamery“ při využití „Camera“, nebo do proměnné „obrazTestovany“ při využití „WebCamera“. Z těchto proměnných se zobrazuje nasnímaný obraz v panelu „pictureBoxForm“ a to ve vrstvě „graphics“. Dále jsou využívány samotnými funkcemi pro měření.

9.2 Přidávání nových funkcí

Prvky pro nastavení parametrů měření, spuštění měření a zobrazení pomocných informací jsou v programu zobrazovány v pravém panelu s názvem „ovladani_panel“. V prvotních fázích tvorby programu byly tyto prvky přidávány do zmíněného panelu přímo a dle volby činnosti se buďto zobrazily, nebo zůstaly neaktivní a neviditelné. Toto řešení se ovšem stalo s přibývajícím počtem ovládacích prvků velice nevhodné a proto bylo nutné pro udržení přehlednosti vytvořené panelu spravovat jinak.

Současná verze programu má veškeré panely, potřebné pro měření, umístěné v panelu „panelSpanely“, který je vidět na obr. 111. Tento panel má atribut „visible“ roven „false“ a v průběhu programu se tento atribut nemění. Lze do něj tedy ukládat veškeré momentálně „přebytečné“ panely. V době, kdy není aktivováno žádné měření, je panel „ovladani_panel“ neviditelný, aby svojí plochou nepřekážel většímu zobrazení obrazu z kamery.

Aby nebylo nutné pro každou funkci měření, z nabídky hlavního menu „Metodika testu“, vytvářet vlastní umístění potřebných panelů, je do programu přidána funkce „pripravaPaneluTlacitek(ArrayList _pozadovanePanely)“. Pro zobrazení konkrétních panelů uložených v panelu „panelSpanely“, stačí tyto panely přidat do proměnné „pozadovanePanely“ a poté zavolat zmíněnou funkci. Ta se postará o správné umístění požadovaných panelů, které budou seshora postupně umístěny dle pořadí, v jakém byly vloženy do proměnné „pozadovanePanely“. Pro odebrání již přidávaných panelů pak slouží funkce „deaktivacePaneluTlacitek(ArrayList _pozadovanePanely)“, která vrací panely uložené v proměnné „pozadovanePanely“ zpátky do panelu „panelSpanely“.



Obr. 111 Panel pro ukládání používaných ovládacích panelů

V případě přidání nové funkce tedy stačí všechny její ovládací a informační prvky umístit do společného panelu a ten vložit do panelu „panelSpanely“. Poté může sestavení ovládacího panelu vypadat následovně:

```

if (pozadovanePanely != null)
    deaktivacePaneluTlacitek(pozadovanePanely);

rozdeleni_ovladani_panel_tableLayoutPanel1 = new
System.Windows.Forms.TableLayoutPanel();

pozadovanePanely = new ArrayList();

pozadovanePanely.Add(...); //zde přidat nový panel1
pozadovanePanely.Add(...); //zde přidat nový panel2
...

pripravaPaneluTlacitek(pozadovanePanely);

```

9.3 Další plánované využití programu

Získávání a zpracování obrazu je rozšiřováno do stále většího počtu odvětví, kde jsou na parametry obrazu kladeny různé požadavky. Pro výstup některých aplikací je dostačující informace, že se např. objekt ve scéně objevil, jiné zase požadují přesnou geometrickou i jasovou interpretaci. Jedním z odvětví využívající obraz, v dnešní době již převážně digitální, jsou zobrazovací metody ve zdravotnictví, ke kterým patří zejména CT, MR, RTG, Ultrazvuk a další.

9.3.1 Úvod do problematiky rentgenových přístrojů

Ze zobrazovacích metod ve zdravotnictví se zaměříme například na rentgenové přístroje. Není tomu tak dávno, co byly pro rentgenové snímky využívány klasické rentgenové filmy. Kvalita jejich obrazu nezávisela jenom na samotném filmu, ale také na zvolené expozici, která musela být přiměřená vyšetřované oblasti pacienta a dále na správném vyvolávacím procesu, u kterého byly důležitým faktorem správně namíchané chemikálie vývojky a ustalovače a také jejich teplota a délka jejich působení na film. V dnešní době se od rentgenového snímání na film stále více upouští a většina nemocnic již v rentgenologii využívá digitalizaci.

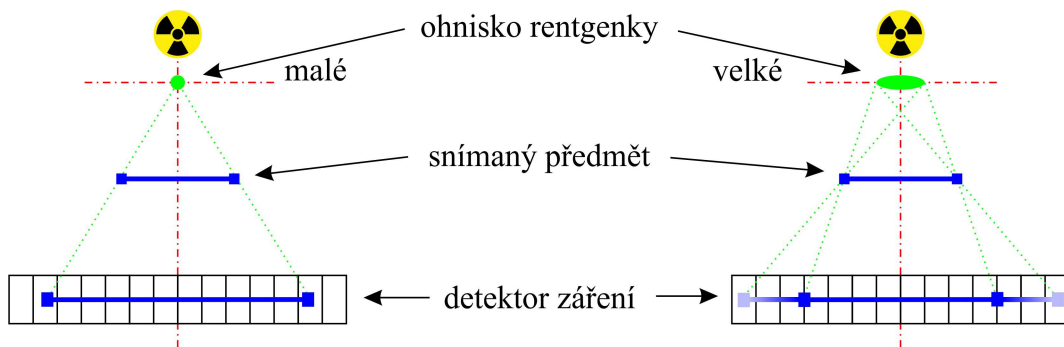
Metod pro získání digitálního rentgenového snímku ve skiagrafii je více. Nejlepší metodou, která je ale také nejdražší a tím pádem v současné době nejméně využívána, je detektor, který přímo převádí rentgenové paprsky na elektrický signál (amorfní Selén). Další metodou je využití stejných detektorů, které využívají např. průmyslové kamery. Jejich rozměry jsou ovšem větší a před detektor jsou vkládány scintilační krystaly, které převádí fotony rentgenového záření ve viditelné spektrum záření, na které jsou běžné senzory nejvíce citlivé. Poslední metodou je využití fólií pro nepřímou digitalizaci, pracující na principu emise a uvolňování elektronů z energetických pastí. Dopadem fotonu rentgenového záření se elektrony v místě srážky přesunou na vyšší energetické hladiny, kde jsou zachyceny až do doby dodání energie potřebné k jejich uvolnění. K dodání potřebné energie slouží rozdmítaný laserový paprsek ve čtečce. Procesem čtení se uložená informace z fólie vymaže, čímž je připravena pro další použití.

Při vyšetřeních, kdy je potřeba sledovat rentgenový obraz v reálném čase, se využívá tzv. skiaskopie. Zde se jako detektor i v současnosti stále hodně používá zesilovač obrazu. Zesilovač obrazu je vakuová baňka připojená na vysoké napětí, mající z jedné strany kovovou elektrodu s vrstvou CsI a z druhé strany výstupné okénko s vrstvou luminoforu. Zde dochází k transformaci rentgenového záření na viditelné a následně na elektrony, které jsou urychleny vysokým napětím a fokusovány do místa okénka. Na tuto vrstvu je zaostřen objektiv kamery. Obrazový snímač kamery je v dnešní době většinou tvořen CCD senzorem, v minulosti to byly obrazové elektronky plumbikon nebo vidikon. Skiaskopické rentgenové přístroje ovšem začínají hodně využívat digitální obrazové snímače, které byly popisovány výše u skiagrafických přístrojů.

9.3.2 Možné využití programu pro měření některých parametrů rentgenových přístrojů

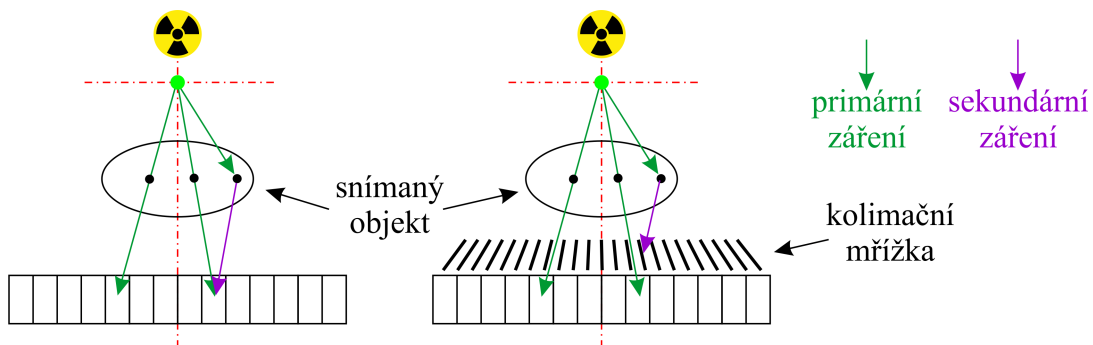
Rozlišovací schopnost

Rozlišovací schopnost rentgenového přístroje závisí na rozlišovací schopnosti samotného detektoru, i na velikosti ohniska rentgenové lampy. V ideálním případě, pro získání nejvyššího možného rozlišení, by měla být plocha ohniska lampy limitně nulová. Splnění této podmínky není technicky možné z důvodu rozložení velké tepelné zátěže způsobené dopadem elektronů na plochu ohniska na anodě (méně než jedno procento energie se promění na rentgenové záření). Výkonnější rentgenové lampy mají obvykle dvě ohniska rozdílných ploch a výkonů, přičemž větší ohnisko se využívá pro větší dávky záření, kdy je teplo rozloženo do větší plochy wolframové anody, ovšem na úkor snížené rozlišovací schopnosti. Situaci znázorňuje obr. 112.



Obr. 112 Závislost rozlišení na velikosti ohniska rentgenové lampy

Předchozí situace zjednodušeně popisovala pouze vliv primárního záření z rentgenové lampy. Fotony rentgenového záření nemusí snímaným objektem proletět přímo a nebo být pohlceny, ale mohou se i rozptýlit a dále letět v jiném směru. Toto sekundární záření snižuje rozlišovací schopnost. Pro jeho eliminaci se vkládá před detektor kolimační bucky mřížka, která bývá složena z olověných a papírových proužků, jenž jsou na sebe skládány střídavě a jsou fokusovány na ohniskovou vzdálenost. Situaci znázorňuje obr. 113.



Obr. 113 Vliv působení sekundárního záření a možnosti jeho odstranění

Rozlišovací schopnost RTG přístroje je zatížena více vlivy. Některé jsou navíc časově nestálé, např. zvětšování plochy ohniska anody způsobené dlouhodobou tepelnou zátěží. Proto je nutné parametry rentgenového přístroje pravidelně ověřovat. Pro měření prostorové rozlišovací schopnosti se využívají pruhy různé šířky, podobně jako při měření rozlišovací schopnosti kamery s použitím pruhového obrazce. Pruhy pro rentgenový test se vypalují laserem do olověné desky. Na obr. 114 je ukázka jednoho z mnoha používaných testů rentgenových přístrojů. Uprostřed obrázku se nachází zmíněné pruhy pro měření rozlišovací schopnosti.

Vinětace

Pojem vinětace se v rentgenologii příliš nevyužívá, nicméně k ní dochází. Proto tuto problematiku v práci popisují stejným názvoslovím.

Pro měření vinětace jsme u objektivu požadovali homogenní zdroj osvětlení, což u RTG z důvodu samotného fyzikálního principu vzniku rentgenového záření není možné. K vinětaci může dojít nedodržením fokusační vzdálenosti ohniska rentgenky vůči kolimační mřížce. Správná situace je znázorněna na obr. 113 vpravo, kdy natočení olověných proužků souhlasí s paprsky primárního svazku. Oddálením nebo přiblížením rentgenky se tato podmínka poruší a při snímkování dojde ke snížení intenzity záření v závislosti na vzdálenosti vůči středu.

Artefakty

Vzniklé artefakty mohou být způsobeny nehomogenní strukturou všeho, co se nachází mezi rentgenkou a detektorem. Dále mohou být způsobeny použitím nesprávné kolimační mřížky.

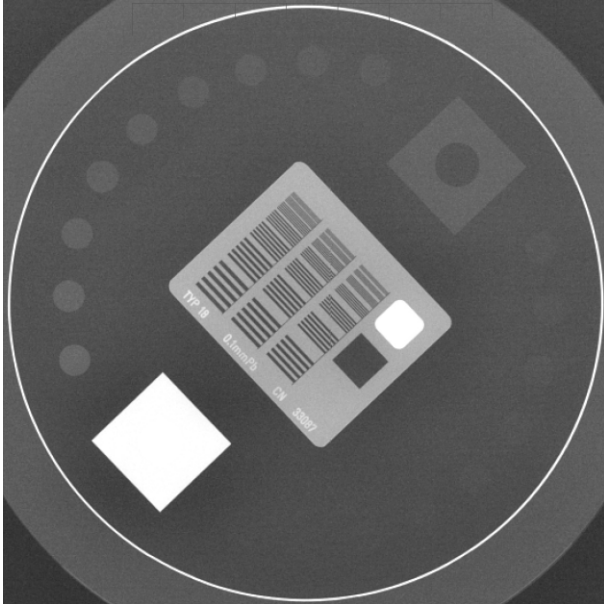
Olověné lamely kolimační mřížky jsou velice jemné, ovšem při vysoké rozlišovací schopnosti rentgenového přístroje by přesto byly v obrazu viditelné. Pro jejich odstranění se využívá velice jednoduchého principu. Před samotnou expozicí se kolimační mřížka rozkmitá ve směru kolmém na dlouhou osu lamel, čímž se v době expozice lamely kolimační mřížky rozmažou. Problém ovšem může nastat při velice krátkých expozicích, kdy je poměr délky pohybu lamel vůči jejich vzájemné vzdálenosti velice malý. V takovém případě budou lamely ve výsledném obrazu viditelné. Při nevhodné volbě hustoty kolimační mřížky a rastru detektoru, se mohou v obraze zobrazit interferenční proužky.

Šumy

Pro snížení vlivu šumu je u kamerových systému dostačující prodloužení expozičního času, kdy na obrazový senzor dopadne větší počet fotonů. V rentgenologii by to znamenalo zvýšení dávky záření, což ovšem není žádoucí s ohledem na radiační zátěž pacienta. Z důvodů používaných co nejnižších dávek záření (princip ALARA – As Low As Reasonably Achievable) je vzniklý signál nutno hodně zesilovat. To má za následek také zesílení šumů detektoru.

Měření parametrů pomocí různých testů

Hodnocení vlastností zrentgenovaných testovacích obrazců probíhá ve většině případů subjektivním pozorováním, které je závislé na oku pozorovatele a parametrech zobrazovacího řetězce. Jednou z mých vizí do budoucna je přidání funkcí pro objektivní měření rozlišovací schopnosti rentgenových přístrojů do vytvořeného programu tak, aby napomáhaly při vyhodnocování testovacích obrazců.



Obr. 114 Test rentgenového přístroje

10 Závěr

Cílem práce bylo vytvořit pracoviště i potřebné programové vybavení, které by umožňovalo měření kamerových systémů. V začátcích tvorby této práce, při seznamování se zadanou problematikou, jsem pro zpracování náměrů využíval programovací prostředí Matlab. Jelikož by z licenčních důvodů nemohl být program vytvořený v Matlabu využíván v laboratoři videometrie, bylo nutné přejít k jinému programovacímu prostředí. Kvůli návaznosti na jiné, pro laboratoř videometrie již vytvořené programy, bylo pro programování této práce zvoleno vývojové prostředí Microsoft Visual Studio C#.

Při zkoumání řešení zadané problematiky ve světě jsem vyzkoušel velice výkonný nástroj pro měření parametrů digitálních fotoaparátů, program Imatest. Ten obsahuje funkce od generování testovacích obrazců dle zadaných parametrů, až po jejich výkonné testování. Navíc je možné tento software nasadit do průmyslové výroby. Zmíněný program lze stáhnout v demo-verzi. Práce s tímto programem pro mě byla přínosná zejména z důvodu objasnění některých bodů zadání vlastní práce.

V prvotní fázi vývoje programu pro testování kamer jsem jednotlivé navrhované funkce testoval pouze číslicově, bez možnosti vykreslování testovaného obrazu a výsledků měření. To bylo pro měření velice nekomfortní, nemluvě např. o chybějící zpětné vazbě poskytující informaci, zdali je dané měření prováděno ve správném místě obrazu. S přibývajícím zkušenostmi vývojového prostředí také přibývaly a zdokonalovaly se funkce nejenom pro měření, ale také funkce grafického zobrazení obrazu, podpůrných grafických informací a výsledků. Postupně jsem pro funkce, které zatěžovaly běh hlavního programu, vytvořil samostatná vlákna. Dílčím cílem bylo také vytvořit ovládání intuitivní a prostředí programu vzhledově příjemné.

Rozsah zadané problematiky je hodně široký. Proto jsem se musel při tvorbě této práce seznámit nejenom s problematikou kamerových systémů a zvoleným programovacím prostředím, ale také s vektorovým grafickým nástrojem pro tvorbu testovacích obrazců. Dále bylo nutné pro některá měření vytvořit potřebný hardware, u kterého jsem z důvodu možnosti jeho řízení z hlavního programu využil znalosti programování použitého mikroprocesoru, který je součástí vytvořené řídicí desky.

První kapitola této práce se zabývá rozbořem zadané problematiky, ve kterém jsou popsány jednotlivé parametry kamery jako celku a také její hlavních částí, tedy obrazového snímače a objektivu. Další kapitoly jsou již věnovány vlastní práci, kde jsou popsány jednotlivé funkce programu, vytvořený hardware i testovací obrazce.

Mezi nejpropracovanější vytvořené funkce lze asi zařadit měření převodní charakteristiky obrazového snímače a jeho šumů. Tato měření již byla využita na cvičeních v laboratoři videometrie. Osobní přítomností na zmíněných cvičeních jsem měl možnost doladit drobné nedostatky v programu, které objevili studenti při jeho používání. Měřením byla dokázána přítomnost fotonového šumu a zvyšování jeho hodnoty se zvětšující se hodnotou expozice. Z náměrů převodní charakteristiky plyne asi jeden z nejdůležitějších poznatků této práce, kterým je závislost tvaru převodní charakteristiky na dalším zpracování obrazu.

Všechny testovací obrazce jsem vytvořil vektorově, z čehož vyplývá možnost využití vysoké kvality při jejich tisku, která je závislá pouze na použité tiskárně. V současné době jsou testovací obrazce vytištěné pouze na transparentní fólii laserovou tiskárnou s rozlišovací schopností 600dpi. Pro dosažení ještě lepších parametrů testovacích obrazců bude vhodné jejich vytištění pomocí osvitové jednotky, jejíž rozlišení je mnohem vyšší (např. 4064dpi). Na cvičeních v laboratoři videometrie již byl využit testovací obrazec, jehož jeden segment je zobrazen na obr. 66. Výsledek ovšem nebyl zpracován popisovaným programem, protože v té době ještě nebyly dokončeny potřebné funkce pro měření rozlišovací schopnosti.

Měření rozlišovací schopnosti kamery je pomocí vytvořeného programu možné pouze z testovacích obrazců. Z časových důvodů se mi nepodařilo naprogramovat algoritmus pro měření rozlišovací schopnosti, založený na rozvinutí hrany pomocí přípravku pro posouvání ostrého břitu. Zmíněný přípravek je plně funkční, jeho řídicí deska, výkonová část motoru a podsvětlení jsou osazeny na plošných spojích. Na plošném spoji není osazena část jeho koncových spínačů, jejichž funkčnost jsem testoval pouze na nepájivém kontaktním poli. Myšlenkou pro vytvoření tohoto přípravku a softwaru bylo kameru nejdříve využít jako měřící zařízení pro linearizaci mikropojezdu a následně sním měřit rozlišovací schopnost kamery. Druhou část, program pro měření, se mi z časových důvodů nepodařilo dokončit.

Při vytváření potřebného hardwaru jsem zvolil nízkonákladové řešení, kdy jsem pro jednotlivé komponenty využíval většinou součástky z vyřazených přístrojů. Samozřejmě že by bylo možné, například místo vytvořeného pojezdu pro posouvání ostrého břitu, zakoupit přímo hotový pojezd, který by měl navíc mnohem jemnější krok a také větší přesnost pojezdu. Důvodem volby vlastního řešení hardwaru nebyla pouze cena, ale také prozkoumání možností využití vyřazené počítačové mechaniky, o které v současné době není nouze. V tomto případě bylo hlavním cílem navrzení možnosti zjemnění kroku pojezdu pomocí mikrokrokování a linearizace jeho pohybu.

Poslední měření obrazového snímače, které vytvořený program umožňuje, je měření homogenity fotocitlivosti obrazového snímače. Měření homogenity je oproti měření samotné fotocitlivosti snadné. Jedná se pouze o relativní měření, u kterého se posuzují rozdíly fotocitlivosti jednotlivých pixelů. Pro měření samotné fotocitlivosti by bylo nutné vytvoření dalšího osvětlovače, v ideálním případě monochromatického, což se z časových důvodů rovněž nepodařilo provést. Velice podobně, jako při měření homogenity fotocitlivosti, se v programu provádí měření vinětace objektivů.

Program dále umožňuje pomocí vytvořeného testovacího obrazce měřit radiální zkreslení objektivů. Tím byla dokázána závislost radiálního zkreslení na použité ohniskové vzdálenosti objektivu. Protože je v programu využívána lineární interpolace pro subpixelovou detekci hran, byla rovněž dokázána závislost tvaru převodní charakteristiky na výsledek prováděného měření.

Do vytvořeného programu jsem z důvodu usnadnění měření naprogramoval také různé pomocné funkce pro měření, jako např. možnost manipulace s obrazem (zvětšování, posuv), zobrazení pomocných informací z měření (velikost otevřeného obrazu, hodnota zvětšení, souřadnice myši, souřadnice výběru, velikost výběru...), zobrazení grafických prvků (pomocné osy, mřížka s přizpůsobující se hustotou) a také funkci, která pomocí grafu relativní hodnoty zaostření napomáhá obsluze při správném zaostření snímané scény. Programování všech těchto funkcí mě stálo nemálo času, který ovšem v závěru chyběl pro dokončení zmíněných, nedořešených částí této práce.

Navíc proti zadání, jsem se v práci zabýval možností vytvoření pojízdné, optické lavice, která by umožňovala měření hloubky ostroty. Lavice využívá stejnou řídicí desku, jako ostatní přípravky v této práci a je ve stádiu před dokončením. Vzhledem k možnému řízení délky posuvu vozíku lavice, je pro řídicí desku naprogramován jiný firmware, umožňující mimo jiné také zadávání přesného počtu kroků pojezdu.

Grafický vektorový program CorelDraw použitý pro vytváření testovacích obrazců, jsem použil i při tvorbě vlastních obrázků upřesňujících popisovanou problematiku. Rovněž jsem jej použil pro překreslení obrázků z cizích zdrojů, z důvodu zachování grafického vzhledu práce. Pod obrázky je uveden zdroj, ze kterého jsem čerpal námět.

V poslední části práce se zabývám možnostmi dalšího rozšíření vytvořeného programu pro využití testování rentgenových přístrojů. Tato část obsahuje i stručný úvod do problematiky rentgenových přístrojů.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

CCD	-	obrazový senzor (<u>C</u> harge <u>C</u> oupled <u>D</u> evice)
CMOS	-	obrazový senzor (<u>C</u> omplementary <u>M</u> etal <u>O</u> xide <u>S</u> emiconductor)
OTF	-	optická přenosová funkce (<u>O</u> ptical <u>T</u> ransfer <u>F</u> unction)
MTF	-	modulační přenosová funkce (<u>M</u> odulation <u>T</u> ransfer <u>F</u> unction)
DR	-	dynamický rozsah (<u>D</u> ynamic <u>R</u> ange)
MT	-	přenos modulace (<u>M</u> odulation <u>T</u> ransfer)
K	-	kontrast obrazu
EV	-	hodnota expozice (<u>E</u> xposure <u>V</u> alue)
UP_{pch}	-	uložené pole z náměrů převodní charakteristiky
$V_{pch-str}$	-	výsledek převodní charakteristiky zprůměrovaných pixelů
$V_{pch-min}$	-	výsledek převodní charakteristiky pixelu s nejnižší citlivostí
$V_{pch-max}$	-	výsledek převodní charakteristiky pixelu s nejvyšší citlivostí
N_c	-	celkový počet snímků
N_p	-	počet snímků pro průměrování
N_k	-	počet náměrů převodní charakteristiky dle zvoleného kroku
N_z	-	počet „zahozených“ snímků
N_{fs}	-	počet snímků pro měření fotonového šumu
UP_{fs}	-	uložené pole pro měření fotonového šumu
UJP_{fs}	-	uložené jednotlivé pixely pro měření fotonového šumu
V_{fs-str}	-	střední hodnota jednoho pixelu ze všech snímků
L_v	-	výška vnitřní strany rámu testovacího obrazce
$L_č$	-	šířka černého pruhu obrazce rozlišovací schopnosti
L_b	-	šířka „bílého“ pruhu obrazce rozlišovací schopnosti

Reference

- [1] Dokumentace imatest [online] – dostupné dne 7.12.2012 na <http://www.imatest.com/docs/>
- [2] Hlaváč V., Sedláček M., Zpracování signálů a obrazu. Skripta ČVUT, Praha 2007
- [3] Fischer J., Přednáška A3M38VBM – Modulační přenosová funkce snímače v. 2011, ČVUT, Praha
- [4] Laboratorní úloha z předmětu fotonika X34FOT – Modulační přenosová funkce digitálního fotoaparátu
- [5] Bahaa E. A. Saleh, Malvin C. Teich, Základy fotoniky – svazek 3, Matfyzpress, Praha
- [6] Sonka M., Hlaváč V., Boyle R., Image Processing, Analysis and Machine Vision, 2008
- [7] Anatomie buňky CMOS [online] - dostupné dne 15. 12. 2012 na <http://www.ride-downhill.de/blog/?p=709>
- [8] Fischer J., Optoelektronické senzory a videometrie, Skripta ČVUT, Praha, 2002
- [9] Dynamický rozsah snímače [online] - dostupné dne 16. 12. 2012 na <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/digitalimaging/concepts/dynamicrange.html>
- [10] Micron MT9M001 datasheet
- [11] Glenn D. Boreman, Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems, 2001
- [12] Unfors Luxi – přístroj pro měření jasu a osvětlení, popis online – dostupné dne 19.12.2012 na <http://www.unfors.com/products.php?lang=es&catid=155>
- [13] Polohovací systém s web kamerou, Bakalářská práce, Lipenský V., 2012
- [14] datasheet použitých bílých 60°LED 560MW7D
- [15] datasheet zelené LED BL-L813
- [16] datasheet mikrokontroléru Atmel ATmega8
- [17] přednáška A3M38VBM dostupná online na: <http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3M38VBM/Pr ed A3M38VBM 2012 opticka sous 7.pdf>
- [18] popis laserové tiskárny [online] – dostupné dne 14. 12. 2012 na http://cs.wikipedia.org/wiki/Laserová_tiskárna
- [19] popis laserové tiskárny [online] – dostupné dne 14. 12. 2012 na http://lasery.wz.cz/princip_laserove_tiskarny.html

- [20] recenze objektivu Sigma 10-20mm f4,5-5,6 EX DC HSM [online] – dostupné dne 20. 12. 2012 na:
<http://www.photozone.de/canon-eos/307-sigma-af-10-20mm-f4-56-hsm-ex-dc-lab-test-report--review?start=1>
- [21] Přesné měření polohy kamerami CCD a CMOS, Diplomová práce, Ing. Coufal V., 2011

Zdroje pro programování

- [a] Nagel Ch., Evjen B., Glynn J., Watson K., Skinner M., Programujeme profesionálně C# 2008, první a druhý díl, 2009
- [b] Sharp J., Microsoft Visual C# 2010 Krok za krokem, 2010
- [c] Pribula O., ViSor Control Center C# software
- [d] Lipenský V., WebCamera C# software
- [e] datasheet ATmega8
- [f] ikony používané v programu jsou stažené online z:
<http://www.iconarchive.com/>

Přílohy

A	Obsah CD	100
B	Schéma řídicí desky, výkonové části krokového motoru a osvětlovače	101
C	Přípravek pro posouvání ostrého břítu a řízeného osvětlovače	102

A Obsah CD

TestovaniKamery - zdrojové kódy

- zdrojové kódy programu „TestovaniKamery“ a knihoven

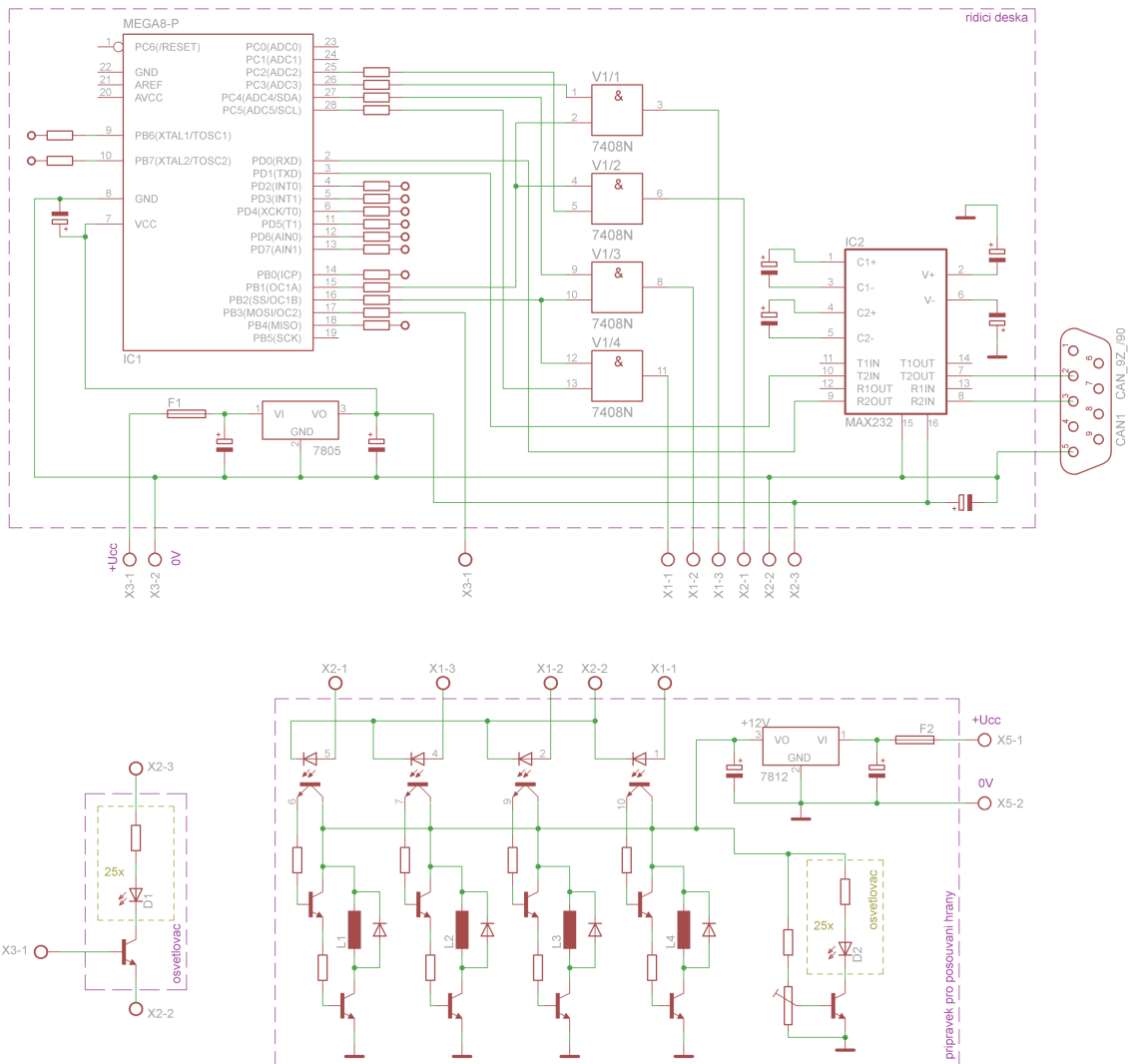
Testovací obrazce

- navržené testovací obrazce s příponou „cdr“ a „pdf“

Náměry

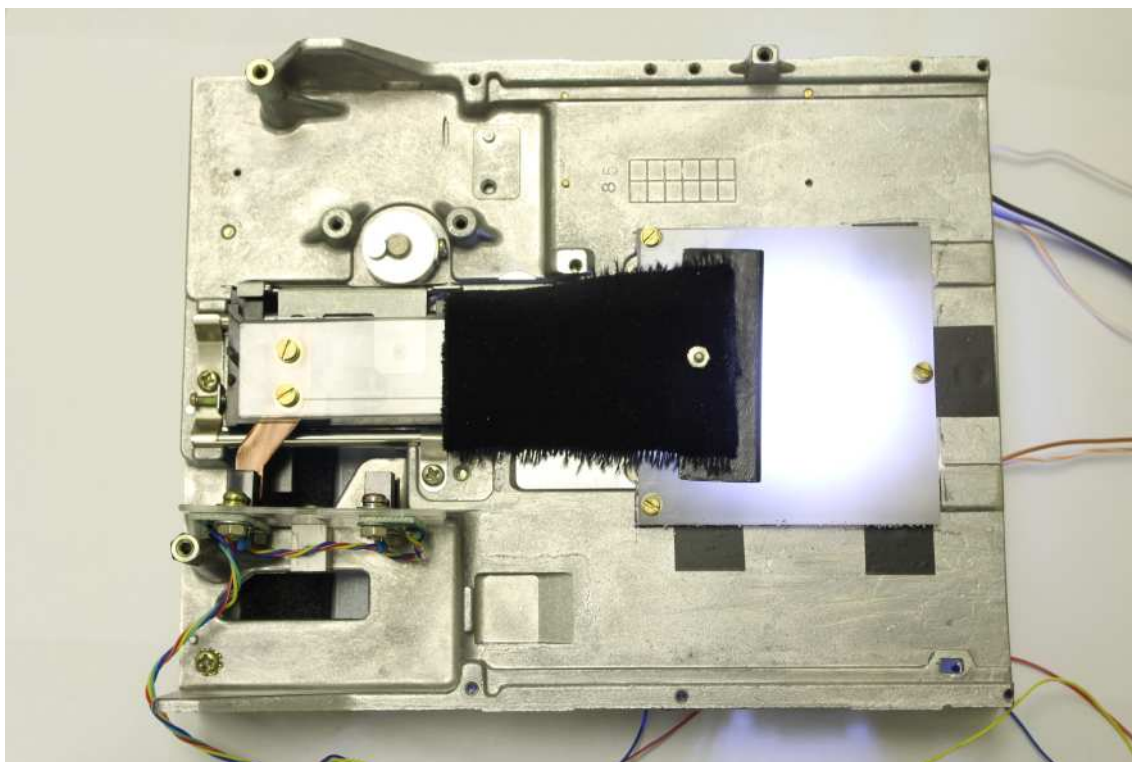
- náměry prováděné vytvořeným programem a screenshoty průběhu měření

B Schéma řídicí desky, výkonové části krokového motoru a osvětlovače



C

Přípravek pro posouvání ostrého břitu (demontovaný kryt)



Přípravek řízeného osvětlovače (demontovaný panel LED)

