



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra radioelektroniky

Automatické ostření digitálního fotoaparátu

Autofocus of the DSLR

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: Doc.Mgr. Petr Páta PhD.

Lukáš Nesvadba

Praha, květen 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Nesvadba** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **434712**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Multimediální technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Automatické ostření digitálního fotoaparátu

Název bakalářské práce anglicky:

Autofocus of the DSLR

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s konstrukcí digitálního fotoaparátu a popište jeho hlavní části včetně nejdůležitějších parametrů. Dále se zaměřte na jednotku automatického ostření. Vysvětlete její funkci a navrhnete testovací postup, který ověří její kvalitu. Proveďte měření vlastností digitálního fotoaparátu se zaměřením na jednotky automatického ostření za různých podmínek (jas scény, kontrast v obraze apod.). Měření realizujte pro různé typy fotoaparátů a výsledky srovnajte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ISO, ISO 12233:2017, Photography - Electronic still-picture cameras - Resolution measurements, 2017.
- [2] Ch. Mauer, Measurement of the spectral response of digital cameras, VDM Verlag, 2010.
- [3] ISO, ISO 17850:2015 Photography - Digital cameras - Geometric distortion (GD) measurements, 2015.
- [4] J. B. Phillips, H. Eliasson, Camera Image Quality Benchmarking, Wiley, 2017.
- [5] J. Nakamura, Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras, CRC Press, 2017.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Mgr. Petr Páta, Ph.D., katedra radioelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

doc. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis oěka(na)ky

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

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 vysokoškolských závěrečných prací.“

Praha, 25.5.2018

.....

Lukáš Nesvadba

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu docentovi Pátovi za jeho ochotu, cenné rady a metodické vedení této práce.

Dále bych chtěl poděkovat rodině a přátelům, kteří mi byli podporou nejen v průběhu psaní závěrečné práce, ale i během celého studia na vysoké škole.

Abstrakt

Tato práce se zabývá digitálními fotoaparáty, především pak jejich funkcí automatického ostření. První část je zaměřena na princip fotoaparátu, jeho hlavní vlastnosti a komponenty, které jsou důležité pro tvorbu fotografie. V druhé části je probrána funkce automatického ostření, jeho možnosti a využití. Třetí část práce se zabývá testováním automatického ostření fotoaparátů, z hlediska jeho rychlosti. Měření proběhlo na různých fotoaparátech za různých světelných podmínek. Pořízené fotografie jsou testovány na kvalitu zaostření pomocí funkce MTF v závislosti na prostorové frekvenci.

Klíčová slova

Digitální fotoaparáty, automatické ostření, aktivní ostření, pasivní ostření, MTF

Abstract

This thesis is on DSLR, mainly about their function of autofocus. The first part is focused on principle of DSLR, on the properties and components, which are important for making photo. In the second part is explained autofocus function, its options and utilization. Third part of this work is about testing DSLR speed of autofocus function. Measurement has taken place on different types of DSLR in different light conditions. The photos from measurement are tested on focus quality by MTF as a function of spatial frequency.

Key words

DSRL, auto focus, active focus, passive focus, MTF

Obsah

Seznam obrázků	7
Seznam tabulek	7
1 Úvod	10
2 Digitální fotoaparát	11
2.1 Historie digitální fotografie	12
2.2 Konstrukce digitálního fotoaparátu	13
2.3 Osvětlení	14
2.4 Expozice	14
2.4.1 Osvětlovací doba	14
2.4.2 Clona	14
2.4.3 ISO	15
2.5 Obrazový senzor	15
2.6.1 Zobrazovací rovnice objektivu	16
2.6.2 Vlastnosti objektivu	17
2.7 Ostření	19
3 Automatické ostření	20
3.1 Historie ostření	20
3.2 Aktivní ostření	21
3.3 Pasivní ostření	22
3.3.1 Detekce kontrastu	22
3.3.2 Fázová detekce	25
3.4 Hybridní ostření	27
3.5 Ostřicí motory	27
4 Testování kvality AF	30
4.1 Navržení metody pro testování rychlosti	30
4.2 Měření rychlosti AF	31
4.3 Výsledky měření rychlosti	31
4.4 Navržení metody pro kvalitu zaostření pomocí MTF	33
4.5 Vyhodnocení MTF	36
4.6 Zhodnocení měření	38
5 Závěr	39
Literatura:	40
Přílohy	43

Seznam obrázků

Obrázek 1: Řez DSLR [8]	13
Obrázek 2: Princip zobrazení objektivem [21]	16
Obrázek 3: Znázornění bodové rozptylové funkce [23]	17
Obrázek 4: Princip aktivního ostření s využitím infračerveného světla [33].....	21
Obrázek 5: Obecný princip pasivního ostření [35].....	22
Obrázek 6: Závislost velikosti kontrastu na pozici objektivu [21]	23
Obrázek 7: Proces 2D DWT pro dvě úrovně [32]	24
Obrázek 8: Princip fázové detekce [37]	25
Obrázek 9: Přehled motorů USM [43].....	28
Obrázek 10: Ukázka zvukové stopy při ostření v programu Reaper	30
Obrázek 11: Ukázka fotografovaných scén.....	31
Obrázek 12: Grafické znázornění tabulky 2	32
Obrázek 13: Grafické znázornění tabulky 3	32
Obrázek 14: Výřez testované části obrazce	33
Obrázek 15: Zprůměrované hodnoty obrazce do jednoho řádku pixelů	33
Obrázek 16: Ukázka ESF pro Pentax *istDL.....	33
Obrázek 17: Ukázka LSF pro Pentax *istDL.....	34
Obrázek 18: Ukázka MTF pro Pentax *istDL	34
Obrázek 19: Závislost MTF v průběhu manuálního ostření k fotoaparátu Pentax *istDL	35
Obrázek 20: Grafické znázornění závislosti MTF ₅₀ v průběhu manuálního ostření k fotoaparátu Pentax *istDL.....	35
Obrázek 21: Porovnání zaostření fotoaparátů při maximálním osvětlení scény 3210 lx .	36
Obrázek 22: Ukázka MTF v závislosti na jasu pro fotoaparát Canon EOS 5D Mark II	37
Obrázek 23: MTF při opakovaném ostření fotoaparátu Canon EOS 5D Mark II	37
Obrázek 24: Příloha 1-Pentax *ist DL [49]	43
Obrázek 25: Příloha 1-Canon EOS 550D [50]	43
Obrázek 26: Příloha 1-Canon EOS 5D Mark II [51].....	43
Obrázek 27: Příloha 1-Nikon D700 [52]	44
Obrázek 28: Příloha 1-Nikon D5100 [53]	44
Obrázek 29: Příloha 2- MTF pro Canon EOS 5D Mark II v závislosti množství světla na scéně	45
Obrázek 30: Příloha 2- MTF pro Canon EOS 550D v závislosti množství světla na scéně .	45
Obrázek 31: Příloha 2- MTF pro Nikon D700 v závislosti množství světla na scéně	46
Obrázek 32: Příloha 2- MTF pro Nikon D5100 v závislosti množství světla na scéně	46
Obrázek 33: Příloha 2- MTF pro Pentax *istDL v závislosti množství světla na scéně	47
Obrázek 34: Příloha 2- MTF pro Canon EOS 5D Mark II při opakovaném ostření	47
Obrázek 35: Příloha 2- MTF pro Canon EOS 550D při opakovaném ostření.....	48
Obrázek 36: Příloha 2- MTF pro Nikon D700 při opakovaném ostření.....	48
Obrázek 37: Příloha 2- MTF pro Nikon D5100 při opakovaném ostření.....	49
Obrázek 38: Příloha 2- MTF pro Pentax *istDL při opakovaném ostření.....	49

Seznam tabulek

Tabulka 1: Jádru Laplaceovy matice.....	23
Tabulka 2: Tabulka rychlosti AF v závislosti na osvětlení scény pro testovací obrazec	31
Tabulka 3: Tabulka rychlosti AF v závislosti na osvětlení scény pro umělou scénu	32
Tabulka 4: Rozlišení fotografie a velikost senzoru v ose x	36
Tabulka 5: MTF50 v závislosti na jasů	37

Seznam použitých zkratek

DSLR (*Digital Single Lens Reflex*) – digitální zrcadlovka

MTF (*Modulation Transfer Function*) – modulační přenosová funkce

AF (*Autofocus*) - automatické ostření

AD (*Analog to digital*) – digitálně analogový

JPEG (*Joint Photographic Experts Group*) – standard ztrátové komprese pro obrazový signál

MPEG (*Moving Picture Experts Group*) – standard ztrátové komprese pro audiovizuální signál

UV (*Ultraviolet*) – ultrafialové

CCD (*Charge Coupled device*) – součástka s vázaným nábojem

CMOS (*Complementary Metal Oxid Semiconductor*) – technologie pro výrobu integrovaných obvodů

EV (*Exposure Value*) – expoziční hodnota

SNR (*Signal Noise Ratio*) – odstup signálu od šumu

PSF (*Point Spread Function*) – bodová rozptylová funkce

ESF (*Edge Spread Function*) – rozptylová funkce na hranu

LSF (*Line Spread Function*) – rozptylová funkce na řádek

OTF (*Optical Transfer Function*) – optické přenosová funkce

MTF₅₀ – Prostorová frekvence, která odpovídá poklesu křivky MTF na 50%

CoC (*Circle of Confusion*) – rozptylový kroužek

TTL (*Through The Lense*) – skrz objektiv

FFT (*Fast Fourier Transform*) – rychlá Fourierova transformace

DWT (*Discrete Wavelet Transform*) – diskrétní vlnková transformace

USM (*Ultrasonic Motor*) – ultrasonický motor

STM (*Stepping Motor*) – krokový motor

1 Úvod

Funkce automatického ostření mě začala zajímat už od počátku mého fotografování. Tato práce pro mne byla dobrou příležitostí, jak se o dané tématice dozvědět více.

Automatické ostření je dnes již neodmyslitelnou částí fotografování. Jeho hlavní výhodou je vysoká rychlost v porovnání s manuálním ostřením. Dnešní fotoaparáty jsou schopné i predikce pohybu a díky této skutečnosti dokáží ostřit na neustále se pohybující předměty. Tím se otevírají zcela nové možnosti. Přesto, že automatické ostření není vždy dokonalé, v určitých podmínkách je nenahraditelné.

Tato práce se bude zabývat právě automatickým ostřením. Pro správné pochopení funkce automatického ostření je potřeba začít s digitálním fotoaparátem. Proto mu bude věnována druhá kapitola mé práce. V této části bude obecně popsán vznik digitální fotografie, konstrukce fotoaparátu, a také jeho důležité parametry pro vznik fotografie.

Třetí kapitola bude o automatickém ostření. Zde budou popsány druhy automatického ostření, které digitální fotoaparáty využívají, nebo využívaly v minulosti. Vysvětlení principu jejich činnosti, a s tím související výhody a nevýhody každého systému. Uvedeny budou také některé algoritmy pro vyhodnocení ostrosti obrazu.

Čtvrtá část bude o testovacím postupu, který ověří kvalitu automatického ostření. Testováno bude několik fotoaparátů od různých výrobců. Testovací postup se dělí do dvou částí. Nejprve je testována schopnost rychle zaostřit v různých světelných podmínkách. Následně jsou pořízené fotografie vyhodnoceny pomocí funkce MTF na kvalitu zaostření.

Poslední část je věnována vyhodnocení výsledků práce.

2 Digitální fotoaparát

Digitální fotoaparát, označován také jako DSLR z anglického názvu „*Digital Single Lens Reflex*“ (dále DSLR), je fotoaparát zaznamenávající obraz do digitální podoby. Ke své funkci využívá sklápěcí zrcátko.

Základní tři prvky každého fotoaparátu jsou:

- optický prvek zvaný objektiv, usměrňuje světelný tok pomocí soustavy čoček a zaostřuje na fotografovaný objekt
- prvek zaznamenávající fotografii, pro digitální fotografii je jím obrazový senzor, který nahradil analogové snímání na film.
- mechanický prvek, kterým je tělo fotoaparátu, plní především ochranou funkci a jsou do něj vmontovány všechny součástky.

Tyto tři prvky je potřeba zkombinovat a nastavit tak, aby tvořily ostrý a rozpoznatelný obraz.

Vznik digitální fotografie je založen na následujícím principu. Světlo dopadající na senzor DSLR vytváří náboj úměrný intenzitě dopadajícího světla. Získané napětí ze senzoru je pomocí **AD převodníku** převedeno na digitální číslo. Zabudovaný mikroprocesor zpracuje data z AD převodníku a vytvoří z nich snímek, který je převeden do zvoleného grafického formátu např. JPEG. Tyto procesory jsou jednoúčelové a slouží výhradně ke zpracování obrazu. Fotoaparáty obvykle obsahují další procesory, které se starají o komunikaci a o uživatelské rozhraní. Soubor z procesoru je uložen na paměťovou kartu fotoaparátu. Tato karta má trvalý záznam a je elektronicky mazatelná.

Světlo na senzor dopadá přes řadu filtrů, jako je Bayerova maska, UV filtr, nebo low pass filtr. Bayerova maska je umístěna před senzorem, protože senzor nedokáže rozpoznat vlnovou délku světla. Je tvořena z pole barevných filtrů, to rozdělí dopadající světlo na složky RGB. Pixel sbírá informace pouze o jedné z těchto barev, které se pravidelně střídají v mřížce. Pro získání úplné informace se obraz interpoluje. Senzor není citlivý pouze na viditelné spektrum světla. Reaguje též na světlo UV a infračervené. Tím by mohly vzniknout falešné barvy, proto je před senzorem umístěn UV filtr, který tyto složky spektra odstraní a zajistí senzoru stejné spektrální vnímání jako má lidské oko. Low pass filtr funguje jako filtr typu dolní propust, výsledný obraz lehce rozostří. Při ztrátě extrémního detailu je vyřešen problém s rušivým optickým efektem, zvaným moiré. Tento filtr je dnes běžně implementován do většiny modelů fotoaparátů.

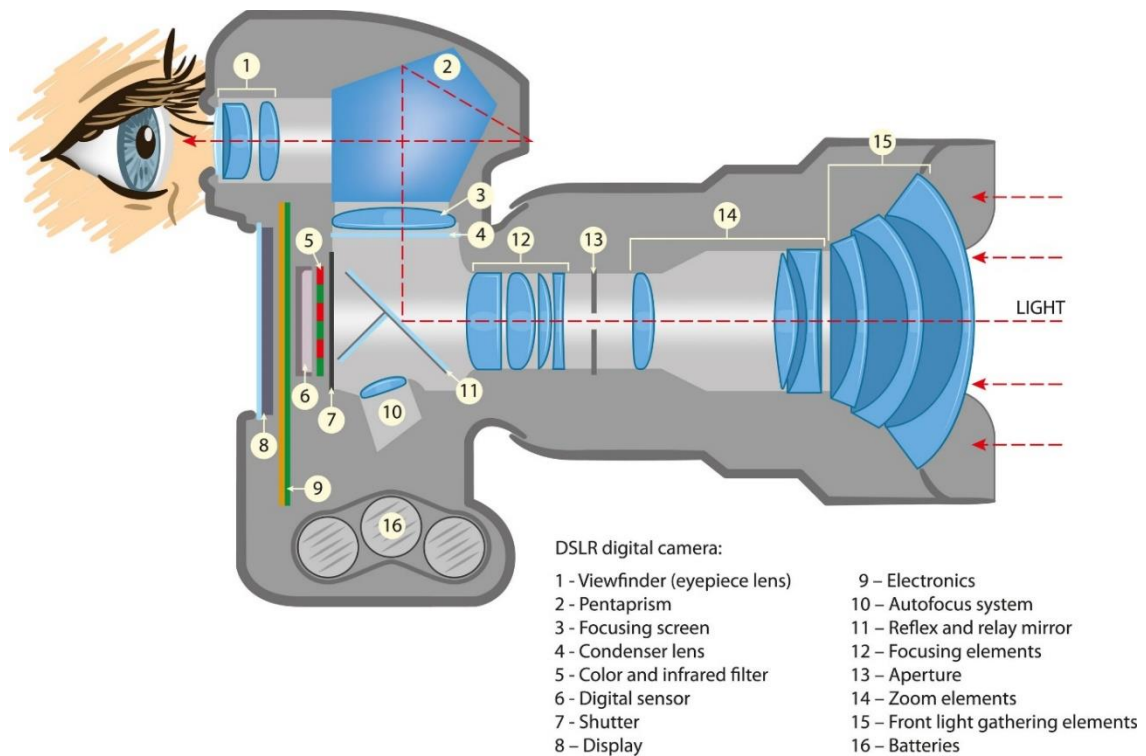
Jelikož AD převodník převádí napětí do digitální podoby, dochází zde ke kvantizační chybě. Chyba je závislá na počtu bitů převodníku. Kvalita AD převodníku se tedy udává v bitech, nazývaná také jako **barevná hloubka**, přičemž 8bitový převodník má 256 hodnot jasu na každou základní barvu barevné soustavy. Nejvyšší napětí, které je AD převodník schopný zpracovat, se nazývá jeho **dynamický rozsah**. [1]–[5]

2.1 Historie digitální fotografie

V roce 1969 byl představen první CCD senzor, který měl pouze 100x100 obrazových bodů, tento krok poskytl klíčovou technologii pro vývoj digitální fotografie, která potřebovala nahradit analogový film jako zaznamenávající médium. Roku 1975 byl využitý nedávno vynalezený CCD senzor pro první fotoaparát svého typu od firmy Kodak. Fotografie byly černobílé a nahrávaly se na magnetickou pásku. Rozlišení senzoru bylo 0,01Mpx a přístroj vážil kolem 4 kilogramů. Ve stejném roce byl překročen další milník v historii digitální fotografie, vynalezením Bayerovi masky, která umožňuje vytvoření barevné fotografie na jeden senzor. Dříve musely být použity tři obrazové senzory, kde každý snímal jednu barvu. I dnes se ve většině DSLR řeší barevný obraz pomocí Bayerovy masky.

Roku 1981 byla společností Sony představena kamera, která ukládala až padesát snímků na disketu. Principiálně to byla kamera, ale jelikož se ukládaly pouze jednotlivé framy videa, nebyl to digitální fotoaparát v pravém slova smyslu. Tyto „fotoaparáty“ byly populární do příchodu pravých digitálních fotoaparátů. První pravý fotoaparát byl v roce 1988 firmou Fuji. Jednalo se o typ DS-1P. Zde už byly zachycené fotografie ukládány na 16MB interní paměťovou kartu. V roce 1988 byly poprvé stanoveny první standardy JPEG a MPEG. Tyto formáty stanovily universální standard, umožňující ukládání obrázků a videa v komprimovaném stavu. V roce 1990 byla firmou Adobe zveřejněna verze Photoshopu 1.0. O rok později firma Kodak vydala první profesionální DSLR skládající se z těla filmového přístroje Nikon F3 napojeného na krabičku obsahující harddisk, display a baterie. Až v roce 1995 byly představeny fotoaparáty, které v těle obsahovali všechny své komponenty, šlo však většinou o tělo filmového přístroje doplněné o digitální záda. První opravdový DSLR byl Nikon D1 vydaný v roce 1999. Dále probíhaly snahy o zvýšení rozlišení senzoru, kde se ukázaly nápomocné mikro-čočky. Tyto čočky jsou nad každým pixelem v poli a pomáhají na ně směřovat světlo. Tato technologie umožní vyšší rozlišení při zachování relativně malého šumu. V roce 2006 firma Nikon přestala vyrábět většinu svých filmových fotoaparátů, aby se naplno mohla věnovat rozvoji DSLR. Prvním fotoaparátem, který měl možnost Full HD videa, byl Canon EOS 5D II. To byl poslední z významných kroků, které DSLR doposud urazily. Technologie se však neustále zdokonalují a společně s ní i fotoaparáty. [6], [7]

2.2 Konstrukce digitálního fotoaparátu



Obrázek 1: Řez DSLR [8]

Světlo vstupuje do objektivu skrz přední elementy shromažďující světlo (15). Prochází objektivem, kde změnou polohy jedné nebo soustavy čoček (14) můžeme měnit zoom neboli přiblížení. Světlo prochází skrz clonu (13), kterou jsme schopni redukovat množství světla. V klidovém stavu fotoaparátu je clona vždy otevřená. Dále jsou zaostřovací čočky (12). Ideálně všechny paprsky světla, které projdou do objektivu jsou jimi zaostřeny na obrazový senzor (6), který je technologie CMOS nebo CCD. Zrcátko (11) je polohovatelné a podle toho v jaké poloze se nachází, může propouštět světlo na obrazový senzor (6) nebo odrážet světlo do matnice (4), pro automatické ostření se zrcátko vyrábějí polopropustná, kde větší část světla (cca. 70%) se odrazí a zbytek projde skrz, zde narazí na druhé zrcátko, které odrazí světlo směrem dolů na senzory pro automatické ostření (10). Senzor není krytý pouze zrcátkem, ale také závěrkou, u které lze nastavit čas, po který bude světlo na senzor dopadat. Za senzorem (6), se nachází elektronika, která signál zesiluje, převádí do digitální podoby, zpracovává ho a ukládá do paměti. Před senzorem (6) je řada filtrů (5). Filtry mají funkce jako filtrace UV světla, dělení světla na RGB složky, nebo zabraňování vzniku optických artefaktů. Za matnicí (4) se nachází další zaostřovací čočky (3). Obraz by v tuto chvíli byl otočen nohama vzhůru. To řeší optický pětiboký hranol (2) umístěný v hledáčku (1). [1], [8]

2.3 Osvit

Osvit je matematickým vztahem udávající množství světla, které dopadne na rovinu citlivou na světlo. U klasických fotoaparátů jím byl film, u fotoaparátů digitálních je touto rovinou obrazový senzor. Osvit je definován jako: [9]

$$H = E \cdot t [lx \cdot s], \quad (2.1)$$

kde E je osvětlení senzoru a t je čas.

2.4 Expozice

Expozice je fotografický pojem, kterým označujeme proces vystavení citlivé vrstvy dopadajícímu světlu. Expoziční stupeň v obraze je kombinací clonového čísla a osvitové doby. Tuto kombinaci můžeme vyjádřit různými ekvivalentními kombinacemi clonového čísla a osvitové doby, pomocí osvitového čísla značeného jako EV (Exposure Value).

Hodnota EV měří absolutní množství světla na fotografované scéně. Vyjádřit lze pomocí logaritmické stupnice jako: [9], [10]

$$EV = \log_2 \frac{F^2}{t}, \quad (2.2)$$

kde F je clonové číslo a t je osvitová doba.

2.4.1 Osvitová doba

Osvitová doba, nebo také expoziční čas, udává dobu, po kterou dopadá světlo na senzor. Hodnoty osvitové doby jsou geometrickou posloupností, kde změna hodnoty o jeden osvitový čas zapříčiní snížení nebo zvýšení osvitů na dvojnásobek neboli o jednu hodnotu EV.

Další používaný pojem je **rychlost závěrky**. Ten vychází z toho, že závěrka je mechanická a musí urazit určitou dráhu, aby světlo mohlo pronikat skrz.

Pro velmi krátké časy se používají elektronické závěrky, protože mechanické nejsou takto malých časů schopné. **Elektronická závěrka** udává senzoru dobu, po jakou má sbírat náboj vytvořený dopadajícím světlem. I přes to, že reálná doba vystavení senzoru světlu může být delší. [1], [11]

2.4.2 Clona

Pomocí clony lze řídit množství světla procházející skrz objektiv. Clona je součástí objektivu a je tvořena kovovými lamely, které jsou uspořádány do kruhového tvaru a lze jimi měnit průměr otvoru. Světlo procházející skrz clonu je úměrné ploše tohoto otvoru. Dopadající světlo na senzor je závislé i na **ohniskové vzdálenosti objektivu**. Ohnisková vzdálenost je definována jako vzdálenost hlavní optické soustavy a ohniskové roviny.

Z tohoto důvodu se zavádí pojem **clonové číslo F** , které lze vypočítat jako:

$$F = \frac{f [mm]}{D [mm]}, \quad (2.3)$$

kde f je ohnisková vzdálenost a D je průměr clony.

Clonová čísla zajistí stejné množství světla pro sensor při různých ohniskových vzdálenostech objektivů. Fotoaparát si dopočítá příslušný průměr potřebné clony. Je stanovena základní **stupnice clonových čísel**, na základě koeficientu $\sqrt{2} \cong 1.4$ (plocha roste s druhou mocninou průměru) tak, aby rozdíl mezi dvěma sousedními clonovými čísly byl dvojnásobný nebo poloviční osvit, přičemž platí vztah:

$$E = f(F). \quad (2.4)$$

Nejmenší clonové číslo, které lze nastavit na daném objektivu, se nazývá **světelnost objektivu** a patří mezi jeho základní parametry. Clona také ovlivňuje parametr, který se nazývá hloubka ostrosti. Bližší informace o hloubce ostrosti a ostření v kapitole **1.7 ostření**. [1], [9], [12]–[14]

2.4.3 ISO

ISO udává citlivost senzoru na dopadající světlo. Citlivost každého senzoru je odlišná a samotnou citlivost nelze měnit. Parametr, který změnit lze, je velikost zesílení signálu. ISO tedy normuje citlivost senzoru v tzv. ISO jednotkách, kterou lze počítat jako:

$$ISO = \text{citlivost senzoru} + \text{zesílení signálu}. \quad (2.5)$$

Stupnice hodnot ISO je definována obdobně jako u expozičního času a clony. Změna jedné hodnoty ISO citlivosti znamená dvojnásobné snížení nebo zvýšení potřeby světla pro zachování stejné hodnoty EV. Vyšší hodnoty ISO zanášejí do snímku obrazový šum, který se projevuje jako náhodně barevné body, také degraduje hrany (rozostří fotografie). Pro kvalitu snímku je důležitější poměr SNR než absolutní hodnota šumu. SNR je definováno jako: [1], [15]

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{signálu}}}{P_{\text{šumu}}} \right) [dB]. \quad (2.6)$$

2.5 Obrazový senzor

Senzor je součástí zaznamenávající obraz procházející skrz objektiv, funguje na principu fotoelektrického jevu. Dnes se využívají především technologie CCD a CMOS.

Senzor je osazen polovodiči citlivými na světlo. Po dopadu fotonu na atom polovodiče je elektronům předána energie. Tyto elektrony jsou vybuzeny do vyšší energetické hladiny a mohou se volně pohybovat. Počet vybuzených elektronů je úměrný intenzitě dopadajícího světla. Jejich shromážděním a změřením získáme informace o dopadajícím světle. Každý polovodičový čip tvoří jeden jasový bod fotografie, tzv. **pixel**. Získaný náboj je zesílen a převeden AD převodníkem. [1], [16]

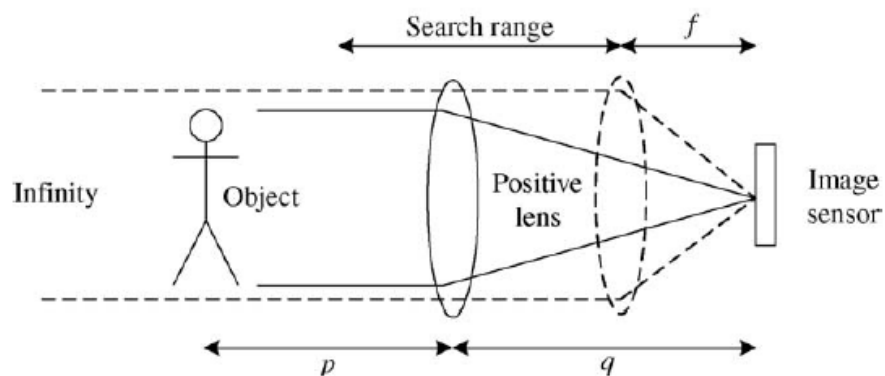
Princip činnosti CCD a CMOS je stejný. Tyto technologie se liší pouze způsobem výroby a shromažďováním náboje z každého pixelu. U technologie CCD (charge-coupled device) náboj přetéká mezi buňkami, které jsou provázané (posuvný registr). Náboj čteme na okraji snímače. Díky tomu je potřeba pouze jeden obrazový zesilovač. Sensory CCD poskytují kvalitní obraz s nízkým šumem, jsou však energeticky náročné a drahé na výrobu. CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) využívá komplementární

tranzistory ve vyhodnocovacích obvodech umístěných v každé buňce. Každá buňka tedy může být čtena individuálně. Čtecí obvody však zabírají místo ploše citlivé na světlo. Citlivost CMOS snímačů je díky tomu nižší. Mezi velkou výhodou však patří nízká energetická spotřeba a možnost integrace. [16]–[18]

2.6 Objektiv

Objektiv je optická část fotoaparátu, která obsahuje soustavu čoček. Ty zaostřují paprsky světla odražené od fotografovaných objektů, procházející skrz objektiv, na rovinu senzoru. [19]

2.6.1 Zobrazovací rovnice objektivu



Obrázek 2: Princip zobrazení objektivem [21]

Zobrazovací rovnice pro ideální objektiv platí ve tvaru:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}, \quad (2.7)$$

kde f je ohnisková vzdálenost, která je dána při výrobě objektivu podle jeho parametrů. Vzdálenost mezi čočkou a fotografovaným předmětem je p a q je vzdálenost od čočky k rovině, na níž jsou paprsky zaostřovány, tedy na obrazový senzor. [20]

2.6.2 Vlastnosti objektivu

Rozptylová funkce (PSF)

Objektiv je zobrazovací soustavou v prostoru. Pro tuto soustavu musí být definována její odezvu na bodový světelný zdroj, nazývaná jako PSF (*Point Spread Function*). Protože světelný bod se zobrazovací soustavou nezobrazí na nekonečně malý bod, ale světelné vlny se sbíhají a zasahují do ohniska. Tím vlny vytvářejí difrakční obraz soustředěných kruhů kolem centrálního bodu. [21], [22]



Obrázek 3: Znárodnění bodové rozptylové funkce [23]

Pro popis vstupní budící funkce lze využít dvojrozměrný Diracův impuls $\delta(x, y)$, který přivedeme na vstup soustavy. Lze zapsat vztahem:

$$f(x, y) = \delta(x - m, y - n). \quad (2.8)$$

Mezi obrazem a předmětem optického systému platí vztah:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y), \quad (2.9)$$

kde $g(x, y)$ je výsledné rozložení jasu v rovině obrazu, $f(x, y)$ je rozložení jasu v rovině předmětu a $h(x, y)$ je impulzová odezva.

Pro matematické zjednodušení lze převést tento vztah pomocí Fourierovi transformace na násobení.

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot H(u, v), \quad (2.10)$$

kde $F(u, v)$ je Fourierův obraz vstupní funkce $f(x, y)$, $G(u, v)$ vyjadřuje výstupní spektrum v obrazové rovině a funkce $H(u, v)$ je přenosová funkce, která uvádí vztah mezi předešlými spektry. [22]

Optická přenosová funkce (OTF)

OTF (*Optical Transfer Function*) je definována jako Fourierův obraz impulzní odezvy systému. [22]

$$OTF = FT\{h(x, y)\}. \quad (2.11)$$

Modulační přenosová funkce (MTF)

MTF je jednou z nejlepších metod popisující kvalitu zobrazení optických systémů. Udává schopnost přenášet kontrast v určitém rozlišení od roviny objektu do roviny obrazu.

Optická přenosová funkce je komplexní funkce dvou prostorových kmitočtů značených u, v . Její modul označujeme jako modulační přenosovou funkci MTF (*Modulation Transfer Function*). [22], [23]

$$MTF = |OTF(u, v)|. \quad (2.12)$$

Pro kvantitativní porovnání MTF křivek se často používá prostorová frekvence, která odpovídá poklesu křivky MTF na 50 % původní hodnoty, nazývaná jako MTF₅₀.

Mezi další vlastnosti patří **rozlišovací schopnost objektivu**. Vlivem rozptylu světla v optických členech objektivu a ohybů, ke kterému dochází při průchodu podél okrajů otvorů čoček a clony, výsledný zachycený obraz nemůže nikdy být dokonale ostrý. Tuto omezenou ostrost nazýváme rozlišovací schopností objektivu. Měří se pomocí počtu rozlišitelných čar na 1 mm. Nejlepší rozlišovací schopnost objektivu je mezi maximálním a minimálním clonovým číslem, kde se nejméně projeví ohyb světla a optické vady. [24], [25]

Nejčastější způsob výpočtu rozlišovací schopnosti je podle teoretického kritéria, dle vztahu:

$$\alpha = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (2.13)$$

kde λ je vlnová délka světla, D je průměr otvoru a 1,22 je empirická konstanta.

Spektrální propustnost objektivu je parametr, který udává, jaké světelné spektrum projde skrz objektiv. Optickou soustavu objektivu tvoří různé druhy skla. Každé sklo určitou část světla pohltí nebo odrazí, nikdy neprojde celé světelné spektrum skrz. Podle druhu skla je i rozdílně propouštěno světlo o jiné vlnové délce, takže každé sklo vytvoří jinak barevný obraz. Barevné podání může být teplé, chladné nebo neutrální.

Spektrální propustnost materiálu lze počítat podle vztahu:

$$T(\lambda) = \frac{S_s(\lambda) - D_s(\lambda)}{R_s(\lambda) - D_s(\lambda)} \cdot 100 [\%], \quad (2.14)$$

kde $T(\lambda)$ je spektrální propustnost, $S_s(\lambda)$ je naměřené spektrum, $R_s(\lambda)$ je referenční spektrum a $D_s(\lambda)$ je spektrum při zastínění zdroje (odpovídá šumu při detekci a elektronickém zpracování). [25]–[27]

2.7 Ostření

Zaostřit znamená zvolit správnou rovinu zaostření. Ta určí vzdálenost, ve které se budou předměty zobrazovat ostře. Jakákoliv jiná vzdálenost bude vždy neostrá, avšak vzdálenosti blízko roviny zaostření, není lidské oko schopné vyhodnotit jako neostré. Rovina ostření je kolmá na osu objektivu a rovnoběžná se senzorem. Pokud chceme tuto rovinu měnit, musíme mechanicky pohybovat s optickými členy v objektivu. Pokud je zaostřeno, tak světelný bod ze vzdálenosti, na kterou je ostřeno, se zobrazí na senzor opět jako světelný bod. Hrana se zobrazí jako hrana. Pokud je zaostřeno na jinou vzdálenost, světelný bod se zobrazí jako rozostřený kruh o průměru závislého na vzdálenosti od roviny zaostření. Tento kruh se označuje jako **rozptylový kroužek** se zkratkou CoC (*Circle Of Confusion*). Hrany se zobrazí jako plynulý přechod.

Definice **hloubky ostrosti** zní takto: „*Hloubka ostrosti je povolená odchylka od roviny zaostření, která na fotografii formátu 8x12 palců nebude toto rozostření větší než 0,25 mm.*“ [1]

Tato definice počítá s tím, že standardní rozlišení lidského oka je 0,25 mm. Nutno brát v potaz fakt, že toto je individuální údaj. Hloubka ostrosti tedy udává rozsah vzdáleností od roviny zaostření, které se ještě zdají lidskému oku ostré. Rozptylový kroužek se používá k určení, jak moc musí být bod rozmazán, aby byl vnímán jako neostrý. Pokud CoC lze okem zpozorovat, označí se oblast, ve které se CoC nachází, za oblast mimo hloubku ostrosti. Hloubka ostrosti závisí na velikosti fotografie a vzdálenosti z jaké fotografii pozorujeme. Ovlivníme jí pomocí clony, vzdáleností fotografovaného objektu a ohniskem. [1], [28], [29]

3 Automatické ostření

Dnes již pro nás není funkce automatického ostření (dále AF) nic zvláštního. Jsme zvyklí, že ji vlastní každé zařízení schopné fotografovat. AF jsou vybaveny v podstatě všechny druhy fotoaparátů, kompaktní, DSLR i fotoaparáty v zařízeních jako jsou mobilní telefony a tablety. Speciálně fotoaparáty v těchto zařízeních by bez funkce AF fungovaly jen velice složitě. Stále však můžeme najít fotoaparáty, které funkci AF nemají, což je v dnešní době ojedinělou zvláštností. Základní myšlenkou AF bylo nahradit zdlouhavý proces manuálního ostření. K úrovni, na které je AF dnes, vedlo spoustu let vývoje a zkoušení různých technologických postupů v praxi. Nápomocná byla i rychle se rozvíjející technická úroveň lidstva.

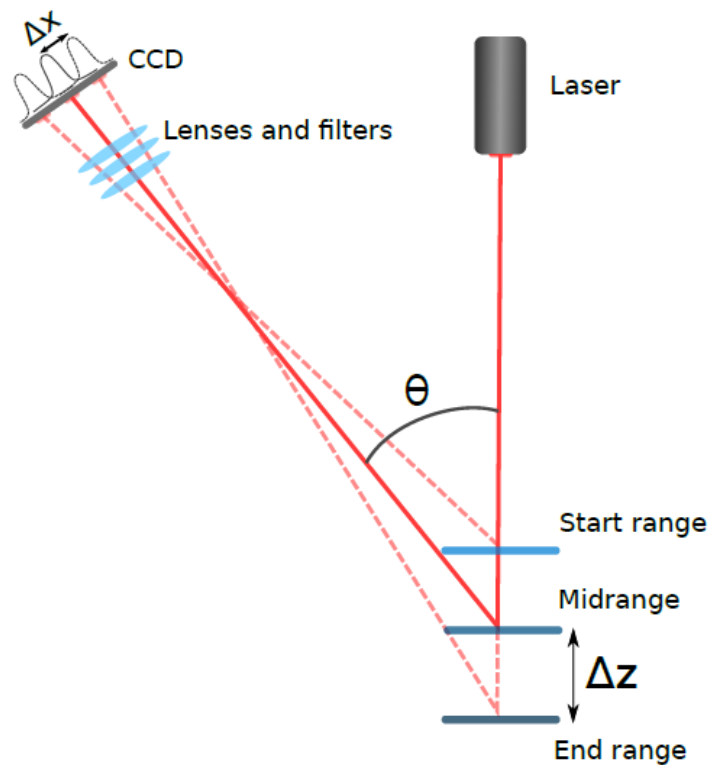
Dřívější fotoaparáty tedy neměly možnost AF a ostření se provádělo výhradně manuálně. Dnes je u řady fotoaparátů, především u DSLR, možnost přepínat mezi AF a ostřením manuálním. To je využito v situacích, kde AF selhává, nebo nesplňuje fotografování záměry. Manuální ostření tedy není zcela zapomenuto a stále je vhodné pro fotografování krajiny, nebo obecně statických objektů. S fotografováním pohybu je to ovšem něco jiného. Ručně zaostřit na pohybující se objekt je prakticky nemožné. Za těchto okolností se AF, který má dnes i možnosti predikce pohybu, zdá nenahraditelný. Dovolí nám zachytit jedinečné momenty, jež trvají tak krátké okamžiky nebo se odehrávají v neustálém pohybu. Nebo pouze usnadní fotografování práci.

3.1 Historie ostření

První patentový spis zabývající se AF byl prodán v roce 1932. Tehdy však tento nápad ještě nebyl realizovatelný. O automatickém ostření začaly firmy přemýšlet jako o skutečně využitelném až v průběhu šedesátých let. Vznikaly různé systémy. Ty však byly příliš složité, a proto se žádný z nich nemohl prosadit. Postupný rozvoj elektroniky umožnil výrobu nejprve aktivních ostřících systémů, které využívaly především kompaktní fotoaparáty. U zrcadlovek byl problém s výměnnými objektivy, představující další komplikaci v systému, proto první zrcadlovky s AF byly bez výměnných objektivů. První zrcadlovka s výměnným objektivem byla od firmy Pentax v roce 1981. Poprvé bylo použito i pasivního ostření s AF senzory umístěnými v těle fotoaparátu. U tohoto modelu byl umístěn motor v objektivu. Od tohoto provedení se pak dočasně upustilo a motory se vkládaly do těla fotoaparátu. První taková zrcadlovka vznikla v roce 1985. Byla snaha o použití aktivního AF v DSLR, kde by byly senzory i ostřící motor umístěny v objektivu. Toto uspořádání se neosvědčilo a bylo od něj upuštěno. Obrovský průlom byl v roce 1987, kdy přišel Canon se systémem EOS. Ten měl AF senzory zabudované v těle a ostřící motory a clonu v objektivu. Vzájemná komunikace probíhala pomocí elektrických kontaktů. Díky umístění motoru blíže čočkám, mohly být vznikající motory mnohem efektivnější a tišší. Všechny pozdější zrcadlovky s výměnnými objektivy fungují na stejném principu, jaký vymyslela firma Canon. Další změna v DSLR byla až v roce 2007, kdy zrcadlovky začaly používat detekci kontrastu v režimu živého náhledu. V tomto programu se při fotografování nemusíme dívat do hledáčku, ale vidíme scénu na LCD display fotoaparátu. [30], [31]

3.2 Aktivní ostření

Aktivní ostření je založeno na aktivních prvcích, které vysílají signál. Vysílaným signálem může být ultrazvukový signál nebo infračervené světlo. U obou metod využíváme odrazu vysílaného signálu od předmětu, na který ostříme, a jeho dopadu zpět. U ultrazvuku vzdálenost vypočítáme z doby od vyslání signálu, do jeho dopadu zpět na snímač při známé rychlosti ultrazvukové vlny. Pro infračervené světlo se vzdálenost vyhodnotí pomocí úhlu, pod kterým se signál vrací. Pokud máme vypočítanou vzdálenost, ve které se ostřený objekt nachází, objektiv je pomocí ostřících motorů nastaven do správné polohy.



Obrázek 4: Princip aktivního ostření s využitím infračerveného světla [33]

Rozdíl ve vzdálenosti předmětu Δz se potom počítá podle vzorce:

$$\Delta z = \frac{\Delta x}{\tan \theta}, \quad (3.1)$$

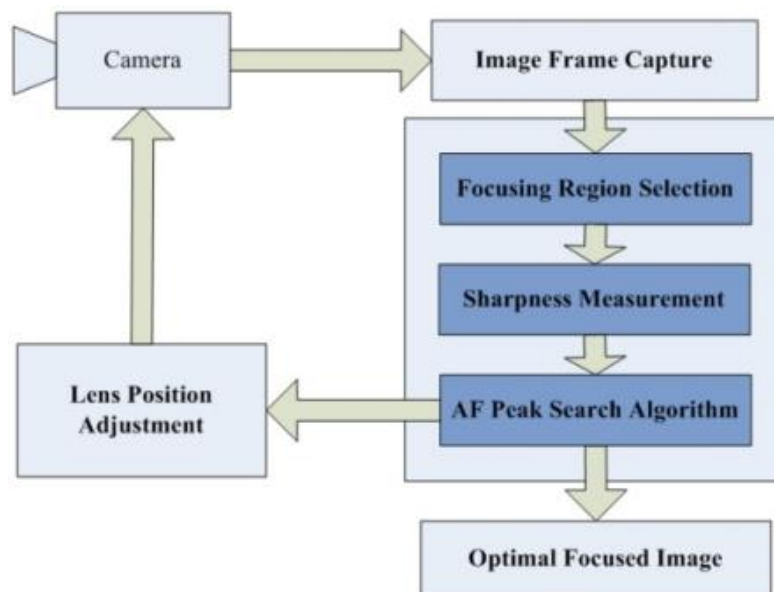
kde Δx je rozdíl ve vzdálenosti, kde signál dopadne na přijímač a θ je úhel, pod kterým dopadne.

Tato metoda je schopná pracovat i za špatných světelných podmínek, ale pouze pro nepohybující se předměty. Pracuje jen na omezenou vzdálenost odpovídající délce okolo 6 metrů. Další nevýhody jsou, že nedokáže zaostřit skrz sklo nebo jiné předměty v popředí. Přijímač také může být ovlivněn jiným zdrojem používaného signálu. Systém aktivního ostření nelze umístit za objektiv DSLR, to by značně omezilo přesnost. Proto se v DSLR používá pouze jako doplňkový systém, a to ojedinele. Je také potřeba myslet na to, že přidáním aktivních prvků do kamery, se zvýší její cena, velikost a také spotřeba baterie. [20], [32], [33]

3.3 Pasivní ostření

Pasivní ostření funguje i bez aktivních prvků. Jedná se o ostření skrz objektiv se zkratkou TTL (*Through The Lens*), při kterém ostřící senzor pro svou činnost potřebuje dostatek světla. DSLR používají metodu zvanou detekce kontrastu. Dostatek světla na ostřící senzor je zajištěn následovně. První zrcátko DSLR je polopropustné a propouští skrz přibližně 30 % světla. Propuštěné světlo dopadne na druhé zrcátko, ze kterého se odrazí na ostřící senzor. Tím senzor dostane náhled snímku s aktuální polohou objektivu. Kompaktní fotoaparáty používají detekci kontrastu. Jelikož nemají zrcátka, můžeme použít pro vyhodnocení ostrosti hlavní obrazový senzor, na který dopadá světlo i ve chvíli, kdy neexponujeme. Detekci kontrastu využívají také některé fotoaparáty v zařízeních jako jsou mobilní telefony a tablety. V DSRL je metoda detekce kontrastu použitelná jen v případě, kdy je zvednuté zrcátko, tedy pouze v režimu živého náhledu.

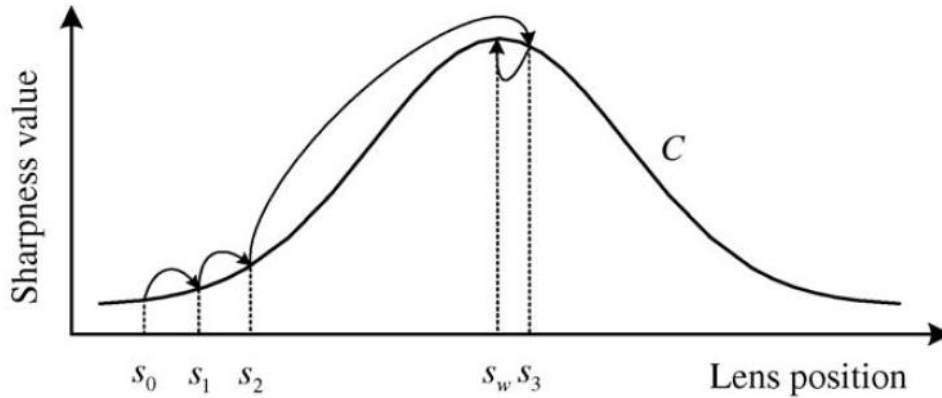
Obecný pasivní ostřící systém má tři hlavní části, jak zpracovat náhled obrazu. První je výběr oblasti zaostření. Tento proces určí, jaká část obrazu má být vyhodnocována na ostrost. Následně probíhá vyhodnocení ostrosti vybrané části a jsou vypočítány vhodné polohy objektivu. Poslední hlavní částí je algoritmus pro hledání nejlepší polohy. S jeho použitím dosáhneme maximální ostrosti z vypočítaných vhodných poloh. [30], [34]



Obrázek 5: Obecný princip pasivního ostření [35]

3.3.1 Detekce kontrastu

První z metod pasivního ostření je detekce kontrastu. Tato metoda využívá závislosti **kontrastu** a ostrosti obrazu. Pokud je obraz ostrý, kontrast obrazu je veliký. Obrazový senzor vyhodnocuje zvolenou část obrazu na kontrast. Místo, na které chceme ostřit, můžeme volit libovolně, dokonce i v rozích fotoaparátu. Také lze nastavit velikost tohoto místa. Pokud zpola zmáčkne spoušť, fotoaparát zkusí posunout objektiv dopředu nebo dozadu. Při této změně vyhodnocuje kontrast. Pokud se zmenší, začne posouvat objektiv opačným směrem. Pokud se kontrast zvětší, bude objektiv posouvám tímto směrem, dokud kontrast neklesne. Potom se vrátí na hodnotu, kde byl kontrast obrazu vyhodnocen jako největší, a obraz byl nejlépe zaostřen.



Obrázek 6: Závislost velikosti kontrastu na pozici objektivu [21]

Detekci kontrastu získáme kvalitně zaostřený obraz, a to především pro statické objekty. Posouvání objektivu ve snaze najít nejlepší pozici může zdržovat. Pokud se fotografovaný objekt pohybuje a objektiv se snaží o průběžné ostření, bude se neustále přeostrřovat ve snaze najít nejlepší pozici. Detekce kontrastu ke své funkci potřebuje, v obraze byly detekovatelné hrany.

I přes to, že ke své práci potřebuje dostatek světla, v porovnání s fázovou detekcí ho stále potřebuje méně. [20], [33], [35]

Algoritmy pro zpracování

Funkce měření ostrosti je kvantitativní popis obrazové ostrosti v matematickém vyjádření. Toto číselné měřítko poskytuje hodnotu, která určuje stupeň zaostření v obraze. Díky závislosti ostrosti a kontrastu obrazu můžeme použít měření kontrastu jako funkci ostrosti. Pro vyhodnocení kontrastu se používají různé algoritmy. V 1D by se využil lokální gradient hodnot pixelů. Pro 2D vyhodnocení se často používá *konvoluční masky* a dobrých výsledků dosahuje i *diskrétní vlnková transformace* (DWT). [32], [34]

Konvoluční masky

Metoda je založena na diskrétní konvoluci s jádrem h . Operaci konvoluce pro 2D obraz lze psát podle vztahu:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) = \sum_{i=-S/2}^{S/2} \sum_{j=-R/2}^{R/2} f(x-i, y-j) \cdot h(i, j), \quad (3.2)$$

Kde $g(x, y)$ je výstupní obraz, $f(x, y)$ vstupní obraz a $h(x, y)$ konvoluční jádro o rozměrech $R \times S$.

Pro získání lokálního kontrastu se často používá jádro Laplaceovy matice.

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

Tabulka 1: Jádro Laplaceovy matice

Konvoluční maska lze použít také k vyhlazení zašuměného obrazu nebo k zaostření pomocí zvýraznění hran. Záleží na typu konvoluční masky, který je použít. [36], [37]

Diskrétní vlnková transformace (DWT)

DWT má mnoho společného s rychlou Fourierovou transformací (FFT). Obě tyto transformace jsou lineární operace generující soubor dat koeficientů. Ty dávají soubor funkcí, které mohou obnovit původní signál. Na rozdíl od FFT, kde může být obnovena pouze frekvence, má DWT tu výhodu, že uchová informace jak o frekvenci, tak o prostoru. Tyto informace se uchovávají díky tomu, že vlnky jsou lokalizovány v prostoru, sinové funkce ne. Pro FFT je dána šířka okna, která se používá pro zkrácení různých frekvencí základní funkce. V případě DWT se šířka okna bude lišit. Při použití vysokofrekvenčních vlnek, obdržíme informace o nespojitosti signálu a jeho délce. Při použití nízkofrekvenčních vlnek dostaneme nižší frekvenční spektrum.

Pro jednodimenzionální diskretní signál x je DWT definována jako:

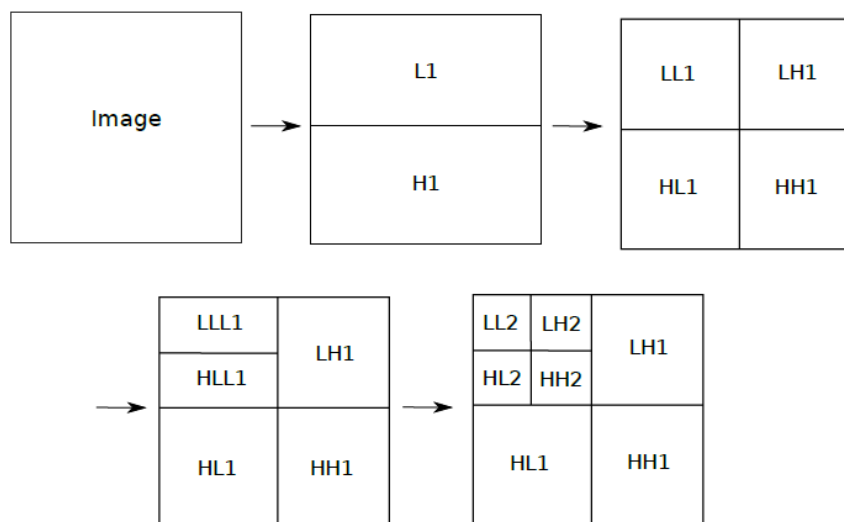
$$a_1(n) = \sum_{k=-N}^N \alpha_k x_s(n+k), \quad (3.3)$$

$$d_1(n) = \sum_{k=-M}^M \beta_k x_l(n+k), \quad (3.4)$$

kde x_s a x_l jsou liché a sudé body jejichž délka, je poloviční než délka x . Dále α_k a β_k jsou vlnkové koeficienty, s N a M vlnkovými koeficienty, které se vzájemně zrcadlí kolem $k=0$.

Koeficienty závisí na použité vlnce. $a_1(n)$ nazýváme aproximační koeficienty, ty popisují nízkofrekvenční informaci v signálu. $d_1(n)$ se nazývají koeficienty detailu a ty popisují vyšší frekvenční složky signálu. Často se tyto koeficienty označují L (nízkofrekvenční) a H (vysokofrekvenční).

Pokud chceme provést DWT ve 2D, musíme nejprve použít 1D DWT na každý řádek v obraze. Pro každý řádek dostaneme dva výstupy, koeficienty L a H. Pro každý řádek se provádí 1D DWT i na sloupec, ale pro L a H koeficienty odděleně. Dostaneme čtyři odlišné skupiny dat LL1, LH1, HL1 a HH1. Společně tvoří první úroveň 2D DWT. Tento proces se může opakovat za účelem vyšších úrovní.



Obrázek 7: Proces 2D DWT pro dvě úrovně [32]

S použitím vysokofrekvenčních dat lze napsat algoritmus

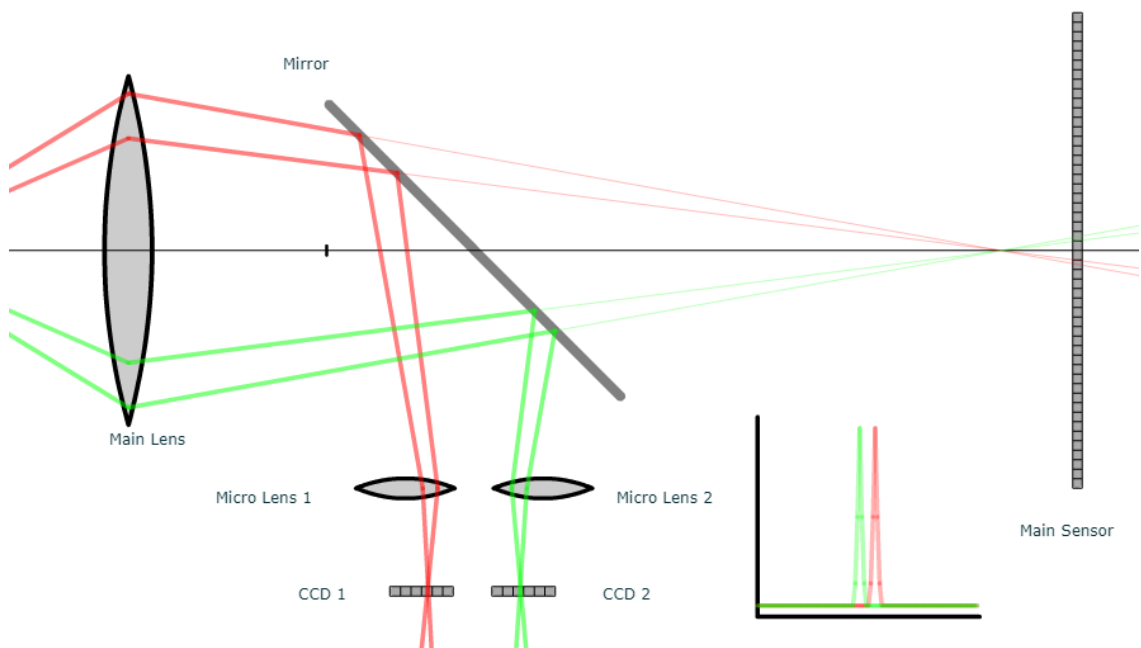
$$M_{DWT} = \frac{\|h_w(f)\|^2}{\|f\|^2 - \|h_w(f)\|^2}, \quad (3.5)$$

kde závorky $\|\cdot\|$ označují eukleidovskou normu, f jsou obrazová data a $h_w(f)$ jsou vysokofrekvenční data získané z DWT.

Tento algoritmus pracuje s informací o frekvenci a jeho hodnota roste společně se zlepšující se ostrotí obrazu. DWT vyšší úrovně může být použita, pokud zahrneme všechny výsledky vysokofrekvenčních dat. Dvouúrovňová DWT se zdá být dobrým kompromisem mezi rychlostí a kvalitou pro ostřicí systémy. [32]

3.3.2 Fázová detekce

Metoda fázové detekce funguje podobně jako lidské vnímání prostoru. Pomocí obrazu ze dvou míst se vyhodnocuje vzdálenost vzájemným fázovým posuvem. AF sensor obsahuje dvojici malých obrazových sensorů, nad každým z nich je umístěna mikro-čočka. Každý pár těchto sensorů tvoří ve fotoaparátu jeden **ostřicí bod**. Z této dvojice sensorů snímá každý opačnou stranu plochy zrcátka a zobrazuje, jak na něj světlo dopadlo. Obraz z dvojice je porovnáván, a jakmile je znám rozdíl ve fázi, systém přesně dopočítá polohu nastavení objektivu, v níž bude tento rozdíl vynulován. Není zapotřebí provádět druhé měření nebo hledat lepší pozici čímž se urychlí celý proces ostření.



Obrázek 8: Princip fázové detekce [37]

Metoda fázové detekce je velmi rychlá. Na druhou stranu je složité tento systém seřídít. Při špatné kalibraci bude fotoaparát ostřit špatně, aniž by o tom věděl. Fázová detekce je vhodná i pro pohybující se předměty, protože stihá pohyb sledovat a průběžně přeastřovat. Mírnou nevýhodou je, že nemůžeme ostřit na libovolný bod. Jsme omezeni pouze na ostřicí body, které fotoaparát má. Díky implementaci sensorů na jeden čip, můžeme mít těchto bodů v moderních DSLR až desítky. [33], [38]

Ostřící body

Ostřící body jsou prázdné čtverečky nebo kroužky, které vidíme, pokud pozorujeme scénu skrz hledáček fotoaparátu. Jsou součástí AF fázové detekce, kde každý z těchto bodů může senzor AF použít k zaostření. Pro ostření je klíčové, aby obraz obsahoval hrany, kolmé na rovinu ostřícího bodu. Máme dva typy ostřících bodů, *vertikální* a *křížové*. Vertikální senzor je pouze jednodimenzionální, proto je schopný snímat kontrast pouze v jedné rovině. Křížový ostřící bod je dvoudimenzionální, a proto má přesnější výsledky. Lepší DSLR mohou mít senzory vylepšené i pro detekci šikmých hran, kde je křížový ostřící bod ještě doplněn dalším křížem pootočeným o 45°. Zde výrobci oddělují DSLR pro běžné použití, které mají několik jednoduchých ostřících bodů, od DSLR profesionálních, které obsahují komplexní a nastavitelný AF systém s mnoha ostřícími body. Vyšší počet ostřících bodů nám umožní lépe zakomponovat snímek a zaostřit na určitou oblast. Tyto body také využíváme pro sledování pohybujících se objektů. [39], [40]

Algoritmy pro zpracování

Jednodimenzionální obrazy dopadají na ostřící senzory, snímky jsou zachyceny jako levé a pravé pixely. Ty jsou zaznamenány a čteny pomocí čipu. Dále se zpracují malým vestavěným procesorem, pomocí kterého vyhodnotíme posunutí jednoho obrazu vůči druhému. Tento posun lze vyhodnotit konvolucí scény a *rozptylové funkce* pravé a levé strany. Pro obecný jednodimenzionální obraz můžeme psát

$$l(x) = s(x) * h_L(x), \quad (3.6)$$

$$r(x) = s(x) * h_R(x), \quad (3.7)$$

kde x označuje umístění pixelu, s označuje scénu, l a r označují levou a pravou stranu obrazu, h_L a h_R jsou rozptylové funkce levá a pravé strany.

Pokud bychom chtěli počítat konvoluci pro signál, který je 2D. Považujeme každý sloupec a každý řádek za jednodimenzionální a zpracováváme je odděleně. Ve chvíli, kdy je fázový rozdíl mezi signály známý, se pomocí něj dopočte vzdálenost, na kterou se má objektiv nastavit. [38], [41], [42]

Ostřící režimy

Dnešní moderní DSLR jsou vybaveny několika AF režimy pro různé situace. Pro focení statické scény nám stačí zaostřit pouze jednou a zmáčknout spoušť. Pokud se focený objekt pohne, potřebujeme přeostřit na jeho novou polohu. Můžeme také mít objekt pohybující se nepřetržitě. V tom případě potřebujeme fotoaparát ostřící nepřetržitě.

První režim je *jednorázové ostření* (single area, one shot), který je velmi přímým způsobem ostření. Funguje na principu zaměření, namáčknutí a uzamknutí. Přes vybraný ostřící bod bude snímán kontrast scény. Pokud zmáčkneme spoušť na polovinu, snímek se zaostří. Toto zaostření se nezmění, ani kdyby se fotografovaný objekt začal pohybovat. Pohyb pomalý, nebo s konstantní vzdáleností mezi fotografovaným objektem a fotoaparátem, není problém fotografovat v režimu jednorázového ostření. Pokud nastane situace, kdy nejsme schopni zaostřit, fotoaparát nás nenechá exponovat.

Druhým režimem je *kontinuální ostření* (continuous, al servo) používaný pro sledování objektu. Tento režim pracuje na analýze pohybu objektu a následné predikci místa, kde se objekt bude nacházet. Na toto místo se ostří. Přeostření proběhne automaticky při každém pohybu fotografovaného objektu. To je obrovskou výhodou při fotografování rychlého nebo přetrvávajícího

pohybu. Na rozdíl od jednorázového ostření, snímek lze vzít kdykoliv, bez ohledu na správnost zaostření.

Dále existuje režim, který je hybridem mezi předešlými dvěma režimy, označovaný zkratkou AF-A. Fotoaparát snímá, zda se objekt pohybuje nebo je statický a dle této informace, automaticky přepíná mezi režimem jednorázovým a kontinuálním. Tento režim však nemá vždy spolehlivé výsledky. [1], [33]

3.4 Hybridní ostření

Vznikají také hybridní systémy ostření, které jsou kombinací detekce kontrastu a fázové detekce. Buňky pro fázové ostření jsou integrovány přímo na obrazový senzor mezi ostatní buňky citlivé na světlo. Tento systém urychlí ostření, protože fázová detekce nastaví objektiv do pozice, kde už je obraz skoro ostrý a detekce kontrastu doostří do detailu. To zvýší rychlost AF a obraz je kvalitně zaostřen. Především pro točení videa je to velký přínos, kde hledání správné pozice pomocí detekce kontrastu, nevypadá dobře. Je to však pouze kompromis, buňky fázového ostření jsou malé a není jich tolik jako u DSLR. Zároveň zabírají místo barevným pixelům, a proto se výsledný obraz dopočítává. Rychlostí se stále nevyrovná ostření metodou fázové detekce na samostatném čipu. Hybridní ostřicí systémy můžeme nalézt na některých současných kompaktních fotoaparátech, které nemají zrcátka, ale mohou mít vyměnitelné objektivy. [39], [43]

3.5 Ostřicí motory

Ostřicí motory jsou neodmyslitelnou součástí AF. Dnes už jsou všechny motory konstruovány tak, aby bylo možné je umístit přímo do objektivů. V objektivu pohybují celým tělem a mění vzdálenosti optických elementů. Umístění do objektivů způsobilo, že mohou pracovat rychleji a tišeji, než dokud se nalézaly v tělech fotoaparátů. Mezi nároky na motory řadíme rychlost ostření a možnost přesného zaostření neboli posouvat optické elementy pouze o malé vzdálenosti. Přestože hlasitost motoru nemá význam na kvalitu fotografie, při natáčení videa je poměrně klíčová. Proto je také jedním z nároků na kvalitní ostřicí motor. Ostřicí motor do značné míry ovlivňuje rychlost AF. Problém s pomalými motory, vzniká především v teleobjektivech, ve kterých jsou posuvné vzdálenosti ostřících elementů podstatně delší. Nejpoužívanější typy motorů jsou AFD, ultrazvukové (USM) a krokové (STM). [44]

AFD motory

AFD motory z anglické zkratky *Arc Form Drive* jsou původní motory, které byly používány s vynalezením systému EOS. Tento pohon se skládá ze série malých elektrických motorů umístěných do obloukového prostoru vedle čoček. Pomocí ozubených koleček přenáší pohyb do těla objektivu. Motory jsou pomalé a dokáží být poměrně hlasité, na druhou stranu výroba a implementace je snadná a díky tomu také levná. Další nevýhodou AFD

motorů je, že neumožňují přepínání mezi automatickým a manuálním ostřením. Pokud bychom se pokusili doostřit manuálně, mohlo by dojít k mechanickému poškození motoru. Dnes už se objektivy s tímto typem motoru nevyrábí, byly jím vybaveny pouze starší nebo levnější typy.

Motory podobné kvality jsou i mikromotory (MM nebo DC). Jedná se o starší modely, ve kterých motor hýbe objektivem pomocí ozubené soustavy. Jsou pomalé a hlučné. [45], [46]

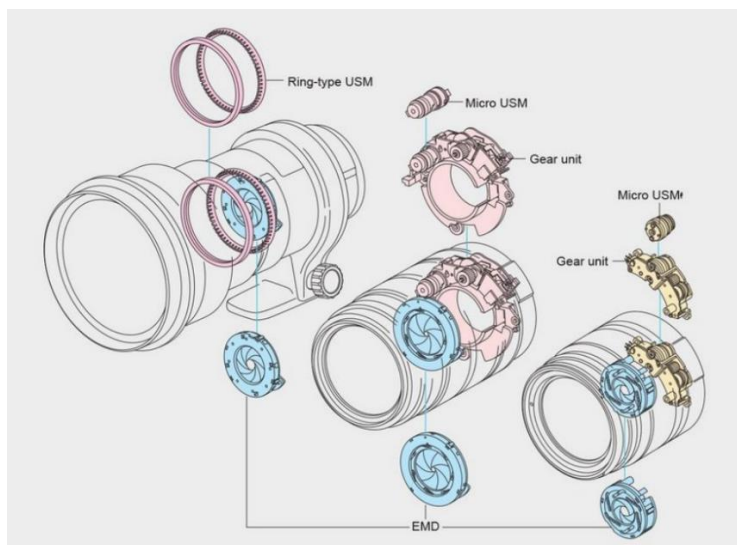
Ultrazvukové motory USM

USM (*Ultrasonic Motor*) je nejpoužívanějším typem ostřicího motoru. Motory převádějí ultrazvukovou vibrační energii o frekvenci kolem 30 kHz, s využitím piezoelektrické keramiky, na rotační sílu. Jsou to nejrychlejší ostřicí motory a vzhledem k výkonu také tiché, i když ne tak tiché jako motory krokové. Umožňuje také přesné zaostření s možností doostřit manuálně bez přepínání na manuální režim, protože pokud systém není v činnosti, kruhy zajišťující pohyb motoru nejsou mechanicky spojeny. Výrobce rozlišuje několik typů ultrazvukových motorů.

Kroužkový motor USM je nejrozšířenějším z typů USM. Mechanismus je tvořen ze dvou ozubených kruhů, rotoru a statoru umístěných kolem celého obvodu tubusu objektivu. Jsou tedy poměrně velké. Stator je z pružné piezoelektrické keramiky. Při vibracích dojde k otáčení rotoru. Je velice výkonný, rychlý a je vhodný i pro teleobjektivy. Jeho pořizovací cena je vyšší.

Mikromotor USM je navržen tak, aby se vešel do široké škály objektivů bez ohledu na šířku jejich tubusu. Stator, motor i hnací převod je spojeny do jednotky, která je přibližně o polovinu lehčí než kroužkový motor. Je také levnější variantou.

Nanomotor USM se snaží kombinovat rychlost kroužkového motoru s téměř srovnatelnou hlasitostí a plynulostí krokového motoru. Proto se stejně jako krokový motor hodí především pro natáčení videa. Uvnitř jednotky se nachází pružné kovové tělo, keramický prvek a pohonná jednotka. Přivedením napětí na keramiku je řízena rychlost, kterou je otáčena pohonná jednotka. Výsledkem je plynulé zaostřování s velice jemným krokem ostření. [44], [45]



Obrázek 9: Přehled motorů USM [43]

Krokový motor (STM)

Krokový motor převádí elektronické impulzy do mechanického otáčení. Každá otočka je rozdělena do spousty malých kroků. Každý pulz posune motor a jeden krok. Motor má dlouhou životnost, je spolehlivý a relativně levný. Jsou navrženy tak, aby byly velmi tiché, reagují poměrně rychle, jsou jen o něco pomalejší než ultrasonické, a jejich pohyb je plynulý. Pro tyto vlastnosti je motor velice dobrý pro natáčení videa. [44], [47]

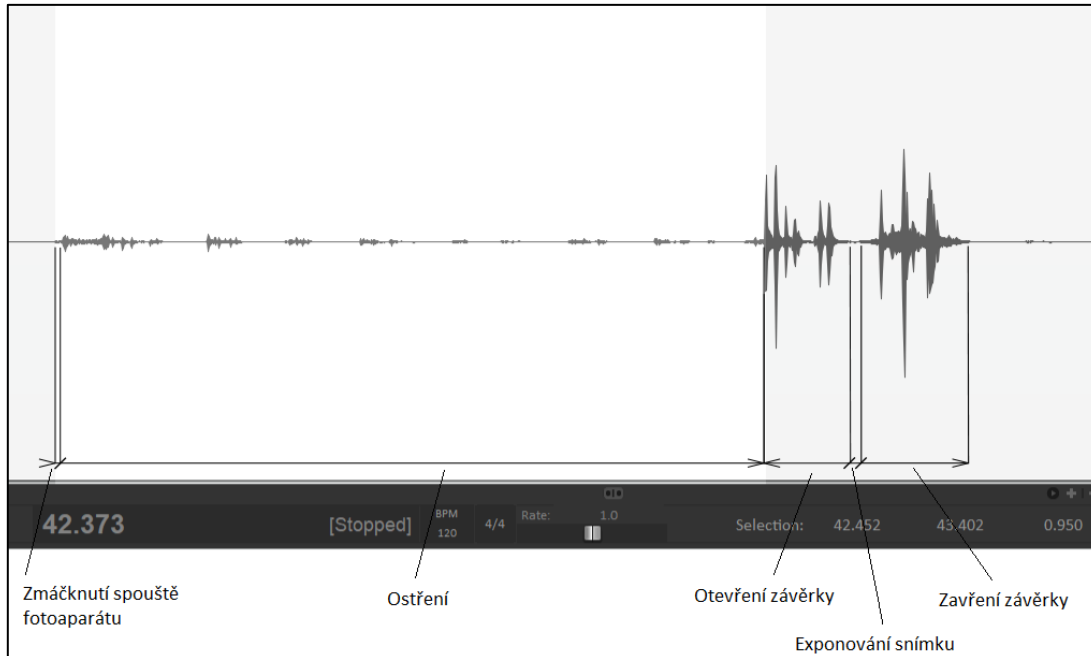
4 Testování kvality AF

Nejdůležitějšími parametry pro ostřicí systém jsou rychlost a přesnost zaostření. Proto mé měření probíhá ve dvou hlavních částech. V první je měřena rychlost zaostření testovaných fotoaparátů v rozdílných světelných podmínkách. V druhé části jsou pořízené snímky vyhodnoceny pomocí funkce MTF. Vytvořil jsem několik křivek MTF. Závislost MTF na průběhu manuálního ostření. Dále jsou porovnány fotoaparáty při nejvyšším jasu scény 3210 lx. Pro jeden z měřených fotoaparátů jsou vyneseny i křivky MTF v závislosti na osvětlení scény a opakovaném ostření.

4.1 Navržení metody pro testování rychlosti

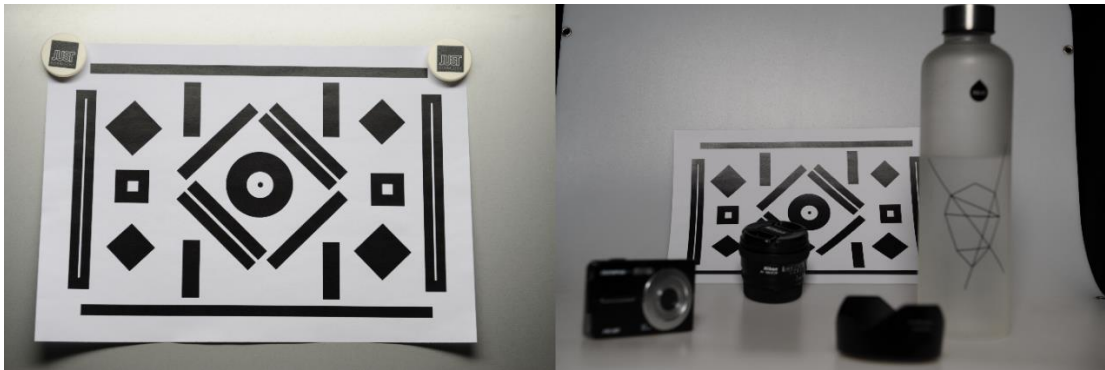
Doba, která by vypovídala pouze o rychlosti AF, je doba od zmáčknutí spouště do zaostření snímku. Tuto dobu by bylo obtížné detekovat, proto do měření bylo ještě zahrnuto tzv. zpoždění zaostření snímku. Toto zpoždění definuje dobu, za kterou je fotoaparát schopen začít exponovat zaostřený snímek. Změřena je tedy rychlost od zmáčknutí spouště do začátku exponování snímku. Tato rychlost je pro koncové uživatele fotoaparátu podstatnější. Doba ostření je také značně ovlivněna typem ostřicího motoru, kterým je objektiv vybaven.

Měření bylo vyhodnoceno pomocí zvukové nahrávky při zaostřování fotoaparátu. Na následujícím obrázku jsou popsány jednotlivé části zvukové stopy. Zpracování bylo provedeno ve zkušební verzi programu Reaper, který umožnil určit dobu ostření s přesností na tisícinny sekundy.



Obrázek 10: Ukázka zvukové stopy při ostření v programu Reaper

V programu Inkspace byl vytvořen vlastní testovací obraz, na který bylo ostřeno v první fázi fotografování. Pro další měření byla ve studiu vytvořena umělá scéna, osvětlená světlem typu LED. Umělá scéna se skládala z několika předmětů umístěných v různých vzdálenostech a za tyto předměty byl postaven testovací obrazec, na který bylo ostřeno.



Obrázek 11: Ukázka fotografovaných scén

4.2 Měření rychlosti AF

Měření rychlosti AF probíhalo v audiovizuálním studiu na fakultě elektrotechnické. Měřený fotoaparát byl postaven na stativ před testovací obrazec, na který se ostřílo. Všechny fotoaparáty byly nastaveny na stejné hodnoty clonového čísla, osvitové doby a zesílení ISO. Clonové číslo bylo voleno nejmenší možné, které umožňovaly méně kvalitní objektivy. Malé clonové číslo znamená malou hloubku ostrosti. Během měření byly měněny světelné podmínky ovlivňující rychlost AF. Úroveň osvětlení byla změřena pomocí digitálního luxmetru DX-100 INS. Fotografováno bylo v módu jednorázového ostření, což znamená, že fotografie je pořízena až poté, co fotoaparát vyhodnotí správnost zaostření. Přeostrěno bylo vždy na nekonečno a byla měřena doba, než se najde správná poloha objektivu. Měření bylo provedeno pět krát na všech hodnotách osvětlení, aby se mohl udělat průměr výsledného času.

4.3 Výsledky měření rychlosti

Zde jsou tabulky naměřených hodnot, které obsahují rychlosti AF měřených fotoaparátů v závislosti na osvětlení scény. Podrobné informace o technických parametrech měřených fotoaparátů jsou v příloze **1 Měřené fotoaparáty**.

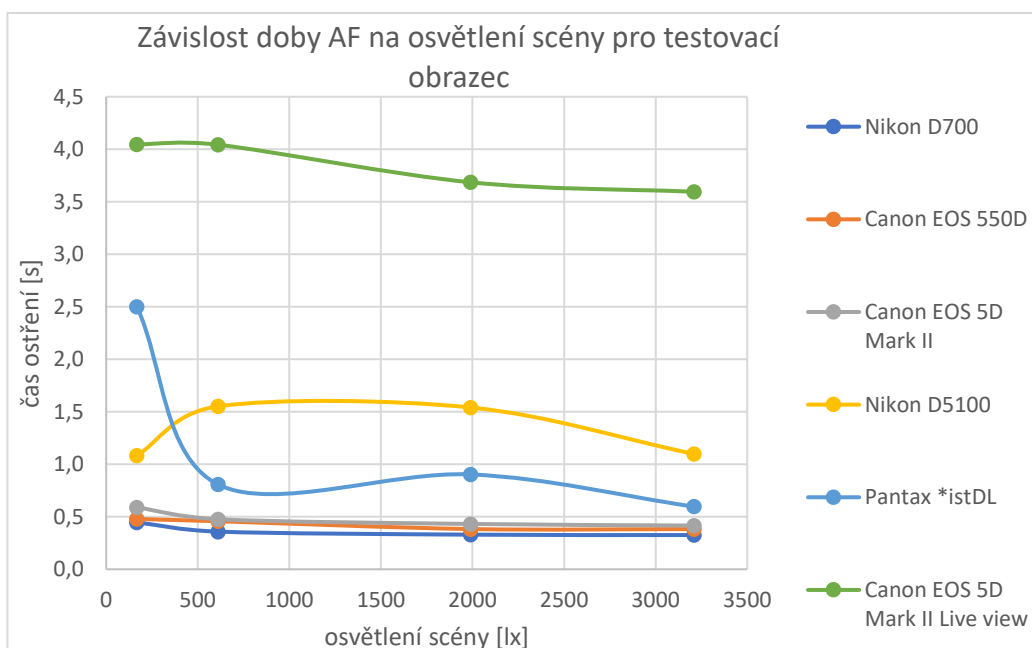
DSLR používají ostření pomocí fázové detekce. Pro demonstraci její rychlosti oproti detekci kontrastu byl jeden fotoaparát naměřen v režimu Live view.

Ostřeno bylo na vytvořený testovací obrazec		Osvětlení scény [lx]			
		168	611	1990	3210
Fotoaparát	Objektiv	čas AF [s]			
Nikon D700	Nikon 24-70 mm	0,447	0,359	0,330	0,326
Canon EOS 550D	Canon 15-55 mm	0,479	0,457	0,383	0,383
Canon EOS 5D Mark II	Sigma 28-75 mm	0,590	0,477	0,432	0,417
Nikon D5100	Nikon 18-55 mm	1,083	1,552	1,541	1,098
Pentax *istDL	Pentax 18-55 mm	2,501	0,808	0,903	0,597
Canon EOS 5D Mark II (live view)	Sigma 28-75 mm	4,047	4,043	3,685	3,595

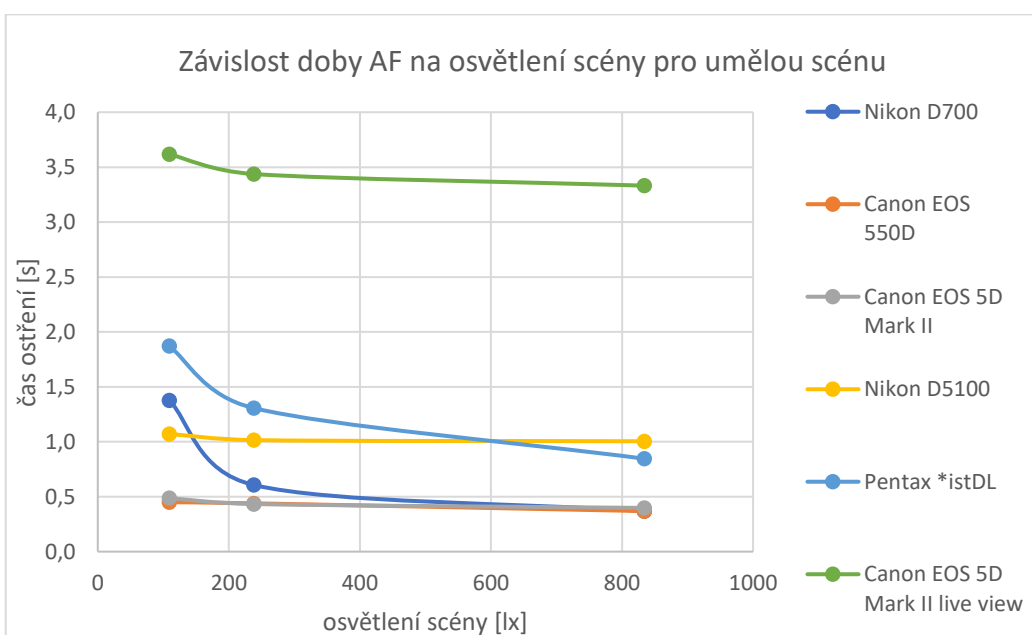
Tabulka 2: Tabulka rychlosti AF v závislosti na osvětlení scény pro testovací obrazec

Ostřeno bylo na uměle vytvořené scéně		Osvětlení scény [lx]		
		109	238	834
Fotoaparát	Objektiv	čas AF [s]		
Nikon D700	Nikon 24-70 mm	1,378	0,607	0,368
Canon EOS 550D	Canon 15-55 mm	0,450	0,440	0,369
Canon EOS 5D Mark II	Sigma 28-75 mm	0,487	0,433	0,398
Nikon D5100	Nikon 18-55 mm	1,072	1,015	1,005
Pentax *istDL	Pentax 18-55 mm	1,872	1,307	0,846
Canon EOS 5D Mark II (live view)	Sigma 28-75 mm	3,618	3,437	3,332

Tabulka 3: Tabulka rychlosti AF v závislosti na osvětlení scény pro umělou scénou



Obrázek 12: Grafické znázornění tabulky 2

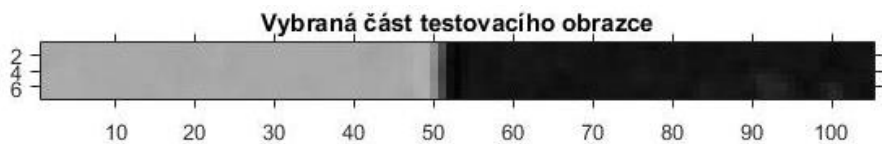


Obrázek 13: Grafické znázornění tabulky 3

4.4 Navržení metody pro kvalitu zaostření pomocí MTF

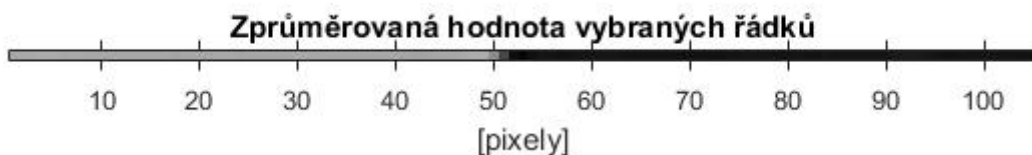
K vyhodnocení ostrosti obrazu se často používají MTF funkce, ze které lze vyčíst, jak kvalitně se prostorové frekvence obrazu přenáší. Pokud se přenáší kvalitně i vysoké frekvence, obraz obsahuje jemné detaily. Funkce MTF byla spočítána a vynesena v programu Matlab podle následujícího postupu.

Nejprve se z obrazu vyřízne část, na které je ostrá hrana přechodu bílé na černou. Tato část je vysoká 7 pixelů.



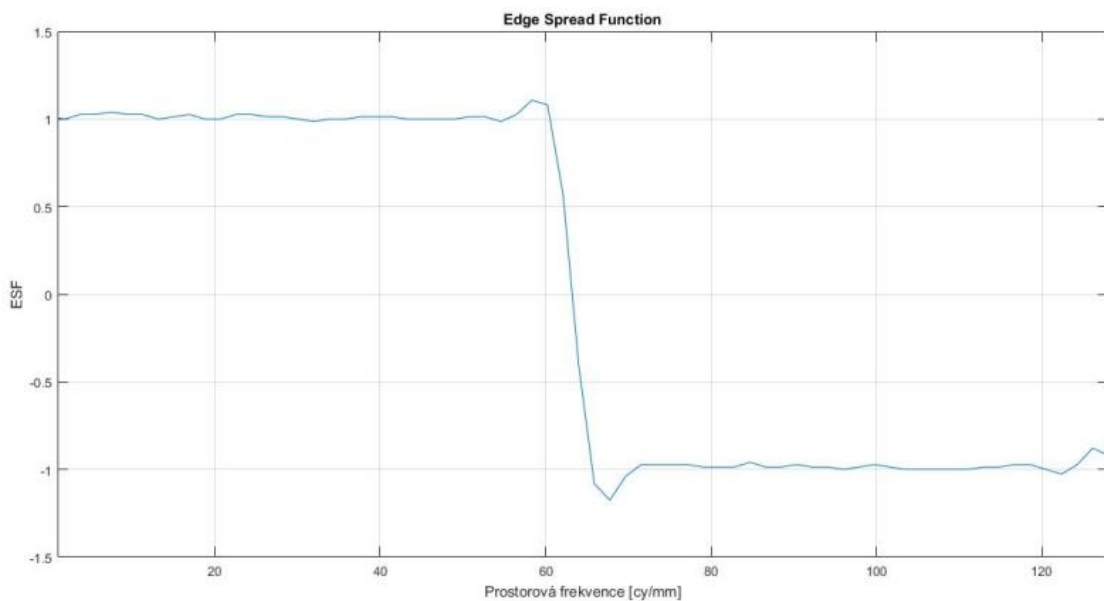
Obrázek 14: Výřez testované části obrazce

Tyto řádky jsou zprůměrovány v jeden řádek pixelů. Tím je částečně korigován obrazový šum, jenž vzniká především v tmavé části obrazu.



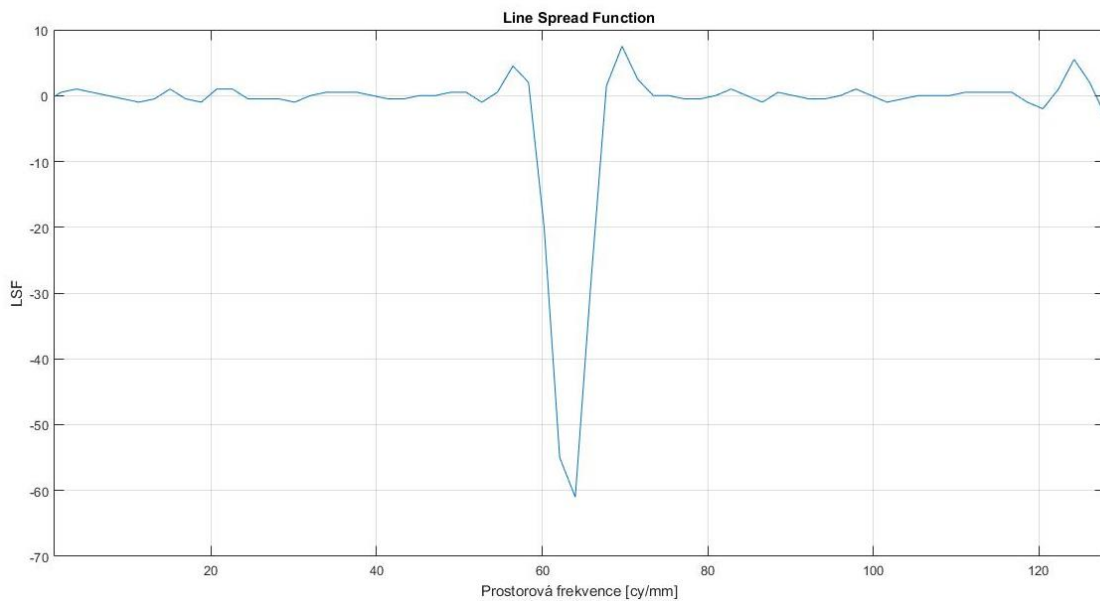
Obrázek 15: Zprůměrované hodnoty obrazce do jednoho řádku pixelů

Z jednoho řádku pixelů se dopočítá rozptylová funkce na hranu se zkratkou ESF (*Edge Spread Function*).



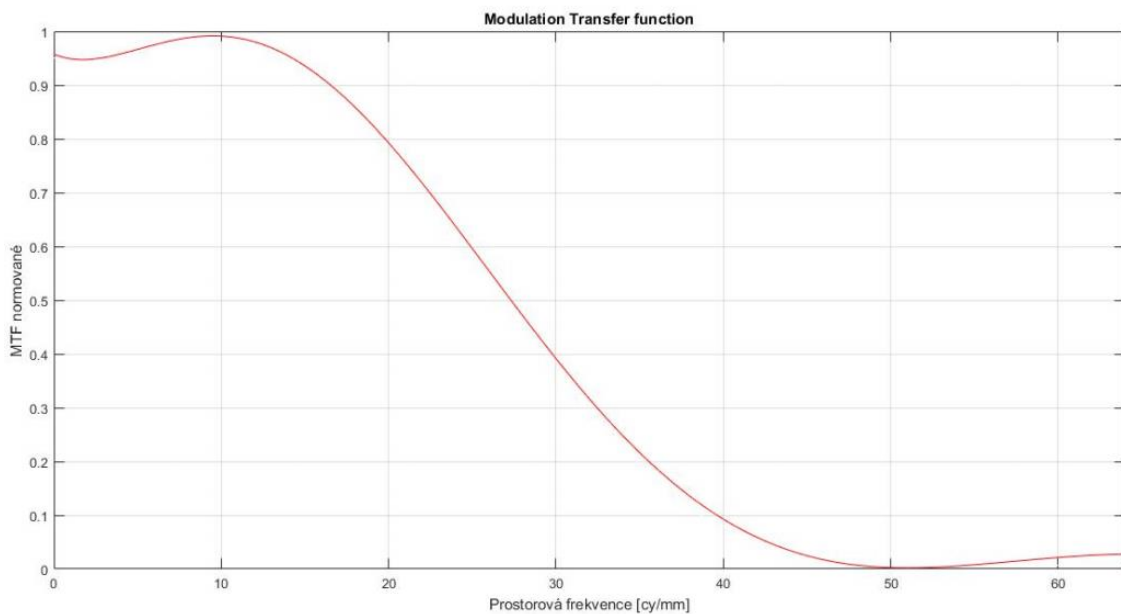
Obrázek 16: Ukázka ESF pro Pentax *istDL

Derivací ESF získáme čárovou rozptylovou funkce LSF (*Line Spread Function*).



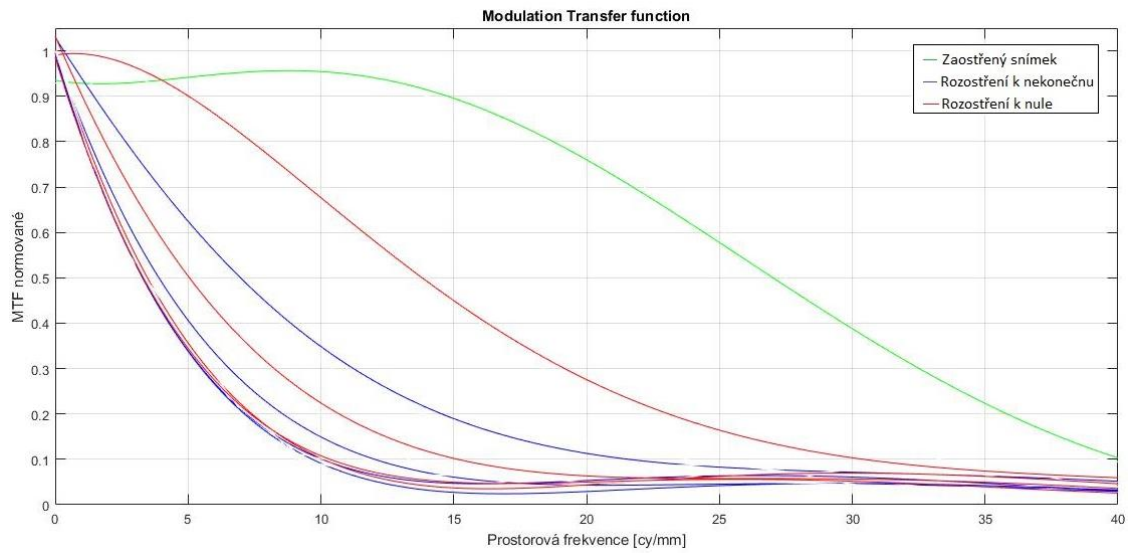
Obrázek 17: Ukázka LSF pro Pentax *istDL

Fourierovou transformací LSF získáme optickou přenosovou funkci OTF (*Optical Transfer Function*). Modul OFT je modulační přenosová charakteristika se zkratkou MTF (*Modulation Transfer Function*).

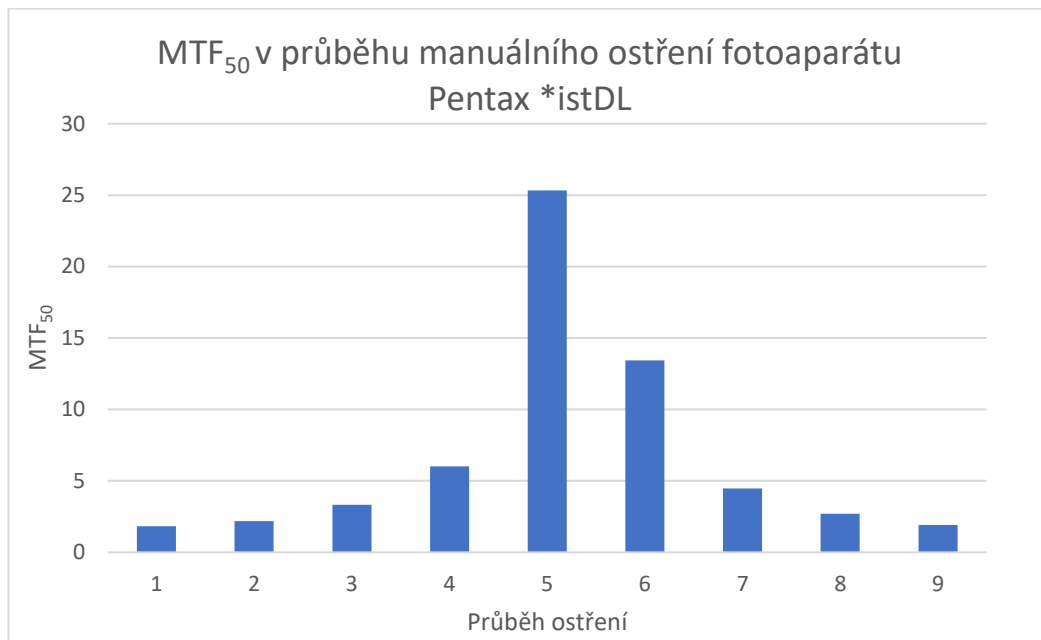


Obrázek 18: Ukázka MTF pro Pentax *istDL

Metoda byla vyzkoušena na testovacím snímku. Pořídila se jedna ostrá fotografie a v režimu manuálního ostření bylo ručně rozostřováno k nekonečnu, při tom byly pořízeny 4 další fotografie. Při poslední objektiv ostřil na nekonečno. Poté byly pořízeny 4 snímky obdobným způsobem, ale na opačnou stranu. Pro tento test byl použit fotoaparát Pentax *istDL. [22], [48], [49]



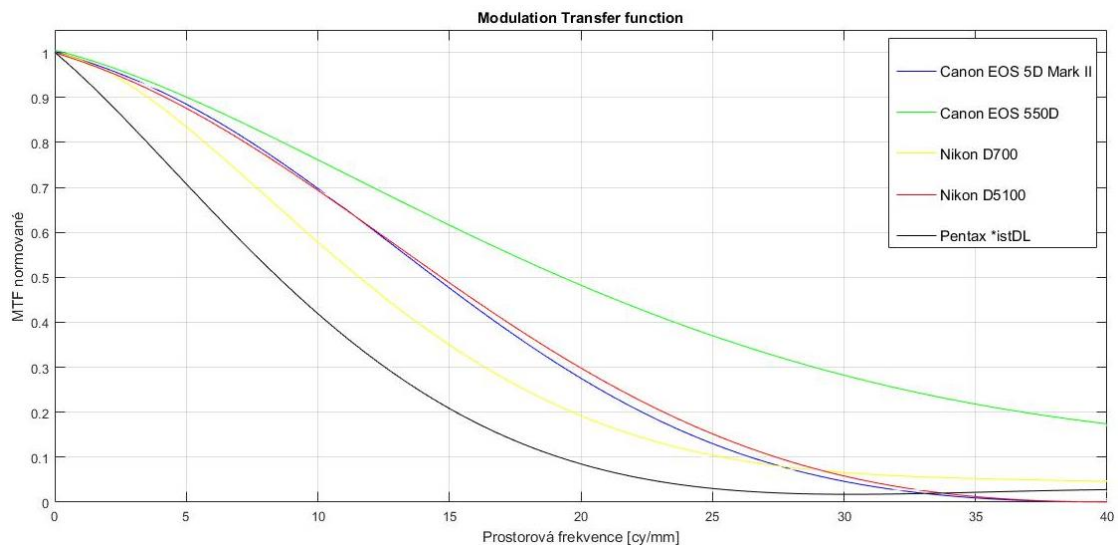
Obrázek 19: Závislost MTF v průběhu manuálního ostření k fotoaparátu Pentax *istDL



Obrázek 20: Grafické znázornění závislosti MTF₅₀ v průběhu manuálního ostření k fotoaparátu Pentax *istDL

4.5 Vyhodnocení MTF

Na této MTF křivce je vykresleno, jaký z testovaných fotoaparátů ostřil nejlépe při maximální hodnotě osvětlení scény 3210 lx.



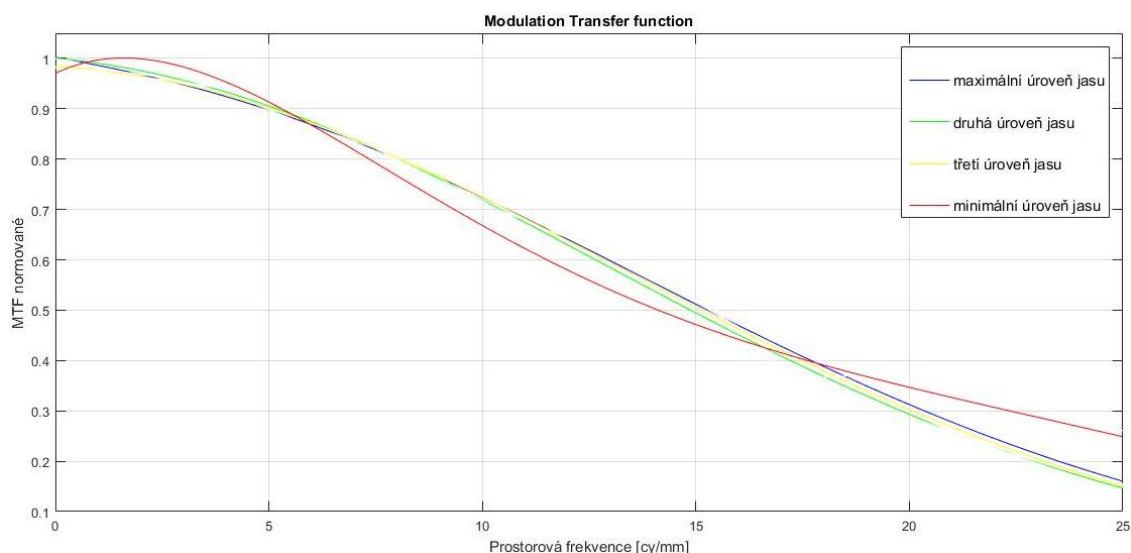
Obrázek 21: Porovnání zaostření fotoaparátů při maximálním osvětlení scény 3210 lx

Výsledky jsou závislé na prostorové frekvenci, která se odvíjí od velikosti senzoru a maximálního rozlišení senzoru.

Fotoaparát	Rozlišení fotografie v ose x [pix]	Velikost senzoru v ose x [mm]
Canon EOS 5D Mark II	2784	36,0
Canon EOS 550D	5184	22,3
Nikon D700	4256	36,0
Nikon D5100	2464	23,6
Pentax *istDL	3008	23,5

Tabulka 4: Rozlišení fotografie a velikost senzoru v ose x

Kvalita pořízené fotografie je závislá na množství světla na scéně, proto další křivka MTF udává tuto závislost. Pro znázornění křivky je ještě přiložena tabulka s MTF_{50} pro všechny fotoaparáty. Ta byla odečítána z křivky MTF, která není proložena, a proto se může stát, že hodnota z tabulky nebude odpovídat vzhledu proloženého obrázku. Křivka je uvedena pouze pro jeden fotoaparát Canon EOS 5D Mark II. Pro ostatní fotoaparáty jsou křivky uvedeny v Příloze 2: MTF křivky.

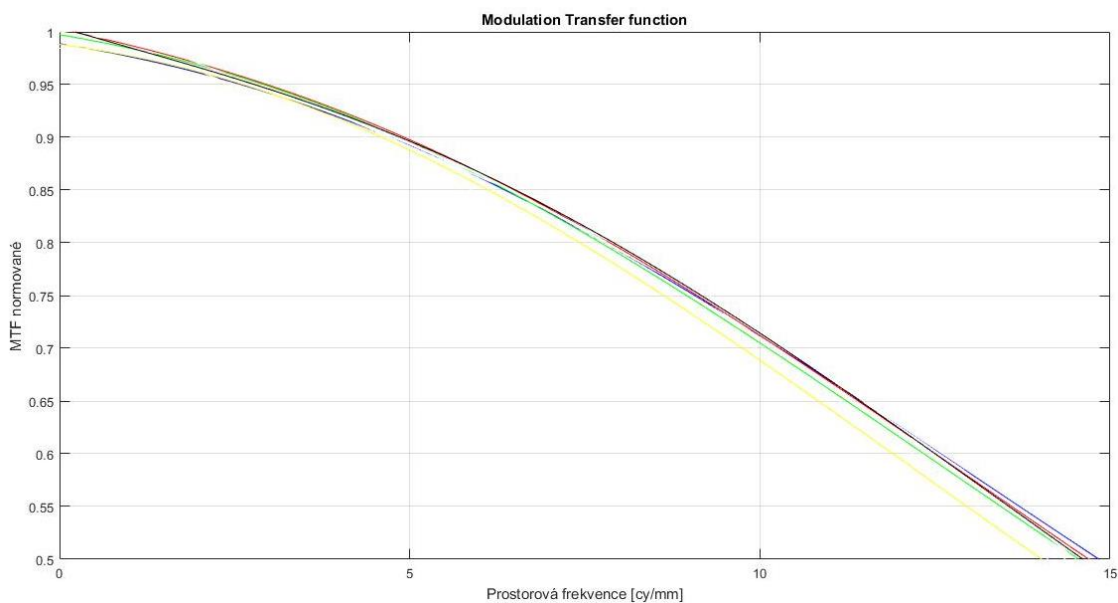


Obrázek 22: Ukázka MTF v závislosti na jasu pro fotoaparát Canon EOS 5D Mark II

MTF ₅₀ v závislosti na jasu ostřené scény		Osvětlení scény [lx]			
		168	611	1990	3210
Fotoaparát	Objektiv	MTF ₅₀			
Nikon D700	Nikon 24-70 mm	11,3	12,1	11,5	11,7
Canon EOS 550D	Canon 15-55 mm	18,1	18,9	19,4	19,0
Canon EOS 5D Mark II	Sigma 28-75 mm	13,6	15,3	14,9	15,5
Nikon D5100	Nikon 18-55 mm	14,6	16,1	15,3	14,9
Pentax *istDL	Pentax 18-55 mm	9,9	9,7	9,6	10,0

Tabulka 5: MTF₅₀ v závislosti na jasu

Další křivka MTF zobrazuje závislost na opakovaném ostření. Tedy s jakou přesností zaostří fotoaparát vždy stejně. Opět je uvedena pouze jedna křivka, a to znovu pro fotoaparát Canon EOS 5D Mark II. Ostatní křivky v Příloze 2: MTF křivky.



Obrázek 23: MTF při opakovaném ostření fotoaparátu Canon EOS 5D Mark II

4.6 Zhodnocení měření

Měření rychlosti AF prokázalo závislost osvětlení scény na době AF. Doba ostření je také značně ovlivněna typem ostřicího motoru. Nejrychlejší fotoaparát při ostření na testovací snímek a jeden z nejrychlejších při fotografování scény byl Nikon D700, který měl objektiv s motorem USM. Při fotografování scény tímto fotoaparátem se však ukázalo, že při nižším osvětlení (kolem 250 lx) už není schopen ostřit stejně rychle jako doposud. Velice rychlé se ukázaly být i oba fotoaparáty značky Canon, které si velice dobře poradily i s nízkými osvětleními scény 109 lx. Jeden s objektivem značky Canon a druhý s objektivem značky Sigma.

Měření potvrdilo rychlost fázové detekce vůči detekci kontrastu. Pro toto měření byl použit fotoaparát Canon EOS D5 Mark II. Pomocí něj byly pořízeny fotografie v režimu One shot AF a za stejných podmínek v režimu Live View. Fázová detekce byla při osvětlení 168 lx rychlejší 6,9-krát a při vyšším osvětlení 834 lx byla rychlejší dokonce 8,4-krát.

MTF křivka v průběhu manuálního ostření ukázala velký rozdíl mezi obrazem správně zaostřeným a obrazem nedoostřeným. Na zaostřené křivce lze pozorovat, že nezačíná z plné normované hodnoty MTF, ale v průběhu této úrovně dosáhne. To může být způsobeno tím, že obraz byl pořízen do formátu JPEG, který zahrnuje doostřovací algoritmy. Všechny pořízené fotografie jsou ve formátu JPEG, kromě fotografií z Nikonu D700, který ukládal fotografie ve formátu TIFF.

V MTF křivce, která porovnává fotoaparáty při úrovni osvětlení 3210 lx, nejlépe vyšel fotoaparát Canon EOS 5D. Ten se svým rozlišením senzoru 5196x3464 pixelů a velikostí senzoru 22,3 x 14,9 mm dokáže přenést vysoké prostorové frekvence. Do výsledné křivky se promítne kvalita optiky použitého objektivu. V úvahu je potřeba brát i informace, o kterých vypovídají zbylé dvě MTF křivky. Kvalita ostření je u většiny měřených fotoaparátů závislá na úrovni osvětlení scény, a také že při stejných podmínkách není nikdy zaostřeno dokonale stejně.

5 Závěr

Tato práce se zabývala funkcí automatického ostření digitálních fotoaparátů. Úvodní kapitola, nazvaná **2. Digitální fotoaparát**, poskytla základ k pochopení funkce automatického ostření. V kapitole **3. Automatické ostření** byly zmíněny typy ostřících systému a vysvětlen princip jejich činnosti. Bylo uvedeno, že pro DSLR se v normálním fotografickém režimu používá fázová detekce, což je velice rychlý způsob ostření, potřebuje však pro svou činnost dostatek světla. Následovala kapitola **4. Testování kvality AF**, která ověřila reálné chování a kvalitu automatického ostření u různých druhů fotoaparátů při různých úrovních osvětlení scény.

Měření potvrdilo teoretický předpoklad funkce AF, a to vlastnost, že se snižujícím osvětlením scény fotoaparáty ostří déle a nejsou schopny zaostřit tak kvalitně, jako při dostatečném osvětlení. Fotoaparát s nejlepšími výsledky v udržení stálé kvality fotografie při opakovaném ostření i při změně osvětlení scény je fotoaparát Nikon D700. Nejvyšší prostorové frekvence byl schopný přenést fotoaparát Canon EOS 550D, proto při porovnání všech fotoaparátů má nejlepší průběh MTF křivky. Pokrok ve vývoji automatického ostření v obou měřených parametrech lze pozorovat, při srovnání naměřené výsledky DSLR se starším typem fotoaparátu Pentax *istDL.

Výsledky měřených fotoaparátů však nelze zcela srovnat, neboť každý výrobce má svůj bajonet a všechny fotoaparáty nemohly být testovány s jedním objektivem. Každý objektiv zanesl do měření jiné odchylky. U měření rychlosti typ ostřícího motoru ovlivní celkovou dobu ostření. U křivek MTF se projeví kvalita optiky v objektivu. Přesto měření vypovídá o reálném chování automatického ostření, které potvrdilo teoretické předpoklady.

Literatura:

- [1] R. Pihan a O. Neff, *Mistrovství práce s DSLR*. .
- [2] „How Cameras Work | HowStuffWorks". [Online]. Dostupné z: <https://electronics.howstuffworks.com/camera.htm>. [Viděno: 07-kvě-2018].
- [3] M. D. Čížek, „Fotoaparát a digitální fotografie", s. 21.
- [4] J. Reichl a M. Všeticka, „Encyklopedie fyziky", 2006. [Online]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1533-bayerova-mask>. [Viděno: 04-led-2018].
- [5] W. D. Camera, „Low pass filters explained", *What Digital Camera*, 04-pro-2009. [Online]. Dostupné z: <http://www.whatdigitalcamera.com/technical-guides/glossary-of-camera-terms/low-pass-filters-explained-14716>. [Viděno: 04-led-2018].
- [6] „History of Digital Photography". [Online]. Dostupné z: <https://practicalphotographytips.com/history-of-digital-photography.html>. [Viděno: 07-kvě-2018].
- [7] „Historické okénko: Dějiny (nejen) digitálních zrcadlovek", *FotoAparát.cz*. [Online]. Dostupné z: <https://www.fotoaparát.cz/clanek/1339/historicke-okenko-dejiny-nejen-digitalnich-zrcadlovek-11557/>. [Viděno: 07-kvě-2018].
- [8] „What is a DSLR (Digital SLR) Camera?", *Photography Life*. [Online]. Dostupné z: <https://photographylife.com/what-is-a-dslr>. [Viděno: 29-pro-2017].
- [9] „Exponometrie". [Online]. Dostupné z: https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=19254. [Viděno: 03-led-2018].
- [10] „Camera EV - Exposure Value, EV chart, calculator". [Online]. Dostupné z: <https://www.scantips.com/lights/evchart.html>. [Viděno: 04-kvě-2018].
- [11] „Stabilizace obrazu ve fotoaparátech", *FotoAparát.cz*. [Online]. Dostupné z: <https://www.fotoaparát.cz/clanek/1258/stabilizace-obrazu-ve-fotoaparatech-11471/>. [Viděno: 03-led-2018].
- [12] oXy O. s.r.o, „Fotoškola - 4.díl: Clona a vše kolem ní", *Digimanie.cz*. [Online]. Dostupné z: <https://www.digimanie.cz/fotoskola-4dil-clona-a-vse-kolem-ni/1316>. [Viděno: 03-led-2018].
- [13] J. Devera, „Bezva Focení - Clona", *www.BezvaFoceni.cz*. [Online]. Dostupné z: <http://www.bezvafoeni.cz/clanky/clona/>. [Viděno: 04-led-2018].
- [14] „Focal Length | Understanding Camera Zoom & Lens Focal Length | Nikon from Nikon". [Online]. Dostupné z: [//www.nikonusa.com/learn-and-explore/a/tips-and-techniques/understanding-focal-length.html](http://www.nikonusa.com/learn-and-explore/a/tips-and-techniques/understanding-focal-length.html). [Viděno: 03-kvě-2018].
- [15] D. H. Johnson, „Signal-to-noise ratio", *Scholarpedia*, roč. 1, č. 12, s. 2088, pro. 2006.
- [16] T. Ang, *Digitální fotografie pro pokročilé*. .
- [17] „What is the difference between CCD and CMOS image sensors in a digital camera?", *HowStuffWorks*, 01-dub-2000. [Online]. Dostupné z: <https://electronics.howstuffworks.com/cameras-photography/digital/question362.htm>. [Viděno: 31-pro-2017].
- [18] N. Ondřej, *Tajná kniha o digitální fotografii*. UNIS Publishing.

- [19] „How Focus Works”, *B&H Explora*. [Online]. Dostupné z: <https://www.bhphotovideo.com/explora/photography/tips-and-solutions/how-focus-works>. [Viděno: 22-led-2018].
- [20] C.-Y. Chen, R.-C. Hwang, a Y.-J. Chen, „A passive auto-focus camera control system”, *Appl. Soft Comput.*, roč. 10, č. 1, s. 296–303, led. 2010.
- [21] „The Point Spread Function in Details”. [Online]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/microscopy/int/solutions/reference/basic-microscopy/the-point-spread-function.html>. [Viděno: 14-kvě-2018].
- [22] „Výpočet MTF z odezvy LSF nebo PSF optické soustavy”. [Online]. Dostupné z: http://webzam.fbmi.cvut.cz/szabozol/ZOD/web_U2/Mereni_MTF_z_LSF.htm. [Viděno: 14-kvě-2018].
- [23] „Introduction to Modulation Transfer Function | Edmund Optics”. [Online]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/optics/introduction-to-modulation-transfer-function/>. [Viděno: 15-kvě-2018].
- [24] „Slovník pojmů - Rozlišovací schopnost objektivu”. [Online]. Dostupné z: <http://www.skyfly.cz/pristroj/slovník/rozliseni.htm>. [Viděno: 09-úno-2018].
- [25] „Optické vady a vlastnosti objektivů”. [Online]. Dostupné z: <http://photo.mysteria.cz/clanky/objekt2.html>. [Viděno: 22-led-2018].
- [26] „konektor et al. - Postup 1. Určení spektrální propustnosti materiá.pdf”. .
- [27] „Vše o světle”. [Online]. Dostupné z: <http://www.fotoroman.cz/tech2/svetlo07objects.htm>. [Viděno: 10-úno-2018].
- [28] L. Diprose, „Circle of Confusion explained and what it means to be in focus.” [Online]. Dostupné z: <http://www.fujifilm.com.au/blogs/digital-photography/circle-of-confusion-and-what-it-means-to-be-in-focus>. [Viděno: 21-led-2018].
- [29] „Understanding Depth of Field in Photography”. [Online]. Dostupné z: <https://www.cambridgeincolour.com/tutorials/depth-of-field.htm>. [Viděno: 04-led-2018].
- [30] „Autofokus u jednookých zrcadlovek, I.díl”, *FotoAparát.cz*. [Online]. Dostupné z: <https://www.fotoaparát.cz/clanek/57/autofokus-u-jednookych-zrcadlovek-i-dil-2162/>. [Viděno: 07-bře-2018].
- [31] „Historické okénko: Dějiny automatického ostření”, *FotoAparát.cz*. [Online]. Dostupné z: <https://www.fotoaparát.cz/clanek/1255/historicke-okenko-dejiny-automatickeho-ostreni-11468/>. [Viděno: 24-bře-2018].
- [32] S. T. Seljebotn, „Continuous autofocus for line scanning hyperspectral camera”, Master’s Thesis, Institutt for elektronikk og telekommunikasjon, 2012.
- [33] „Autofocus Modes Explained”, *Photography Life*. [Online]. Dostupné z: <https://photographylife.com/dslr-autofocus-modes-explained>. [Viděno: 02-bře-2018].
- [34] X. Xu, Y. Wang, J. Tang, X. Zhang, a X. Liu, „Robust Automatic Focus Algorithm for Low Contrast Images Using a New Contrast Measure”, *Sensors*, roč. 11, č. 9, s. 8281–8294, srp. 2011.
- [35] „Principy ostření: DSLR a kompakty”, *FotoAparát.cz*. [Online]. Dostupné z: <https://www.fotoaparát.cz/clanek/1377/princip-ostreni-pdaf-cdaf-zrcadlovky-kompakty/>. [Viděno: 07-bře-2018].
- [36] „Convolution Kernel Mask Operation - Java Tutorial”. [Online]. Dostupné z: <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope->

- resource/primer/java/digitalimaging/processing/kernelmaskoperation/.
[Viděno: 23-kvě-2018].
- [37] K. Chotaš, „VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ“, s. 68.
- [38] „Autofocus: phase detection“. [Online]. Dostupné z:
<http://graphics.stanford.edu/courses/cs178/applets/autofocusPD.html>.
[Viděno: 21-bře-2018].
- [39] „Jakým způsobem fotoaparáty ostří?“, *Milujeme fotografii – vše o digitální fotografii*. [Online]. Dostupné z: <https://www.milujemefotografii.cz/jakym-zpusobem-fotoaparaty-ostri>. [Viděno: 25-dub-2018].
- [40] „DSLR Autofocus Modes Explained“, *Photography Life*. [Online]. Dostupné z: <https://photographylife.com/dslr-autofocus-modes-explained>. [Viděno: 20-led-2018].
- [41] C.-C. Chan, S.-K. Huang, a H. H. Chen, „Enhancement of phase detection for autofocus“, 2017, s. 41–45.
- [42] J. Jang, Y. Yoo, J. Kim, a J. Paik, „Sensor-Based Auto-Focusing System Using Multi-Scale Feature Extraction and Phase Correlation Matching“, *Sensors*, roč. 15, č. 3, s. 5747–5762, bře. 2015.
- [43] „Contrast, phase detection and hybrid autofocus“. [Online]. Dostupné z: <https://camtest.eu/technology/knowledge/64-contrast-and-phase-detection-autofocus>. [Viděno: 24-dub-2018].
- [44] C. UK, www.canon.co.uk, „Canon Focusing Technology - Tech Guide For Lenses“. [Online]. Dostupné z: <https://www.canon.co.uk/lenses/tech-guide/focusing/>. [Viděno: 28-dub-2018].
- [45] „Ostřicí motorčky a další taje objektivů“, *Milujeme fotografii – vše o digitální fotografii*. [Online]. Dostupné z: <https://www.milujemefotografii.cz/ostrici-motorcky-a-dalsi-taje-objektivu>. [Viděno: 28-dub-2018].
- [46] C. E. N. V. and C. E. Ltd 2002-2017, „USM lens technology: magic motors“, *Canon Professional Network*. [Online]. Dostupné z: http://cpn.canon-europe.com/content/education/technical/usmlens_technology.do. [Viděno: 28-dub-2018].
- [47] „Canon lens technology: STM“. [Online]. Dostupné z: http://www.eos-magazine.com/articles/EOS_feature/canon-stm-stepping-motor-lens.html. [Viděno: 28-dub-2018].
- [48] „MTF_OTF_PSF.pdf“.
- [49] „Spatial Resolution“. [Online]. Dostupné z: <http://www.dspguide.com/ch25/1.htm>. [Viděno: 21-kvě-2018].

Přílohy

Příloha 1: Měřené fotoaparáty

Název	Pentax *ist DL
Typ snímače	CCD
Rozlišení snímače	6.1 Mpix (3026 x 2017)
Velikost snímače	23.5 x 15.7 mm
Crop factor	1.53x
Citlivost ISO	200 – 3200
Rychlost závěrky	30s – 1/4000s
Elektronická závěrka	Ano
Manuální ostření	Ano
LCD monitor	6.35 cm 210 000 px
Váha	565 g
Rozměry	125 x 93 x 67 mm
Objektiv	SMC Pentax DA
Ohnisková vzdálenost	18 mm – 55 mm



Obrázek 24: Příloha 1-Pentax *ist DL [49]

Název	Canon EOS 550D
Typ snímače	CMOS
Rozlišení snímače	18 Mpix (5196 x 3464 pix)
Velikost snímače	22.3 x 14.9 mm
Crop factor	1.61x
Citlivost ISO	100 – 12800
Rychlost závěrky	30s – 1/4000s
Manuální ostření	Ano
LCD monitor	7.62 cm 1 040 000 px
Váha	475 g
Rozměry	128.8 x 97.5 x 75.3 mm
Objektiv	Canon
Ohnisková vzdálenost	15 mm – 55 mm



Obrázek 25: Příloha 1-Camom EOS 550D [50]

Název	Canon EOS 5D Mark II
Typ snímače	CMOS
Rozlišení snímače	21 Mpix (5613 x 3742)
Velikost snímače	36 x 24 mm
Crop factor	1
Citlivost ISO	100 – 6400 plus 50
Rychlost závěrky	30s – 1/8000s
Manuální ostření	Ano
LCD monitor	7.62 cm 920 000 pix
Váha	850g
Rozměry	152 x 114 x 75 mm
Objektiv	Sigma
Ohnisková vzdálenost	28 mm – 75 mm



Obrázek 26: Příloha 1-Camom EOS 5D Mark II [51]

Název	Nikon D5100
Typ snímače	CMOS
Rozlišení snímače	16.2 (4928 x 3264)
Velikost snímače	23.6 x 15.6 mm
Crop factor	1.53
Citlivost ISO	100 - 6400
Rychlost závěrky	30s – 1/4000s
Manuální ostření	Ano
LCD monitor	7.62 cm 921 000 pix
Váha	560 g
Rozměry	128 x 97 x 79
Objektiv	Nikon
Ohnisková vzdálenost	18mm – 55mm



Obrázek 27: Příloha 1-Nikon D700 [52]

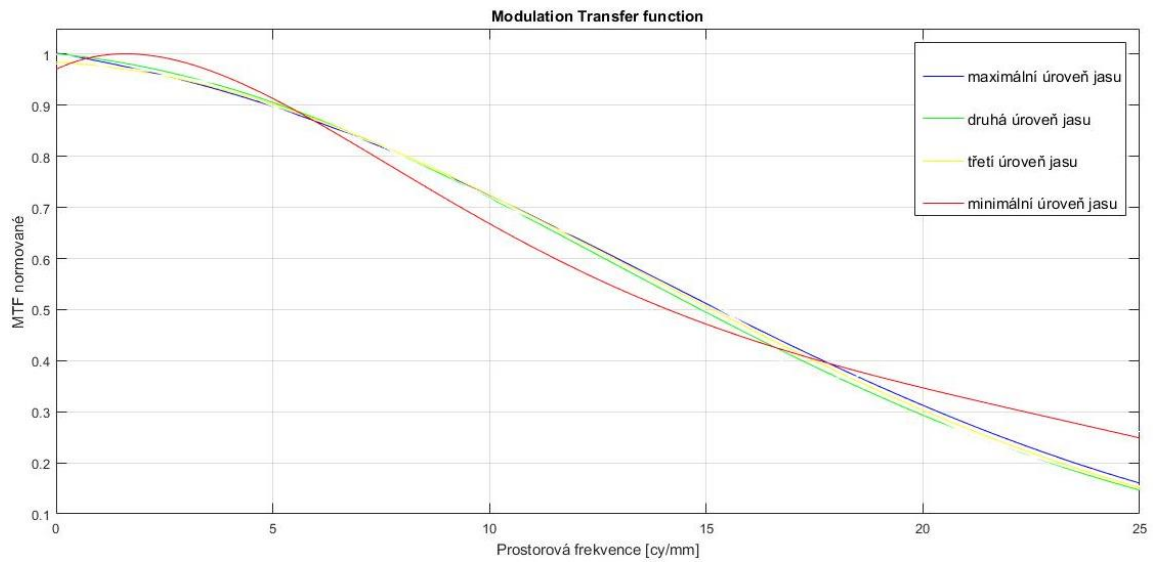
Název	Nikon D5100
Typ snímače	CMOS
Rozlišení snímače	12.10 (4275 x 2831)
Velikost snímače	36 x 23.9 mm
Crop factor	1
Citlivost ISO	100 - 25600
Rychlost závěrky	30s – 1/8000s
Manuální ostření	Ano
LCD monitor	7.62 cm 920 000 pix
Váha	1074
Rozměry	147 x 123 x 77 mm
Objektiv	Nikon
Ohnisková vzdálenost	24mm – 70mm



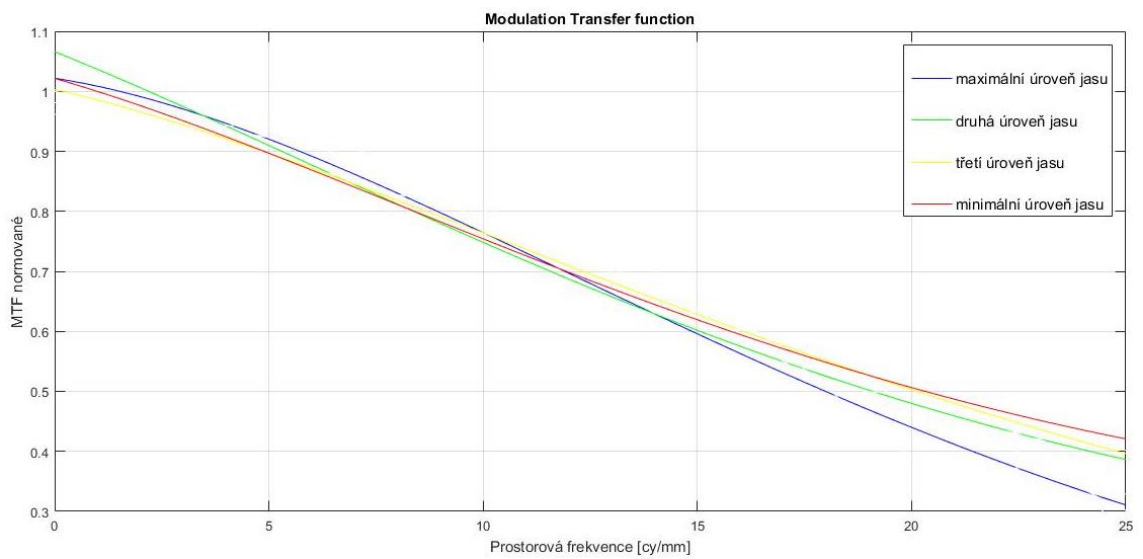
Obrázek 28: Příloha 1-Nikon D5100 [53]

Příloha 2: MTF křivky

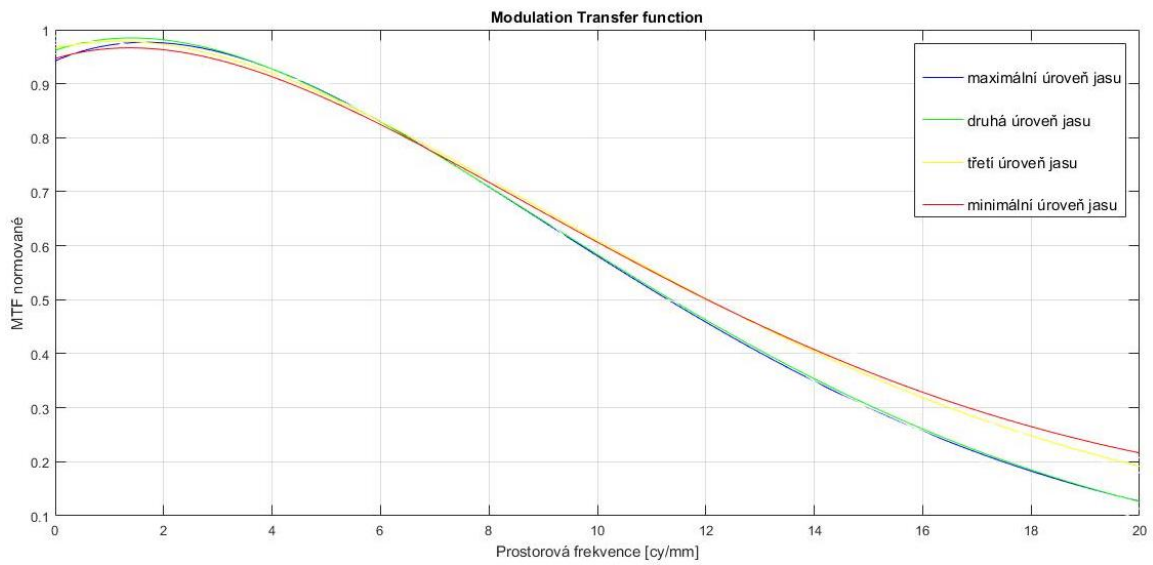
MTF měřených fotoaparátů v závislosti množství světla na scéně



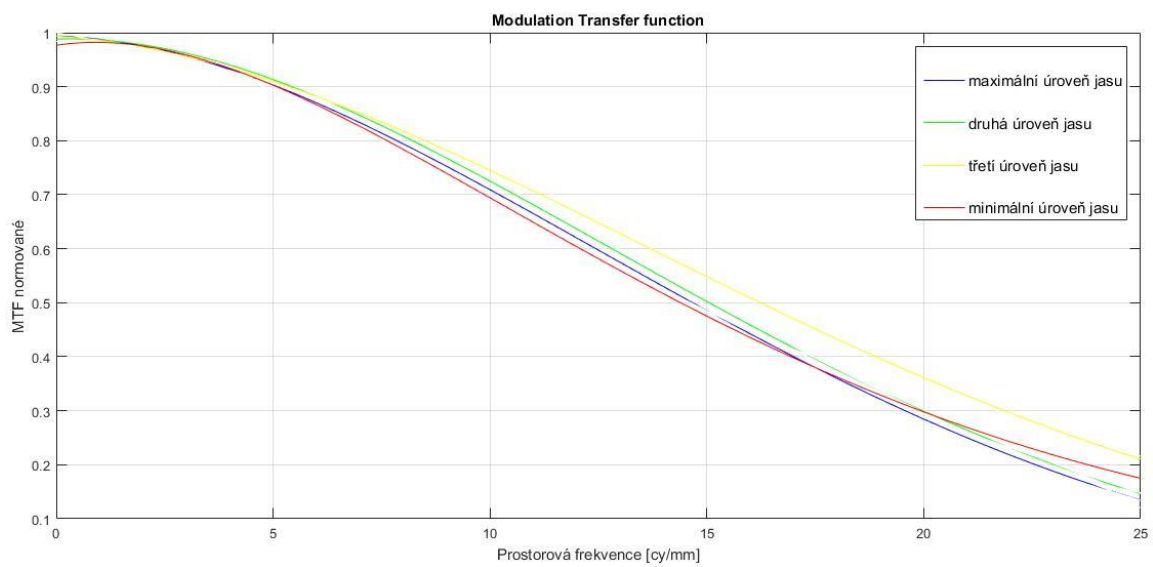
Obrázek 29: Příloha 2- MTF pro Canon EOS 5D Mark II v závislosti množství světla na scéně



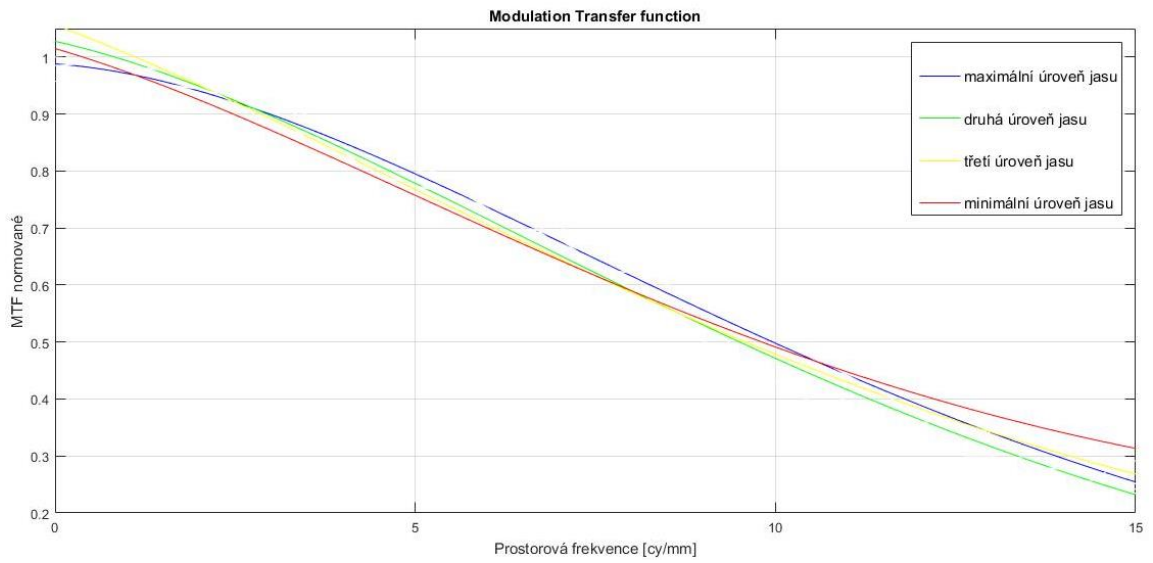
Obrázek 30: Příloha 2- MTF pro Canon OES 550D v závislosti množství světla na scéně



Obrázek 31: Příloha 2- MTF pro Nikon D700 v závislosti množství světla na scéně

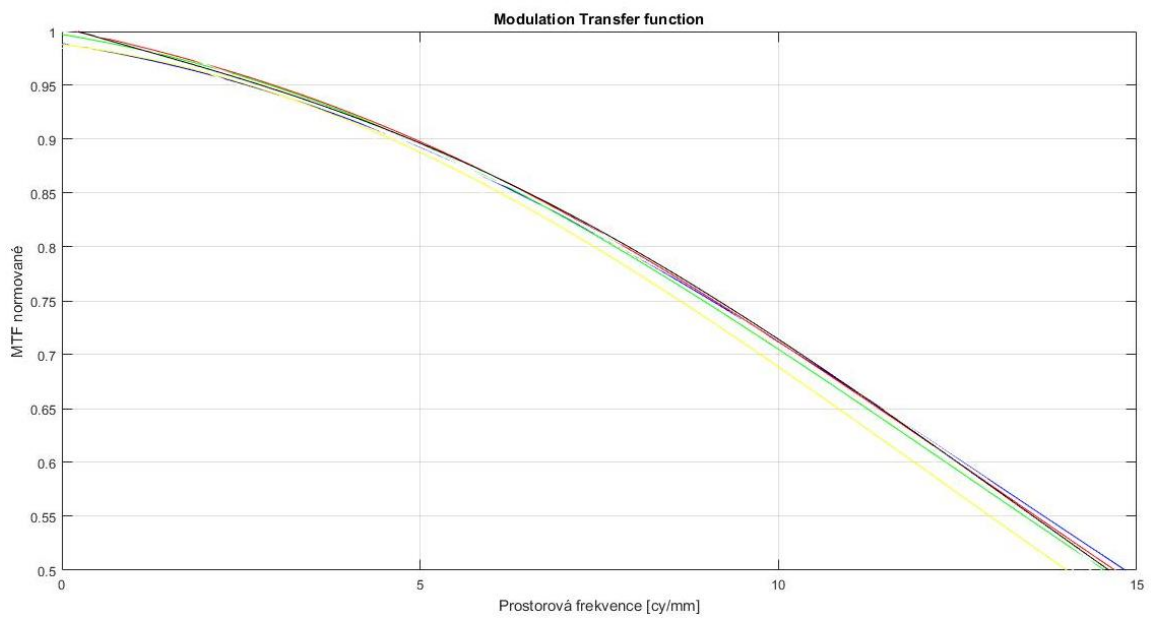


Obrázek 32: Příloha 2- MTF pro Nikon D5100 v závislosti množství světla na scéně

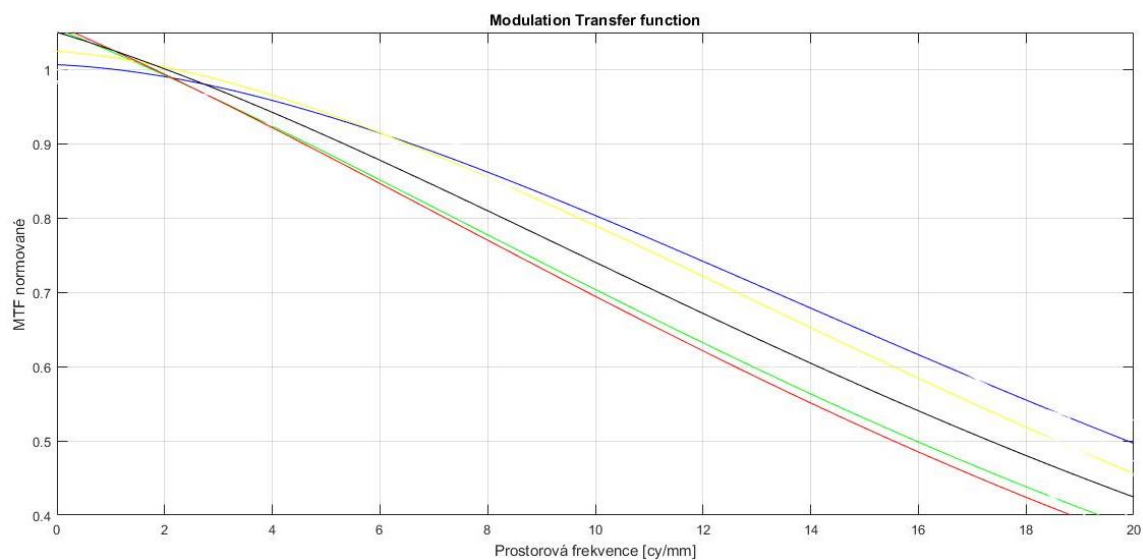


Obrázek 33: Příloha 2- MTF pro Pentax *istDL v závislosti množství světla na scéně

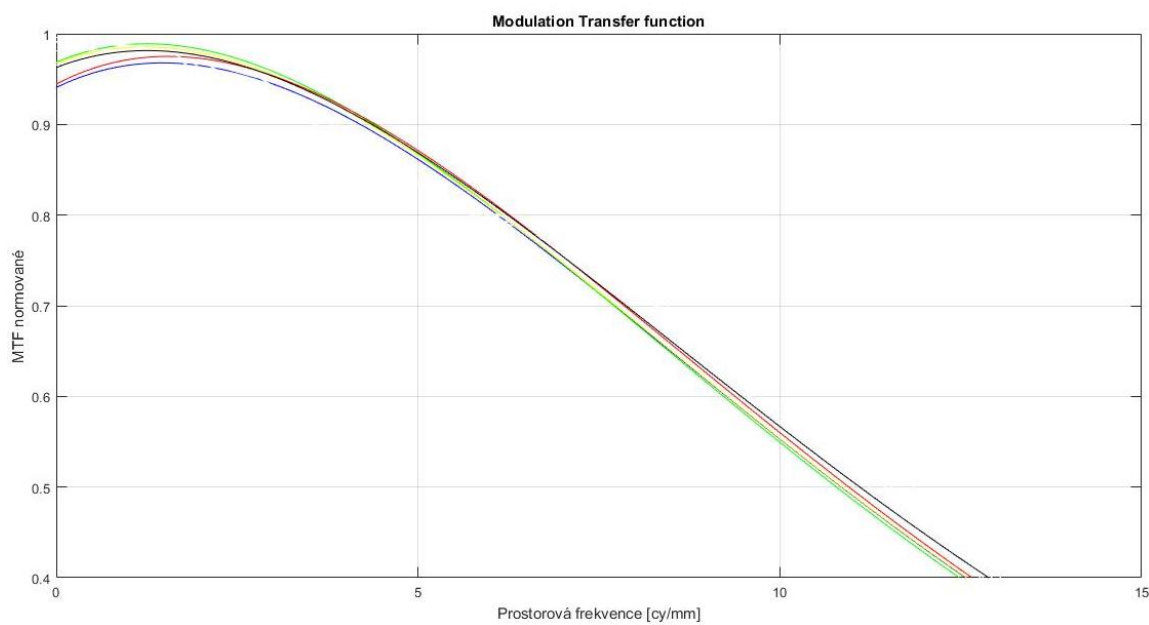
MTF měřených fotoaparátů při opakovaném ostření



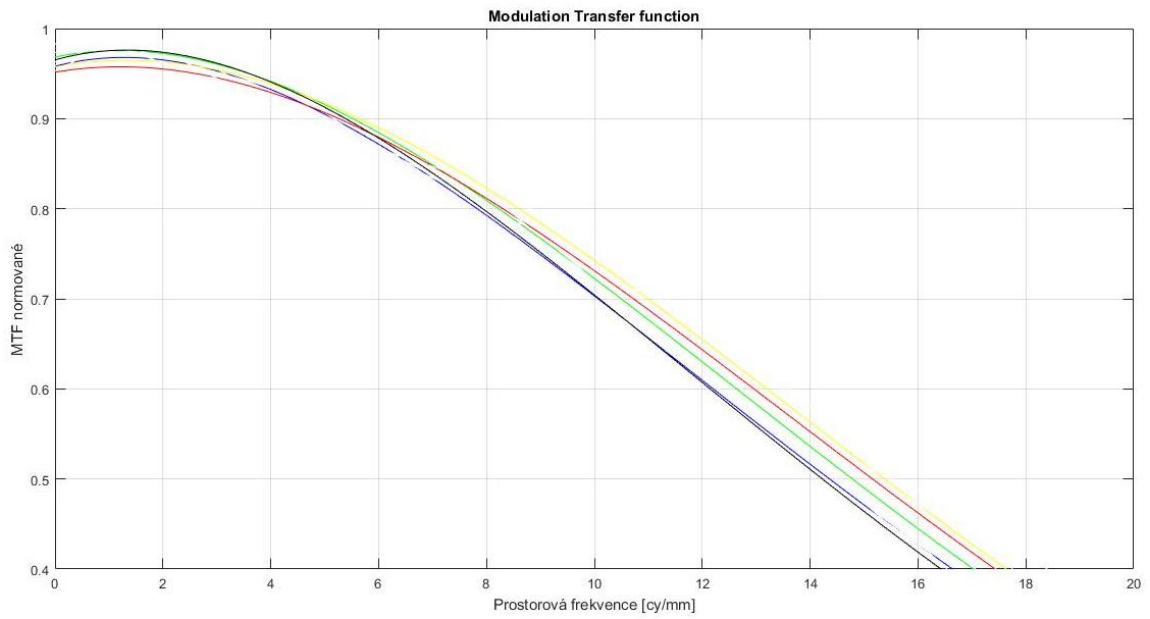
Obrázek 34: Příloha 2- MTF pro Canon EOS 5D Mark II při opakovaném ostření



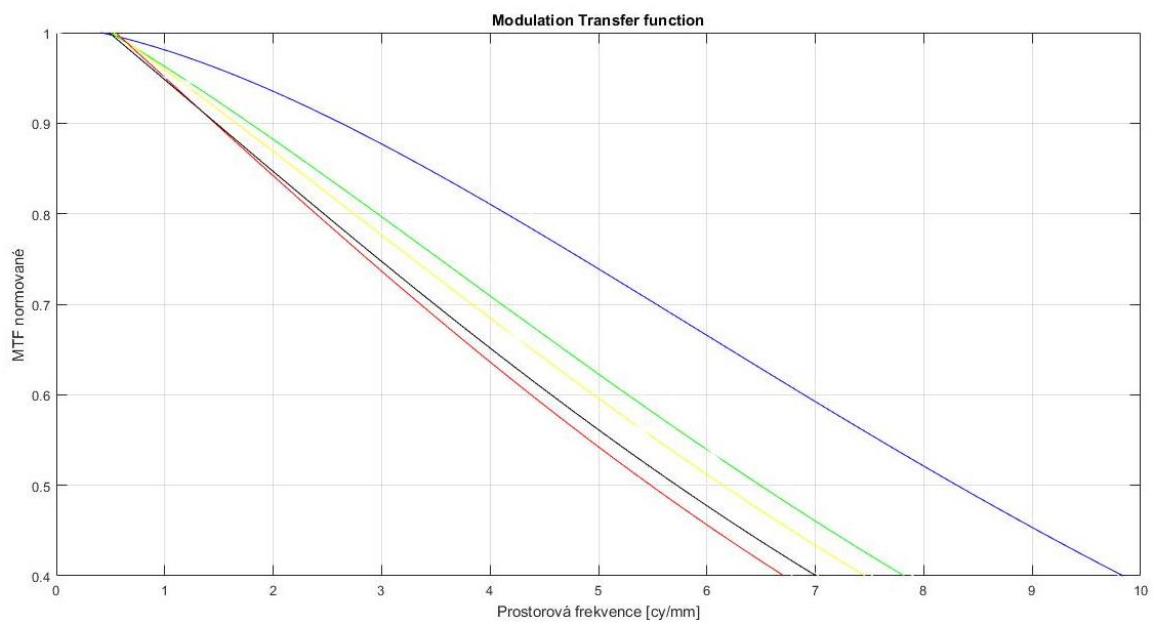
Obrázek 35: Příloha 2- MTF pro Canon OES 550D při opakovaném ostření



Obrázek 36: Příloha 2- MTF pro Nikon D700 při opakovaném ostření



Obrázek 37: Příloha 2- MTF pro Nikon D5100 při opakovaném ostření



Obrázek 38: Příloha 2- MTF pro Pentax *istDL při opakovaném ostření