



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky**

Algoritmy interpolace obrazu pro experiment WILLIAM

Interpolation algorithms for the WILLIAM experiment

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimedia a elektronika

Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: doc. Mgr. Petr Páta Ph.D.

Pavel Tymeš

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Tymeš Jméno: Pavel Osobní číslo: 434983
Fakulta/ústav: Fakulta elektrotechnická
Zadávací katedra/ústav: Katedra radioelektroniky
Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Studijní obor: Multimediální technika

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Algoritmy interpolace obrazu pro experiment WILLIAM

Název bakalářské práce anglicky:

Interpolation Algorithms for the WILLIAM Experiment

Pokyny pro vypracování:

Podějte přehled používaných obrazových systémů pro celooblohové snímání. Seznamte se s experimentem WILLIAM a jeho snímacími parametry. Zaměřte se především na vliv rozlišovací schopnosti systému a souvislost s funkcí rozptylu bodu (PSF). Zabývejte se vlivem vzorkování na konečném rastru obrazu na tvar PSF. Navrhněte, implementujte a otestujte vhodný interpolační algoritmus.

Seznam doporučené literatury:

- [1] G. Janout, P. Páta, P. Skala, P. Bednář, J. PSF Estimation of Space-Variant Ultra-Wide Field of View Imaging Systems. Appl. Sci. 2017, 7, 151.
- [2] Vitek, S. Modeling of Astronomical Images. Balt. Astron. 2009, 18, 387-391.
- [3] Piotrowski, L.W.; Batsch, T.; Czyrkowski, H.; Cwiok, M.; Dabrowski, R.; Kasprovicz, G.; Majcher, A.; Majczyna, A.; Malek, K.; Mankiewicz, L.; et al. PSF modelling for very wide-field CCD astronomy. Astron. Astrophys. 2013, 551, A119.
- [4] Janout, P.; Páta, P.; Bednář, J.; Anisimova, E.; Blažek, M.; Skala, P. Stellar objects identification using wide-field camera. In SPIE Proceedings Vol. 9450: Photonics, Devices, and Systems VI; SPIE:Washington, DC, USA, 2015; p. 945011.

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: 17.02.2017 Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: 31.08.2018

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(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

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou práci "Algoritmy interpolace obrazu pro experiment WILLIAM" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 25. 5. 2017

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu *doc. Mgr. Petrovi Pátovi, Ph.D.* za cenné připomínky a odborné vedení při vypracování této práce.

Algoritmy interpolace obrazu pro experiment WILLIAM

Anotace:

Bakalářská práce se zabývá obrazovými systémy pro celooblohové snímání, a to především se zaměřením na experiment WILLIAM. Jedná se o celooblohovou kameru, která byla sestrojena na ČVUT v Praze. Na obdrženích snímcích z kamery byl v programu MATLAB testován vliv vzorkování konečného rastru obrazu, konkrétně vliv zvětšení a posunutí rastru na konečný tvar PSF.

Klíčová slova:

obrazový senzor, CCD, CMOS, UWFOV, celooblohové snímání, WILLIAM, PSF, MATLAB

Interpolation algorithms for the WILLIAM experiment

Annotation:

This Bachelors thesis deals with image systems for all-sky scanning, especially focusing on the experiment WILLIAM, the all-sky camera constructed in CTU in Prague. The effect of sampling the final image grid was tested in the MATLAB program on the received images from the camera, specifically the effect of the magnification and shifting of the grid on the final shape of the PSF.

Keywords:

image sensor, CCD, CMOS, UWFOV, all-sky cameras, WILLIAM, PSF, MATLAB

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Obrazový senzor	8
2.1	Barevné snímání	9
2.1.1	Zařízení s jedním obrazovým senzorem	9
2.1.2	Zařízení se třemi obrazovými senzory	10
2.2	Cesta signálu uvnitř zařízení	11
2.2.1	Sada filtrů.....	11
2.2.2	Obrazový senzor, zesilovač.....	12
2.2.3	A/D převodník.....	12
2.2.4	Obrazový procesor.....	12
2.2.5	Vyrovňovací paměť, záznamové medium	13
2.3	Technologie obrazových senzorů	13
2.4	CCD (Charge-Coupled Device) – Základní princip	14
2.4.1	Systémy přesunu náboje – FF, FT, IT, FIT.....	15
2.4.2	HAD CCD, Super HAD CCD.....	17
2.5	CMOS (Complementary Metal Oxide Semikonduktor) – Základní princip	19
2.5.1	BSI CMOS.....	20
2.5.2	Porovnání CMOS s technologií CCD.....	21
2.6	Parametry obrazových senzorů	22
2.6.1	Velikost snímače, formát snímače, crop factor.....	22
2.6.2	Rozlišovací schopnost	23
2.6.3	Odstup signálu od šumu	25
2.6.4	Sekvenční snímání.....	26
2.6.5	Dynamický rozsah.....	26
2.7	Obrazové senzory v Astronomii	27
3	Celoblohové snímání	28
3.1	Systémy UWFOV (Ultra-wide-field of view).....	28

3.2	Systémy celooblohového snímání	28
3.2.1	Alcor System	29
3.2.2	Observatoř Pierre Auger	29
3.2.3	Bolidové kamery.....	30
3.2.4	„Pi of the Sky“	32
3.2.5	WILLIAM.....	32
4	Parametry systémů UWFOV.....	35
4.1	Point Spread Function (PSF)	35
4.2	Senzitivita pixelu.....	36
5	Algoritmy interpolace obrazu.....	37
5.1	Metody vyhodnocení.....	37
5.1.1	FWHM (Full Width at Half Maximum)	37
5.1.2	RMSE (Root Mean Square Error).....	37
5.2	Vstupní data	38
5.3	Vliv zvětšení rastru.....	42
5.3.1	Princip.....	42
5.3.2	Aplikování na vstupní data, vyhodnocení	42
5.4	Vliv posunutí rastru.....	44
5.4.1	Princip.....	44
5.4.2	Aplikování na vstupní data, vyhodnocení	47
5.4.3	Vliv posunutí rastru - závěr	50
6	Závěr.....	51
7	Seznam použité literatury	52
8	Seznam obrázků	55
9	Seznam příloh	57

1 Úvod

Systémy celooblohového snímání jsou takové systémy, které umožňují záznam obrazových informací z rozsáhlé části oblohy a jejich následné vyhodnocení. Takováto zařízení nachází různá využití v oblasti astronomie. Konkrétní systémy a jejich využití jsou popsány ve třetí kapitole této práce (Celooblohové snímání).

Jedním z těchto systémů je WILLIAM, celooblohová kamera sestavená v České republice na ČVUT v Praze. Tento systém se primárně zabývá monitorováním povětrnostních podmínek pro pozorování hvězd teleskopem.

Hlavními částmi celooblohových systémů jsou vyhodnocující zařízení (např. PC) a kamera s vhodným obrazovým senzorem a širokoúhlým objektivem.

Obrazový senzor je nedílnou součástí každé digitální kamery. Je to elektronické zařízení, jehož úkolem je zachycení obrazové informace. Parametry senzorů mají velký vliv na kvalitu výstupního snímku. Druhá kapitola (Obrazový senzor) se věnuje obrazovým senzorům, jejich technologiím a důležitým parametrům.

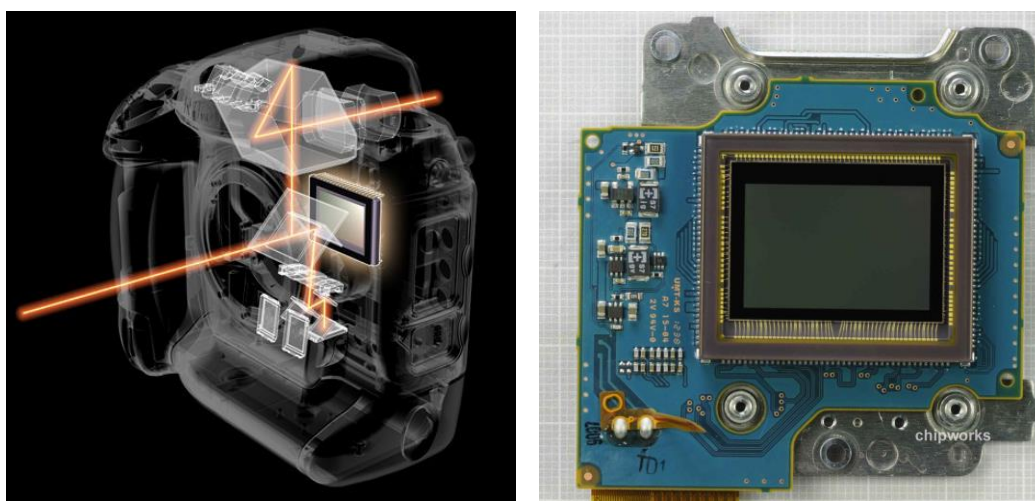
Jelikož celooblohové systémy využívají objektivy s velkým zorným úhlem, řadí se do skupiny systémů označených anglickou zkratkou UWFOV (Ultra-wide-field of view). Tyto systémy jsou zatíženy různými optickými vadami. K popsání těchto optických vad se využívá Point-Spread Funkce (PSF), která je popsána ve čtvrté kapitole.

Tato práce se zabývá vlivem vzorkování na konečném rastru obrazu na tvar PSF. Pro účely testování tohoto vlivu bylo využito několik snímků bodového zdroje světla z kamery systému WILLIAM. Z těchto snímků bylo vybráno několik pozic (střed, kraje, atd.), ze kterých je patrný různý vliv PSF. Poslední část této práce je věnována testování vlivu zvětšení a posunutí rastru na konečný tvar PSF a vyhodnocení výsledků.

2 Obrazový senzor

Obrazový senzor je polovodičová součástka, jejímž úkolem je zachycení informace o dopadajícím světle. K tomu využívá vnitřní fotoelektrický jev¹. Senzor se skládá z matice světlo-citlivých bodů (řádově miliony), v každém z těchto bodů se hromadí el. náboj odpovídající intenzitě dopadajícího světla na dané místo.

Senzor nachází využití v oblasti digitálního záznamu obrazu a videa. Využívá se u digitálních fotoaparátů, videokamer, u mobilních telefonů, scannerů, aj.



Obr. 1 Vlevo: řez digitálním fotoaparátem s vyznačeným průběhem světelného signálu a obrazovým senzorem. [1]

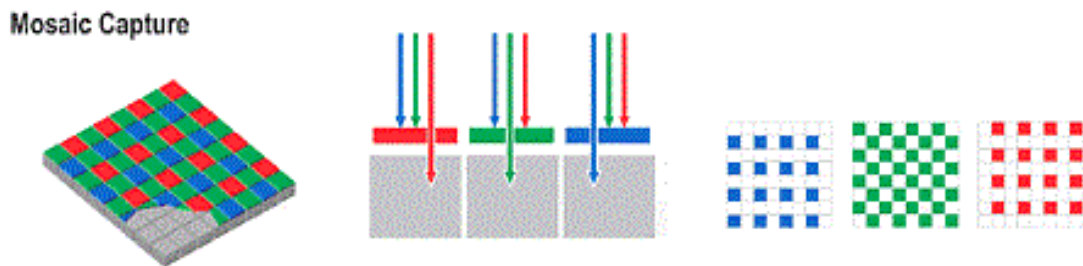
Vpravo: obrazový senzor CMOS (fotografie z rozebraného fotoaparátu Nikon D5200) [2]

¹ Fyzikální jev, při kterém energie dopadajícího elektromagnetického záření (např. rentgenové záření nebo viditelné světlo) vyráží elektrony z valenční vrstvy atomu dané látky. Rozlišuje se vnitřní a vnější fotoelektrický jev v závislosti na tom, zda se elektron uvolní uvnitř nebo vně (na povrch) dané látky. [3]

2.1 Barevné snímání

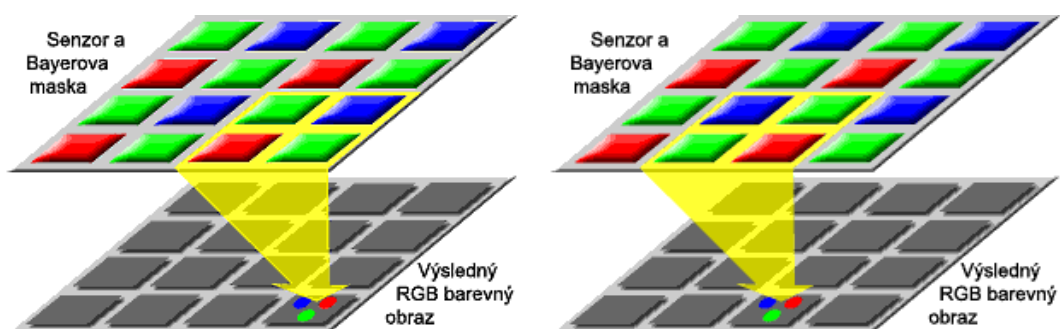
2.1.1 Zařízení s jedním obrazovým senzorem

Obrazový senzor je citlivý pouze na jas světla, nerozlišuje barevnou informaci. Nejpoužívanější metodou k získání barevného obrazu je užití tzv. Bayerovy masky, která se umísťuje před obrazový senzor. Tato maska se skládá ze tří druhů barevných filtrů uspořádaných v pravidelné mřížce. Každý filtr propouští pouze světlo v rozsahu vlnových délek odpovídajících červené, modré a zelené barvě (RGB filtry). Bayerova maska zajišťuje, že na každý obrazový bod dopadá pouze světlo jedné barvy. Bodů citlivých na zelenou barvu je 2x více oproti ostatním barvám. Zelená byla zvolena, jelikož lidské oko je nejvíce citlivé na tuto barvu. [4]



Obr. 2 - struktura Bayerovi masky [5]

Výsledná barva každého obrazového bodu se získá interpolací (dopočítáním) ze čtyř okolních bodů. [5]



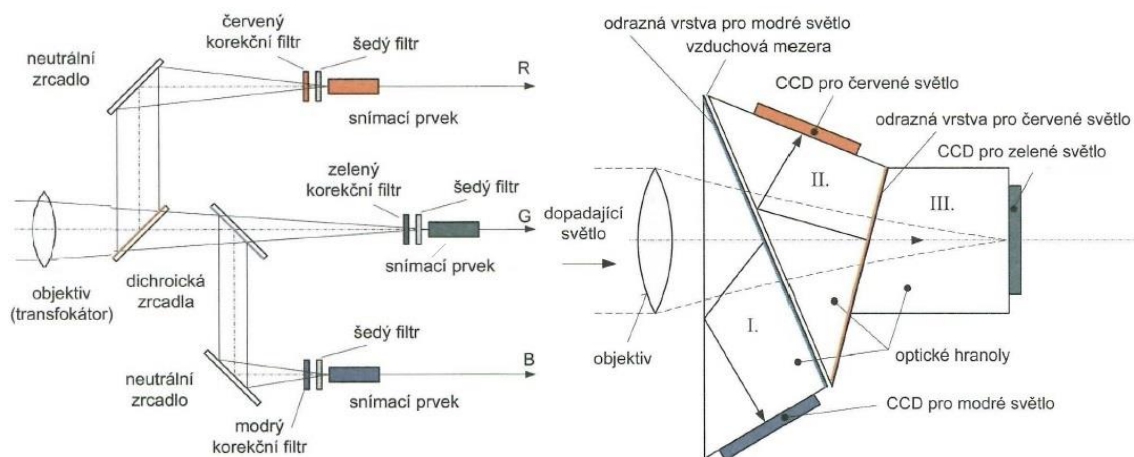
Obr. 3 - princip interpolace u Bayerovi masky [5]

2.1.2 Zařízení se třemi obrazovými senzory

Další možností získání barevného obrazu je využití 3 obrazových senzorů, přičemž každý z nich je citlivý na jednu barvu (RGB). Tato metoda se používá u poloprofesionálních a profesionálních tříčipových videokamer.

Za tímto účelem se využívá dvou principů rozdělení světla. První je barvo-dělicí soustava s dichroickými zrcadly. Světlo v tomto uspořádání prochází od objektivu soustavou dvou polopropustných zrcadel s nanesenými barevnými filtry, které rozdělí světlo na barevné složky pro 3 snímače. [6]

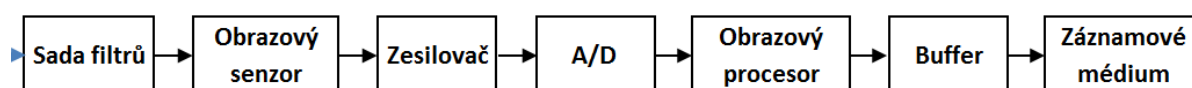
Druhý princip je tzv. barvo-dělicí hranol, který využívá rozdílného indexu lomu pro různé vlnové délky světla. Hranol se skládá z více skleněných částí, mezi kterými je tenká vzduchová mezera. Na každém rozhraní sklo-vzduch dochází k odrazu světla daných vlnových délek. Celá soustava je sestrojena tak, aby se nejprve oddělilo modré světlo, následně i červené světlo a tím v přímém paprsku zbyla jen složka zeleného světla. [6]



Obr. 4 - principy dělení světla dichroickými zrcadly (vlevo) a optickým hranolem (vpravo). [6]

2.2 Cesta signálu uvnitř zařízení

Obrazový senzor není jedinou důležitou součástí fotoaparátů či videokamer. Některé parametry závisí i na dalších částech řetězce zajišťujícího zaznamenání obrazové informace. Celý řetězec je znázorněný na zjednodušeném schématu (viz obr. 5). V následujících bodech budou popsány jednotlivé bloky.



Obr. 5 - zjednodušené schéma celého řetězce

2.2.1 Sada filtrů

Předtím, než dopadne světlo na aktivní plochu senzoru, projde řadou filtrů umístěných před senzorem. V první řadě se zde nachází filtry zabráňující průchodu infračerveného (IR) a ultrafialového (UV) záření. Tyto filtry se využívají, jelikož i neviditelné složky spektra mohou reagovat s jednotlivými pixely a tím by mohlo dojít ke vzniku tzv. falešné barvy. [4]

Dalšími filtry, které se používají je dvojice low-pass filtrů (horizontální a vertikální filtr – dolní propust). Tyto filtry slouží k tomu, aby zabránily vzniku chyby moiré (chyba, která vzniká při snímání pravidelného obrazce o podobných prostorových frekvencích jako je rozestup obrazových bodů senzoru). Low-pass filtry od určité hodnoty prostorové frekvence obraz rozostřují. V současné době se u některých zařízení tyto filtry již nepoužívají (např. firma Nikon) a odstranění vady moiré se provádí matematickým výpočtem. [4]



Obr. 6 vlevo – vada moiré u proužkované košile [7], vpravo – sada filtrů před obrazovým senzorem + čistící mechanismus [8]

2.2.2 Obrazový senzor, zesilovač

Nahromaděný náboj ze všech buněk obrazového senzoru se postupně vyčítá v podobě elektrického signálu k dalšímu zpracování. Tento signál dosahuje poměrně malých hodnot, a proto je nutné jej nejprve zesílit (u fotoaparátů velikost tohoto zesílení závisí na nastavené hodnotě ISO, u videokamer reguluje toto zesílení parametr GAIN)

2.2.3 A/D převodník

Následujícím krokem je digitalizace. K převodu z původního (analogového) signálu na digitální slouží n-bitový A/D převodník, který rozdělí původní signál na konečné množství úrovní (2^n úrovní, např. 12 bitový převodník má 4096 úrovní) a v každém časovém okamžiku, který je definován vzorkovací frekvencí, přiřadí signálu odpovídající hodnotu. Každá tato hodnota vyjadřuje velikost jasu daného bodu (např. pro 12 bitový převodník: hodnota 0 odpovídá černé a hodnota 4096 naopak bílé). [5]

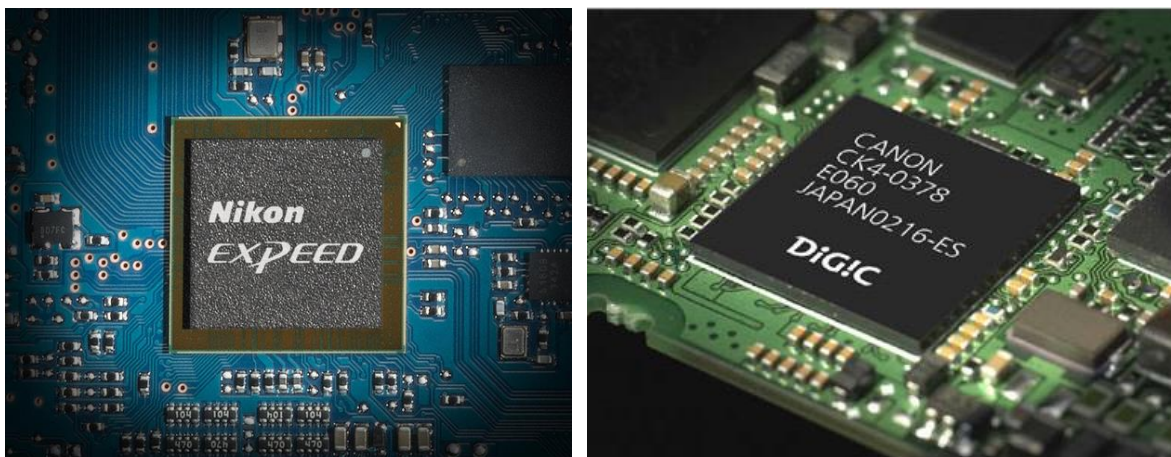
2.2.4 Obrazový procesor

Digitální signál se z převodníku přesouvá do obrazového procesoru. Zde dochází k interpolaci barev a kompresi, tedy zmenšení velikosti výsledného souboru. [5] Formát výstupního souboru závisí na nastavení.

Nejčastějšími volbami pro formát fotografie jsou JPEG (ztrátová komprese) či RAW (uložená surová data). V případě formátu JPEG lze v nastavení daného zařízení měnit parametry, např. velikost rozlišení, velikost komprese, volba barevného prostoru, vyvážení bílé barvy, aj. U formátu RAW dochází ke kompresi (JPEG) pouze za účelem vytvoření malého náhledového obrázku. [4]

Pro uložení videa se využívá více kompresních formátů. Běžně používanými jsou např. AVCHD, HDV či XDCAM. Většina těchto formátů je založena na kompresi MPEG2, resp. MPEG 4. [9]

Obrazový procesor musí zpracovat obrovské množství dat, navíc jsou zde veliké požadavky na rychlost zpracování. Proto se tento procesor zabývá pouze jediným úkolem, pro zajištění ostatních funkcí (prohlížení obrázků, komunikace s uživatelem – menu, komunikace s vnějším světem – konektory) jsou v zařízeních obsažené další procesory. [4]



Obr. 7 – ukázka Obrazových procesorů (vlevo Expeed značky Nikon [10], vpravo Digic od Canonu [8])

2.2.5 Vyrovnávací paměť, záznamové medium

Vyrovnávací paměť (buffer) zajišťuje odložení ukládání výsledného obrázku za účelem umožnění zaznamenat více snímků po sobě při sekvenčním snímání. Tato paměť má kapacitu pro desítky až stovky snímků (v závislosti na zvoleném formátu). [4]

Poslední částí tohoto řetězce je záznamové medium, kam se výsledný obraz, příp. video uloží.

2.3 Technologie obrazových senzorů

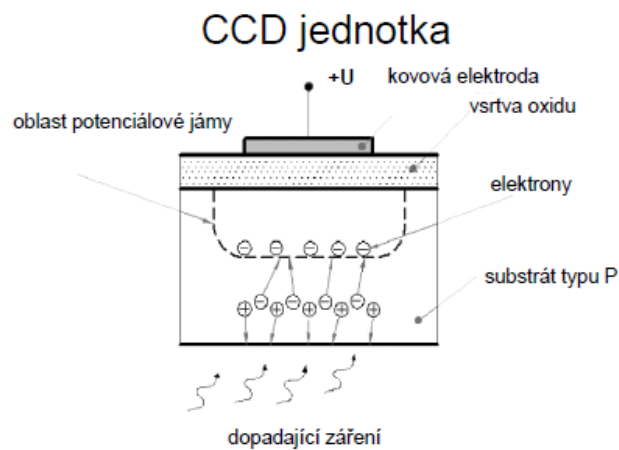
Rozlišují se 2 základní typy obrazových senzorů: CCD a CMOS. Obě technologie byly vytvořeny v průběhu 70. let 20. století v Bellových laboratořích. [11]

Ačkoli byla technologie CMOS vyvinuta dříve (1963), uplatnění pro běžné využití ve snímací technice dosáhla až počátkem 90. let, důvodem byla horší obrazová kvalita oproti druhé technologii. Senzory CCD byly vyvinuty v roce 1969 a již v roce 1975 se prvně začaly používat v televizních kamerách, kde postupně úplně nahradily elektronky.

S rozvojem výroby polovodičových součástek dochází k výraznému zlepšení senzorů CMOS [12] a v současné době je již kvalita obou technologií srovnatelná (rozdíly obou technologií budou popsány v kapitole 2.5.2).

2.4 CCD (Charge-Coupled Device) – Základní princip

Označení prvku CCD vyplývá z podstaty jeho činnosti jako obvodu s vázanými náboji. Jedná se o integrovaný obvod vyrobený technologií MOS (kovová elektroda M, oxidová izolační vrstva O a vrstva polovodiče S). Princip činnosti je založen na schopnosti uchovávat a přemísťovat elektrický náboj z jednotlivých buněk. [6]

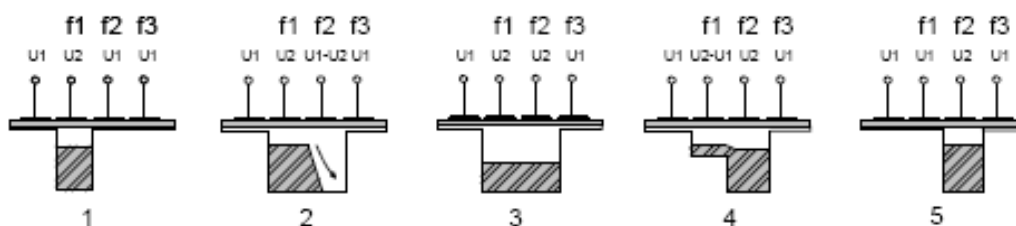


Obr. 8 - jedna buňka senzoru CCD [6]

Na obrázku je znázorněn způsob převodu světelného signálu na elektrický náboj v jedné buňce senzoru CCD. Přivedením kladného napětí na elektrodu budou z oblasti pod elektrodou (Substrát typu P – kladné majoritní nosiče náboje) odpuzovány kladné nosiče náboje (díry). V této oblasti vzniká ochuzená oblast (tzv. potenciálová jáma), v níž není téměř žádný elektrický náboj.

Nyní může být senzor vystaven vlivu světelného záření. Dopadající záření způsobuje vnitřní fotoelektrický jev a vznikají volné páry elektron-díra. Působením kladného napětí elektrody jsou volné elektrony přitaženy do potenciálové jámy. Množství záporných nábojů v jámě odpovídá velikosti osvětlení daného obrazového bodu. [6]

Následujícím krokem je postupný přesun elektrického náboje ze všech buněk až do výstupní svorky senzoru, kde se všechny náboje zařadí za sebe a vytvoří tak obrazový signál.



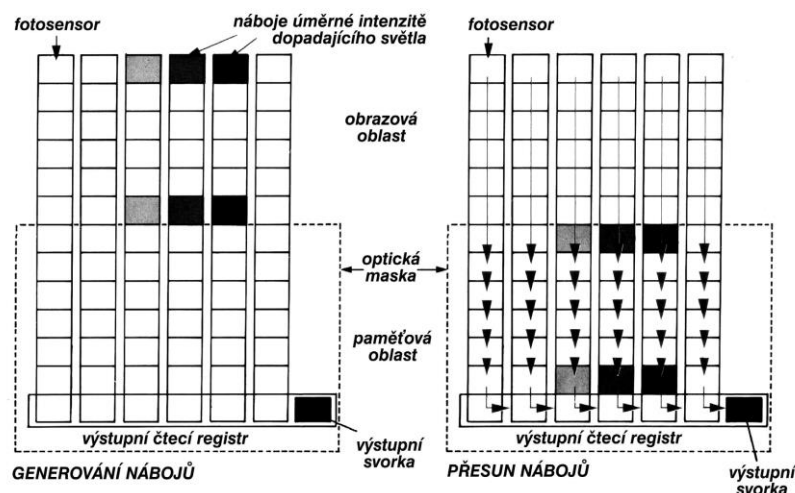
Obr. 9 – Mechanismus posuvu náboje mezi dvěma buňkami senzoru

Mechanismus posuvu náboje využívá okolních buněk. Přivedením stejného napětí na sousední buňku se docílí spojení jejich potenciálových jam a následným snižováním napětí na původní buňce dojde ke kompletnímu přesunu náboje do druhé potenciálové jámy. Uvedený postup se opakuje, dokud se náboj nedostane na požadovaný výstup. [6]

2.4.1 Systémy přesunu náboje – FF, FT, IT, FIT

Senzory CCD se dělí na více typů podle systému přesunu náboje. Nejjednodušší systém se nazývá **Full Frame** (FF). Tento systém využívá celou plochu světlocitlivých buněk senzoru k zaznamenání informace o dopadajícím světle. Zároveň se tyto aktivní buňky používají jako posuvné registry ve svislém směru pro přesun náboje do posledního řádku tzv. výstupního čtecího registru. V tomto registru jsou jinak strukturované elektrody pro přesun náboje za účelem horizontálního přesunu až do výstupní svorky. [13]

Dalším systémem přesunu náboje je **Frame Transfer** (FT). Senzor fungující na principu FT se skládá ze dvou hlavních částí – snímací a paměťová oblast. Snímací část opět využívá celou plochu aktivních buněk senzoru. Následuje postupný posun náboje ve svislém směru do paměťové oblasti. Tato část je již zakryta optickou maskou a slouží jako paměť pro náboje před jejich vyčtením. Přesun ze snímací do paměťové části probíhá v pevně definovaný moment – v průběhu snímkového zatemňovacího intervalu. V následující okamžik se ve světlocitlivé části již snímá informace pro další snímek, zatímco z paměťové části se postupně vyčítá náboj do výstupní svorky. [6]



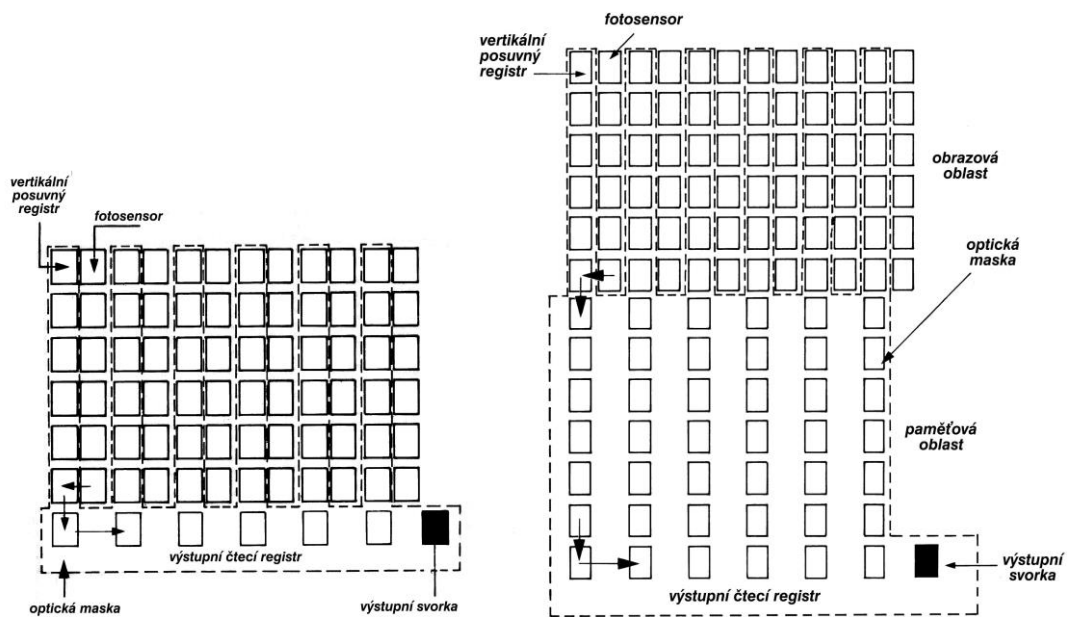
Obr. 10 - Princip snímače CCD typu FT

Největší nevýhodou těchto metod je fakt, že se buňky v aktivní oblasti využívají jak pro hromadění náboje, tak i pro jeho přesun. V důsledku toho může dojít ke vzniku chyby tzv. vertical smearing neboli mazání obrazu ve svislém směru. Tato chyba se projevuje při snímání velmi světlého předmětu. V takový moment vzniká v přesvětleném místě nadměrné množství nábojů. Tyto náboje se přidávají do okolních buněk, které jsou s přesvětlenými buňkami propojeny svislým posuvným registrem. Ve výsledném obraze se tato chyba projeví jako svislý světlý pruh. [6] Aby se omezila tato vada využívá se závěrka. Systém FF využívá mechanickou závěrku, která v každém okamžiku přesunu náboje zakrývá světlocitlivou část. V systému FT se využívá „elektronická závěrka“ (takto se nazývá způsob využití oblasti přikryté optickou maskou). [13]

Lepší ochranu oproti smearingu zajišťuje třetí systém přesunu náboje – **Interline Transfer** (IT). Oproti předchozím metodám je zde rozdělena aktivní část. Mezi sloupce světlocitlivých buněk jsou vloženy sloupce svislých posuvných registrů, které jsou přikryty tenkou optickou maskou. [13]

V jediném momentu se zaznamenaný signál ze všech buněk přesune do odpovídajících vedlejších registrů. V průběhu snímání dalšího snímku se postupně přesouvají náboje do výstupní svorky. Nevýhodou této metody je snížení velikosti aktivní plochy na polovinu, resp. poloviční rozlišení senzoru. Druhou nevýhodou je fakt, že chyba smearing není odstraněna úplně. Ke smearingu může dojít při přesvětlené scéně, kdy mohou elektrony proniknout z přeplněné buňky do oblasti posuvného registru. [6]

Z tohoto důvodu byl sestrojen další systém – **Frame Interline Transfer (FIT)**. Tento systém vznikl kombinací předchozích metod. Využívá jak rozdělení aktivní oblasti na část snímací a část posuvných registrů, tak i paměťovou oblast umožňující uložení výstupního signálu bez rušení. Na rozdíl od metody IT se signál z posuvných registrů přesune rychleji do paměťové oblasti, která není náchylná na nežádoucí náboje. Díky tomu je metoda FIT mnohem odolnější proti smearingu. [6]

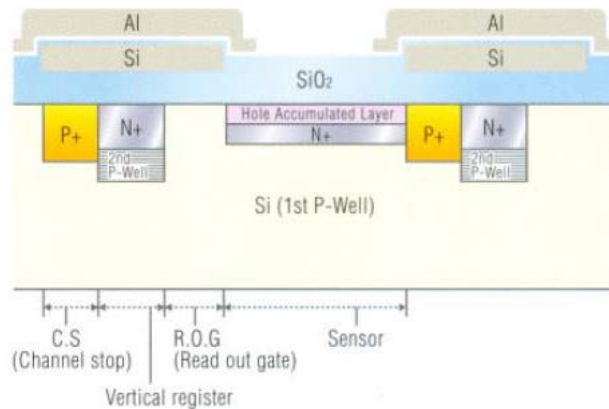


Obr. 11 - Principy snímače CCD: typ IT (vlevo) a typ FIT (vpravo)

2.4.2 HAD CCD, Super HAD CCD

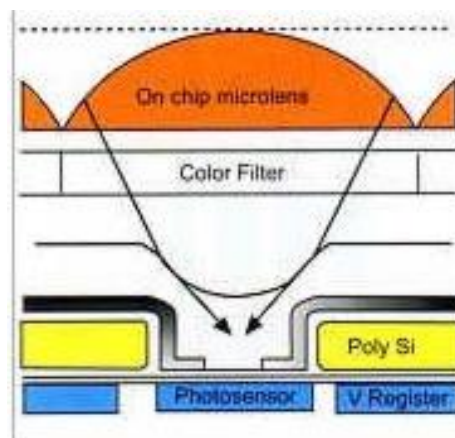
Ve skutečnosti je struktura prvků CCD podstatně složitější oproti zobrazeným schématickým obrázkům. Skutečný prvek obsahuje navíc různá hradla (řídící, oddělovací, čtecí, hradla pro odvod přebytečného náboje). Některé z těchto hradel jsou umístěny před aktivní oblastí senzoru. V důsledku toho má obrazový prvek sníženou jak světelnou citlivost, tak i rozlišovací schopnost. [6]

Za účelem vylepšení vlastností senzoru byly vyvinuty další výrobní technologie. Například **HAD CCD** (Hole Accumulated Diode) Tato technologie se liší od základního principu tím, že u každé světlocitlivé buňky je k potenciálové jámě přidána silně obohacená vrstva substrátu typu P, která zajišťuje odvádění přebytečného náboje vzniklého při nadměrném přesvětlení. Touto úpravou je možné nahradit hradla pro odvod nadbytečného náboje, čímž je zajištěno zvětšení rozlišení senzoru. [6]



Obr. 12 – technologie HAD CCD [14]

Za účelem zvětšení světelné citlivosti senzoru byla vynalezena další technologie. **Super HAD CCD** spočívá v tom, že nad každou buňku senzoru HAD CCD je umístěna dvojice miniaturních čoček, které soustředí světelné paprsky na světlocitlivou část buňky. [15]



Obr. 13 - technologie Super HAD CCD [14]

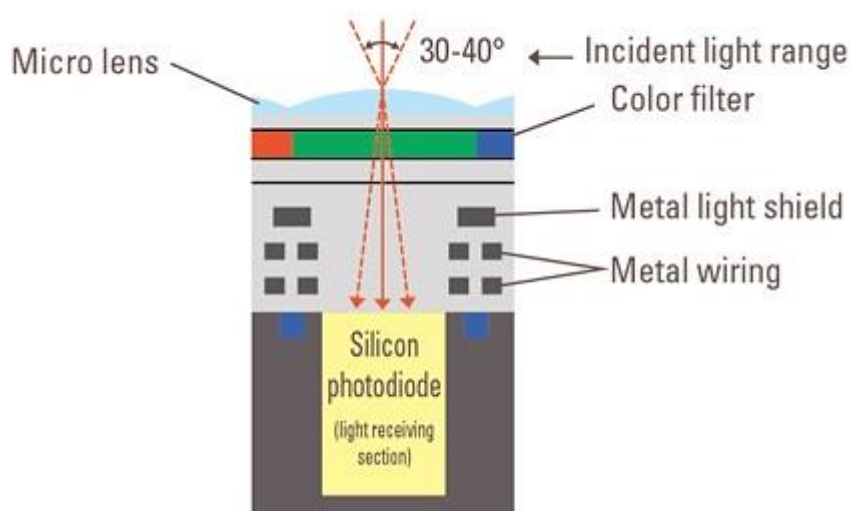
2.5 CMOS (Complementary Metal Oxide Semikonduktor) – Základní princip

Princip je založen na technologii CMOS, tuto zkratku lze přeložit jako doplňující se kov-oxid-polovodič. Tento název se vztahuje k symetricky se doplňujícím tranzistorům MOSFET typu n a p, [16] těchto tranzistorů se využívá k postupnému vyčítání náboje.

Světlocitlivou část zde zajišťuje fotodioda, ve které se v závislosti na míře osvětlení generuje elektrický náboj (na základě vnitřního fotoelektrického jevu [3]).

Ve výsledku se tedy každá buňka obrazového snímače CMOS skládá z fotocitlivého prvku (fotodiody) a prvků zajišťujících přesun náboje do oblasti dalšího zpracování. V současné době se využívá struktura APS (active pixel sensor), která navíc v každé buňce obsahuje zesilovač. [17]

Množství prvků zajišťujících přesun nebo zesílení náboje způsobuje zmenšení světlocitlivé plochy v každé buňce. Proto se přidává nad každou buňku mikročočka zajišťující větší světelnou citlivost. [18]



Obr. 14 – schématické znázornění jedné buňky senzoru CMOS [18]

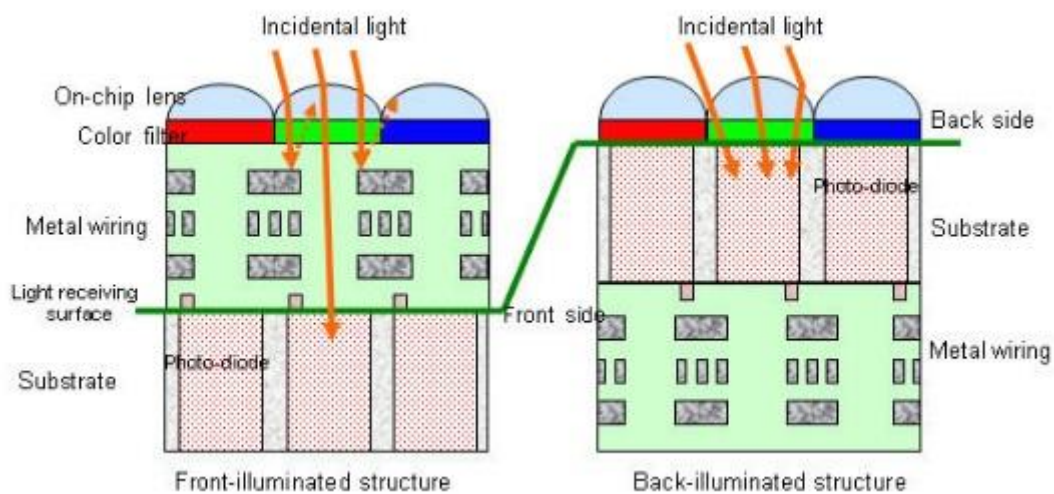
Obdobně jako u senzorů CCD existuje celá řada modifikací struktury senzoru CMOS. Různí výrobci vyvíjejí nové technologie za účelem zlepšení vlastností senzoru. Jednou z takovýchto úprav je tzv. BSI CMOS, za zmínku také stojí Organic CMOS či FOVEON X3.

2.5.1 BSI CMOS

Technologie upravující proces výroby standartních obrazových snímačů CMOS. Anglická zkratka BSI znamená BackSide-Illumination (v překladu zpětné osvětlení). Ve standartních CMOS snímačích je nad světlocitlivou vrstvou ještě vrstva tranzistorů pro přesun a zesílení náboje, v technologii BSI je toto uspořádání obráceně. [19]

U snímačů CMOS může docházet k odrazům světla od tranzistorů (metal wiring) do okolních buněk („míchání barev“), proto nad každou fotodiodou musí být tenký světelný štít. Obrácené pořadí vrstev již nepožaduje světelný štít, což zajišťuje větší světelnou citlivost senzoru a s tím související menší náchylnost na šum a také větší dynamický rozsah. [19]

Tato technologie byla poprvé představena v roce 2007 společností OmniVision. Komerčně byla rozšířena v roce 2009, kdy společnost Sony začala vyrábět první hromadně vyráběný BSI snímač, který byl nazván Exmor R. [20]



Obr. 15 – Porovnání technologií CMOS a BSI CMOS [19]

2.5.2 Porovnání CMOS s technologií CCD

Obrazové snímače CMOS mají podobnou strukturu jako paměti či mikroprocesory, proto tyto snímače mají menší výrobní náklady a také mnohem jednodušší proces výroby oproti CCD. Dříve nebylo možné vytvořit snímače CMOS s dostatečným rozlišením, avšak to se změnilo s rozvojem technologie výroby polovodičových součástek. [12]

Další výhodou oproti snímačům CDD je velikost napájecího napětí. Zatímco u CCD je vyžadované velké napětí pro postupný přesun náboje z jedné buňky na druhou, u snímačů CMOS se využívá malého napětí, pro otevření přechodu v transformátoru. Tato metoda také umožňuje rychlejší přesun náboje. [12]

Nevýhodou snímačů CMOS je větší šum signálu způsobený kolísáním výkonu fotodiod a tranzistorů obsažených ve snímači. Kolísání výkonu způsobuje rozdílné výkony mezi jednotlivými součástkami, což se projevuje zkreslením (šum) výsledného signálu. Za účelem redukce šumu vytvářejí výrobci různé technologie. Například společnost Canon využívá principu, který zaznamenává vzniklý šum v buňce ještě před expozicí a tuto hodnotu následně odečte od nahromaděného náboje. [12]

Porovnání obou technologií je znázorněno v následující tabulce:

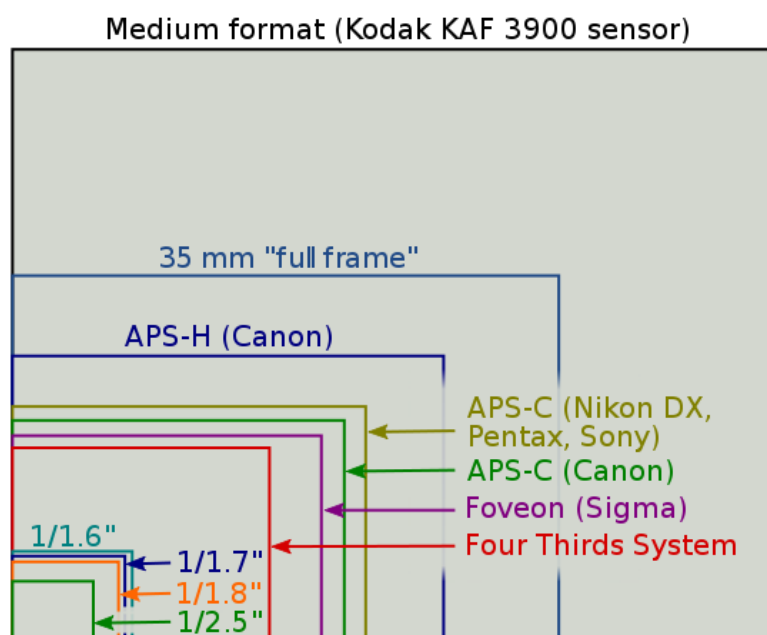
Porovnání technologií		
<i>parametry</i>	CCD	CMOS
Cena výroby	vysoká	nízká
Spotřeba	vysoká	nízká
Rozlišení	vysoké	vysoké
šum	nízký	vyšší
dynamický rozsah	vysoký	nižší
rychlost	nižší	vysoká

Obr. 16 – Tabulka porovnání technologií CCD a CMOS

2.6 Parametry obrazových sensorů

2.6.1 Velikost snímače, formát snímače, crop factor

Jedním z hlavních parametrů obrazových sensorů je velikost jejich světlocitlivé plochy. Jedná se o důležitý parametr, který má především vliv na šumové vlastnosti senzoru. [21] Sensory lze podle jejich velikosti dělit do mnoha skupin. Tyto skupiny se označují jako tzv. formáty snímače.



Obr. 17 - Zobrazení ploch různých formátů obrazových sensorů [8]

U malých sensorů (využívaných u kompaktních fotoaparátů či mobilních telefonů) se využívá značení v palcích, respektive jejich zlomcích (např. 1/2,5", 1/1,7")

Větší senzory se značí jinak. Nejčastěji se používají tato označení (seřazené od nejmenších po největší): 4/3, APS-C, APS-H, Full Frame a Medium Format.

Jako základní formát lze považovat Full Frame. Toto označení nesou obrazové senzory, jejichž velikost přibližně odpovídá velikosti fotografického filmu (36x24mm). [21] Fotoaparáty s Full Frame senzorem mohou využívat staré objektivy (určené k tělům fotoaparátů zaznamenávajících na film), aniž by se změnily jejich optické vlastnosti (ohnisková vzdálenost, šířka záběru). V případě užití starého objektivu k zařízení s menším obrazovým senzorem dochází ke změně ohniskové vzdálenosti a šířky záběru výsledného obrazu. Tato vlastnost je popsána parametrem označeným jako crop faktor. [5]

Hodnota crop faktoru se určí jako poměr uhlopříček 35 mm snímače a vybraného snímače. Tato hodnota vyjadřuje kolikrát se zvětší (příp. zmenší) ohnisková vzdálenost pro daný obrazový senzor. [4]

Sensor Name	Medium Format	Full Frame	APS-H	APS-C	4/3	1"	1/1.63"	1/2.3"	1/3.2"
Sensor Size	53.7 x 40.2mm	36 x 23.9mm	27.9x18.6mm	23.6x15.8mm	17.3x13mm	13.2x8.8mm	8.38x5.59mm	6.16x4.62mm	4.54x3.42mm
Sensor Area	21.59 cm ²	8.6 cm ²	5.19 cm ²	3.73 cm ²	2.25 cm ²	1.16 cm ²	0.47 cm ²	0.28 cm ²	0.15 cm ²
Crop Factor	0.64	1.0	1.29	1.52	2.0	2.7	4.3	5.62	7.61
Image									
Example									

Obr. 18 – Tabulka porovnávající velikost senzoru, plochu senzoru a crop faktor v závislosti na formátu. [21]

2.6.2 Rozlišovací schopnost

S rozlišovací schopností obrazového senzoru souvisí vícero parametrů, které jsou popsány níže.

2.6.2.1 Celkový a efektivní počet pixelů

Pixel („picture element“ - prvek obrazu) je označení pro jeden obrazový bod snímače. [1] Obrazový snímač se skládá z milionů takovýchto bodů. **Celkový počet pixelů** vyjadřuje celkové množství pixelů nacházejících se na ploše obrazového snímače (velikost se udává v Mpix = megapixelech), avšak v této hodnotě se nachází i pixely, které netvoří výsledný snímek (fotografie nebo videa). Proto je pro uživatele důležitější parametr **efektivní počet pixelů**, který počítá pouze aktivní buňky tvořící výsledný snímek. Součástí této hodnoty jsou i pixely určené pro technické účely (například okrajové body sloužící k Bayerově interpolaci). [5]

2.6.2.2 Maximální rozlišení

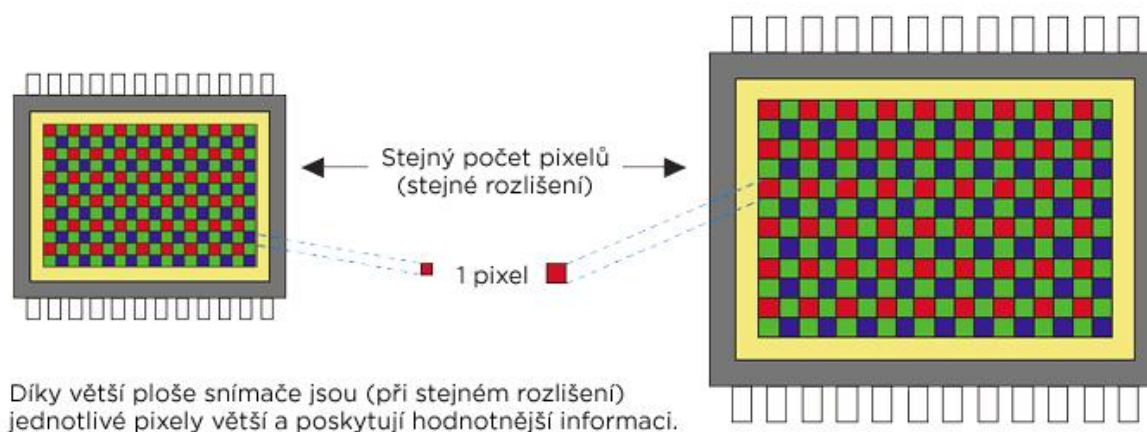
Maximální počet sloupců x řádků výsledného snímku, který dané zařízení může vytvořit (např. fotoaparát s efektivním rozlišením 10.2 Mpix má Max. rozlišení 3872x2592

pixelů). Vynásobením těchto dvou hodnot (sloupce x řádky) vyjde max. plocha fotografie, tato hodnota je blízká efektivnímu počtu pixelů ($3872 \times 2592 = 10\,036\,224$ pixelů). [5]

Počet megapixelů se stal u fotoaparátů standardním obchodním tahákem. [1] Vysoké rozlišení je sice dobré pro velkoformátové fotografie či ořezy, ale na úkor velikého rozlišení se zmenšuje velikost obrazových bodů senzoru.

2.6.2.3 Velikost 1 pixelu

Důležitý parametr, který souvisí s velikostí obrazového snímače a jeho rozlišením. Čím větší je velikost každého pixelu obrazového senzoru, tím senzor dosahuje větší světelné citlivosti, a tím i lepších šumových vlastností. [22] Velikosti pixelů jsou obvykle v řádu jednotek mikrometrů (např. běžné kompakty mají okolo $2 \times 2 \mu\text{m}$, naopak nejlepší zařízení mají velikost okolo $5 \times 5 \mu\text{m}$). [1]



Obr. 19 – Obrázek znázorňující velikost pixelů u dvou různě velkých senzorů, se shodným rozlišením [22]

2.6.2.4 Poměr stran (Aspect Ratio)

Poměrem stran se rozumí poměr delší strany snímku k její kratší straně. [4]

Velikosti těchto poměrů se liší. U fotografie se nejčastěji využívá poměrů 15:10 resp. 3:2 (kinofilm, digitální zrcadlovky), 4:3 nebo 16:9 (kompaktní fotoaparáty, mobilní telefony). V televizi se využívá formátu 16:9. V případě natáčení filmů se využívají i větší poměry např. 21:9.

2.6.3 Odstup signálu od šumu

2.6.3.1 Šum

Šumem rozumíme náhodné, nepředvídatelné a nežádoucí signály. U snímání obrazu se jedná o nežádoucí změny snímaného obrazu. Zašuměná fotografie pak vypadá jako zrnitá, s náhodnými barevnými body. Faktorů, které se podílejí na vzniku šumu, je celá řada a pouze některé z nich lze ovlivnit. [23]

Základním typem šumu je tzv. náhodný šum, jeho příčinou jsou tepelné změny v elektronických součástkách a kolísání počtu fotonů dopadajících na buňky senzoru (souvislost s kvantovou povahou světla). [23] Na senzoru dochází také ke vzniku temného šumu. V důsledku tepelné energie se může v buňce vygenerovat elektrický náboj, aniž by na světlocitlivé buňky dopadalo světlo. [23] Hodnota šumu tedy roste s teplotou [5] a také s délkou expozičního času. [4]

V další části fotografického řetězce, v zesilovači, dochází ke vzniku zesilovacího šumu. Současně se zesílením užitečného signálu dochází také k zesílení šumu stejnou hodnotou. Pro nízké hodnoty zesílení ISO 100, 200 je u současné techniky šum téměř neznamatelný, s rostoucími hodnotami zesílení roste i patrnost šumu. [4]

K jistému zkreslení hodnoty (šum) výsledného signálu dochází také v A/D převodníku, kde se analogový signál převede na konečný počet úrovní. V tomto kroku dochází k zaokrouhlování hodnot a tím ke vzniku kvantizačního šumu.

2.6.3.2 SNR (Signal to Noise Ratio)

Hodnota vzniklého nežádoucího náboje (šumu) je malá oproti hodnotě užitečného signálu. Šum se nejvíce projevuje na podexponovaném snímku, ve stínech nebo v tmavých místech, kde je nižší hodnota užitečného signálu. Z tohoto důvodu jsou lepší senzory s většími pixely, jelikož na každý pixel dopadá více světla a tím je větší hodnota užitečného signálu oproti šumu.

Poměru užitečného signálu a šumu se říká odstup signál/šum a označuje se anglickou zkratkou SNR. Čím větší je tento poměr, tím méně je viditelný šum na snímku. [4]

2.6.4 Sekvenční snímání

Parametr, který vyjadřuje, kolik snímků za sekundu je dané zařízení schopno zaznamenat. Počet snímků záleží především na kapacitě vyrovnávací paměti (bufferu). [24] Dalšími faktory, které mohou ovlivnit toto množství, jsou rychlost vyčítání náboje z obrazového senzoru a rychlost mechanické případně elektronické závěrky. [4]

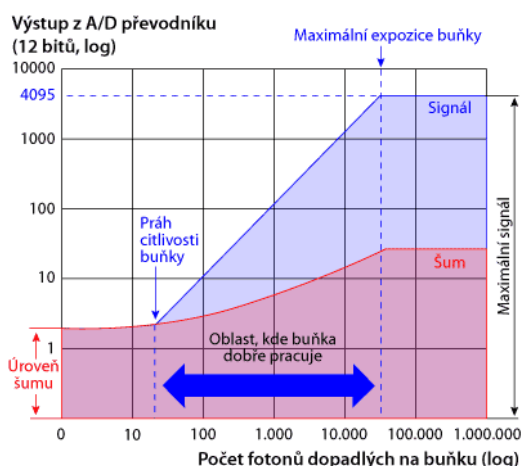
Běžné fotoaparáty dosahují okolo 2 snímků za sekundu, DSLR obvykle mohou zaznamenat 3-5 snímků za sekundu a přístroje určené pro reportéry fotí až 8-10 snímků za sekundu. [24]

2.6.5 Dynamický rozsah

Dynamický rozsah je důležitý parametr, který vyjadřuje schopnost zařízení vykreslit jasná i tmavá místa (kontrast = rozsah jasů) scény. [4] Obecně lze dynamický rozsah definovat jako poměr mezi nejvyšší a nejnižší zaznamenanou intenzitou světla. V praxi se nejčastěji vyjadřuje v relativních jednotkách EV. [25]

Velikost dynamického rozsahu závisí na tom, kolika bitový A/D převodník má dané zařízení. Více bitů A/D převodníku zajišťuje rozdělení signálu na více úrovní. [25] Problém nastává v dolní a horní úrovni signálu. V horní úrovni při dosažení maximální expozice buňky dochází k přexponování („přepalu“), [5] zatímco dolní hranice je ovlivněna šumem, který znehodnocuje část obrazové informace. [25]

V praxi se dynamický rozsah špatně zjišťuje, obvykle není uváděn v parametrech. [4]



Obr. 20 – závislost úrovně signálu a šumu na době expozice [5]

2.7 Obrazové senzory v Astronomii

Výzkum a aplikace obrazových senzorů představuje po vynálezu dalekohledu (1609, Galileo Galilei) a fotografického filmu (1839, Louis Daguerre) další důležitý milník v astronomii. [26]

V současné době jsou obrazové senzory nedílnou součástí každého astronomického zařízení pro záznam fotografie či videa oblohy. Využití zařízení s obrazovým senzorem v astronomii poskytuje značné výhody oproti filmovému materiálu. Největší výhodou moderních obrazových senzorů je velká světelná citlivost.

Mezi další výhody patří lineární odezva na světlo (v rámci dynamického rozsahu kamery) [26] a stálé mechanické rozměry senzoru. Tyto vlastnosti umožňují precizní fotometrická měření (na snímku lze měřit polohu hvězdy s přesností asi 1/10 úhlového rozměru jednoho pixelu). [13]

Velikou výhodou je také fakt, že pořízené snímky jsou rovnou v digitální podobě a mohou tedy být téměř okamžitě přeposlány do PC k provedení patřičných měření (na rozdíl od focení na fotografické desky, kde se pořízený obraz musel digitalizovat pro účely zpracování dat v PC). [13] Digitální snímky mohou být snadno archivovány, rozmnožovány, publikovány apod.

Za účelem zvětšení dynamického rozsahu lze výsledný obraz vytvořit složením z více snímků s kratší dobou expozice. Tato metoda umožňuje zobrazit na jediném snímku jasné objekty spolu s mnohem méně zářivějšími objekty (např. vzdálené galaxie). [13]

Přes výše jmenované výhody užití obrazových senzorů se stále v některých oblastech astronomie využívá fotografického filmu. Například v bolidové kameře (viz kapitola 3.2.3) se využívá kombinace obou technologií. [27]

3 Celoblohové snímání

3.1 Systémy UWFOV (Ultra-wide-field of view)

UWFOV jsou zobrazovací systémy s rozsáhlým zorným úhlem. Širokého záběru dosahují využitím zařízení s širokouhlým objektivem, případně složením obrazu z vícero zařízení. Tyto systémy nachází využití v oblastech mikroskopického snímání, bezpečnostních kamer, a také v oblasti celoblohového snímání. UWFOV systémy mají vysoké požadavky na kvalitu obrazu a prostorové rozlišení. Tyto systémy jsou zatíženy různými optickými vadami. Mnohé z těchto vad jsou úhlově-závislé. K popsání těchto optických vad se využívá Point-Spread Funkce (PSF). [28]

3.2 Systémy celoblohového snímání

UWFOV systémy mají různá využití v oblastech astronomie a astrofyziky, jejich veliký zorný úhel umožňuje pozorování, resp. snímání rozsáhlé části oblohy, proto se tyto systémy nazývají celoblohové. Zařízení tohoto typu využívají profesionální observatoře, meteorologické stanice, university i amatérští astronomové. [29]

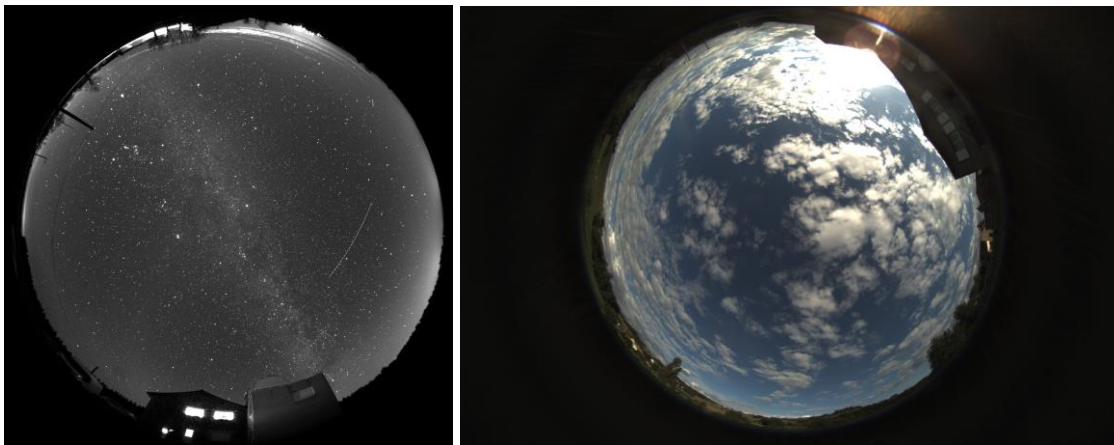
Vývojem takovýchto zařízení a k nim náležícího softwaru (k detekci hvězd a jiným funkcím) se zabývá několik světových firem zaměřujících se na astronomické produkty. Mezi takové společnosti patří např. Moonglow Technologies. [30] Tato firma sice již skončila (v roce 2015) s vývojem jejich kamery, avšak na jejich webové stránce je zajímavá možnost zobrazení aktuálních snímků oblohy z různých observatoří (využívajících jejich techniku) téměř po celém světě. [31] Velký prostor vývoji celoblohových kamer a softwaru věnuje společnost Alcor System. [32]

Některé speciální celoblohové systémy vyžadují unikátní přístup i technologii. Takový systém využívá například Astronomický ústav AV ČR, který pomocí UWFOV kamery sleduje jasné meteory – bolidy. [33] Další speciální kamery využívá polský projekt „Pi of the Sky“, jehož úkolem je pozorování gama záblesků (gamma ray bursts). [34] Jiným systémem je celoblohová kamera sestavená v České republice na ČVUT. Tento systém je nazván „WILLIAM“ a primárně se zabývá monitorováním povětrnostních podmínek. [35]

3.2.1 Alcor System

Tato společnost sídlící ve Francii vytvořila již tři řady celooblohových kamer, každá z těchto řad se dělí ještě na několik modelů lišících se v parametrech (barevné / černobílé snímání, FOV 180°x150°, 180°x180° či 185°x185°, celkové rozlišení a množství aktivních pixelů) [32]

Kamery z nejlevnější řady „ALPHEA“ jsou osazeny obrazovým senzorem BSI-CMOS, zatímco zbylé dvě řady „OMEA“ a „EUDA“ jsou vybaveny senzorem CCD. Všechna tato zařízení poskytují kvalitní snímky denní i noční oblohy. [32]



Obr. 21 – Ukázky fotek z celooblohových zařízení společnosti Alcor System [32]

3.2.2 Observatoř Pierre Auger

Mezinárodní observatoř Pierre Auger [36] se zabývá detekcí stop vysokoenergetických částic (10^{19} až 10^{20} eV) kosmického záření. Tyto částice jsou velmi vzácné, proto je observatoř rozprostřena po velké ploše západní Argentiny. [37]

Observatoř používá dvě nezávislé metody detekce částic. První metoda detekuje vysokoenergetické částice zaznamenáváním jejich interakcí s vodou v nádržích (1600 vodních nádrží) umístěných na zemském povrchu.

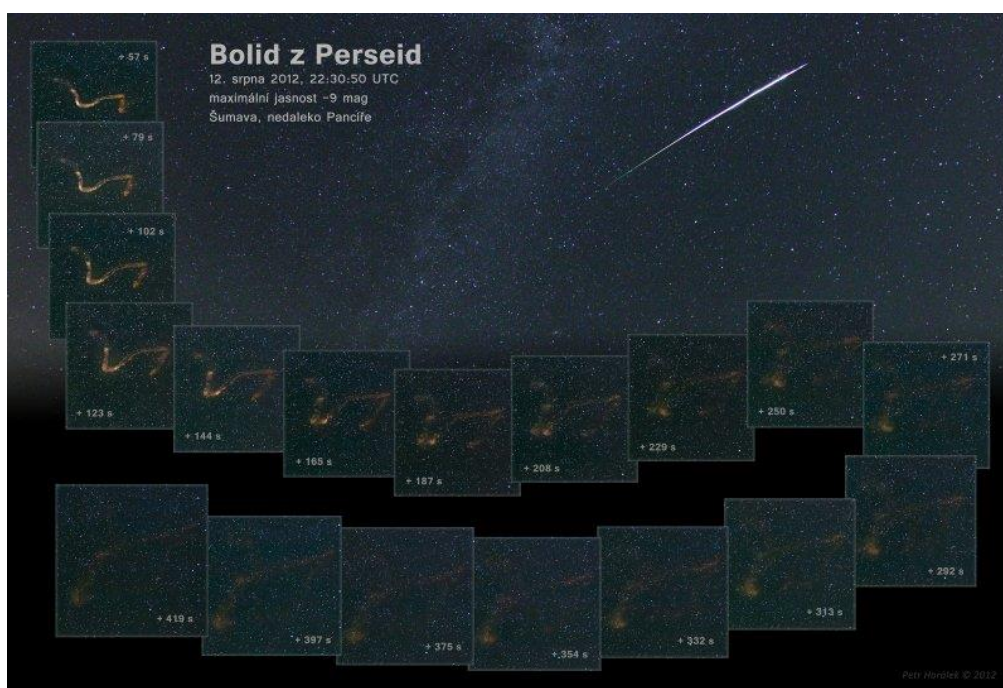
Druhá metoda zaznamenává vývoj spršky sekundárních částic při průletu atmosférou měřením emise ultrafialového světla. Matice zrcadel zaostřuje UV záblesky na fotonásobiče. Tyto fotonásobiče jsou citlivé na intenzivní osvětlení, proto byl sestaven (na základě návrhu z Palackého Univerzity v Olomouci) společností Moravské přístroje [37]

system celooblohové kamery, jehož úkolem je ochrana fotonásobičů. Tento systém monitoruje oblohu a v případě příliš intenzivního světla v určitém směru zastíní odpovídající fotonásobiče, aby se zabránilo jejich poškození. V tomto systému je využita CCD kamera s označením G1 s objektivem „rybí oko“. [37]

3.2.3 Bolidové kamery

Astronomický ústav Akademie věd České republiky (Asu) [33] se již řadu let (od roku 1951) věnuje studiu meteorů. Bolidy, tedy jasné meteory, jsou sledovány pomocí bolidových kamer. Jedná se o celooblohové kamery, které fungují zcela automaticky.

Z fotografií zaznamenaných bolidů (viz obr. níže) Asu vyhodnocuje jejich dráhy a vlastnosti. Na základě těchto informací lze i vypočítat předpokládané místo dopadu meteoritu. Pro úspěšné vyhodnocení dráhy bolidu je zapotřebí jeho záznam minimálně ze dvou kamer. Proto je vytvořena tzv. bolidová síť, která pokrývá celou střední Evropu. Asu dosahuje řady významných objevů a má důležitou roli v oblasti sledování bolidů, jejich vlastností a vývoji nových bolidových kamer. V posledních letech se mimo jiné angažuje ve výstavbě nové bolidové sítě na jihozápadě Austrálie. [33]



Obr. 22 – Ukázka zaznamenaného bolidu a vývoj jeho stopy [38]

Automatická bolidová kamera je vybavena objektivem typu rybí oko a zaznamenává na plochý film (9x12cm), který je pomocí podtlaku udržován v ohniskové rovině. Nad deskou s filmem je umístěn rotující sektor. Rozdělení čáry bolidu na výsledném snímku pomocí sektoru umožňuje výpočet rychlosti zaznamenaného bolidu. [33]

Součástí tohoto systému je jednoduchá meteorologická stanice vyhodnocující vhodné klimatické podmínky. Expozice probíhá pouze tehdy, pokud jsou podmínky vhodné, tj. když nejsou detekovány srážky. Systém je také vybavený CCD kamerou, která vyhodnocuje stav oblačnosti. Oblačnost se vyhodnocuje na základě počtu detekovaných hvězd. Zaznamená-li kamera méně hvězd, než je její nastavená limitní hodnota, potom systém vyhodnotí nevhodné snímací podmínky a neumožní expozici filmu. [27]

Kamera je také vybavena prostředky pro komunikaci po počítačové síti. Tímto způsobem lze průběžně kontrolovat a regulovat teplotní stav kamery či měnit různá nastavení.

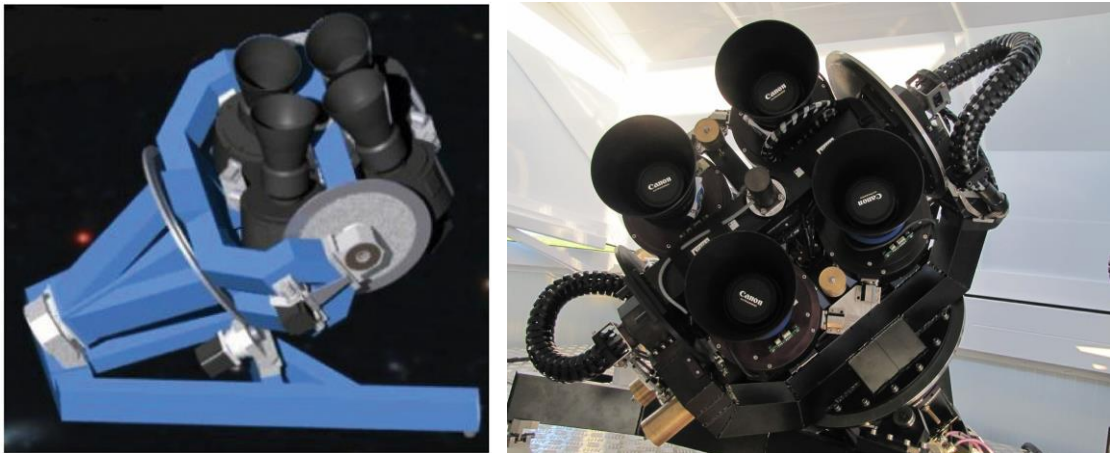
Celý tento systém ještě se spoustou dalších opatření funguje zcela automaticky. Bez zásahu obsluhy vydrží po dobu jednoho měsíce, poté je třeba vyměnit film. [27]



Obr. 23 – bolidová kamera [27]

3.2.4 „Pi of the Sky“

Pozorování gama záblesků vyžaduje konstantní monitorování velké části oblohy s vysokým rozlišením, toho je v tomto projektu dosaženo s využitím 12 kamer, kde každá pokrývá $20^\circ \times 20^\circ$ oblohy. Každá z kamer je vybavena objektivem s ohniskovou vzdáleností $f = 85$ mm, obrazovým senzorem CCD s rozlišením přibližně 2000×2000 pixelů a velikostí jednoho pixelu cca 15×15 μm . Tento systém v pravidelných intervalech snímá (s expozičním časem 10s) oblohu a vyhodnocuje zaznamenaná data. [34]

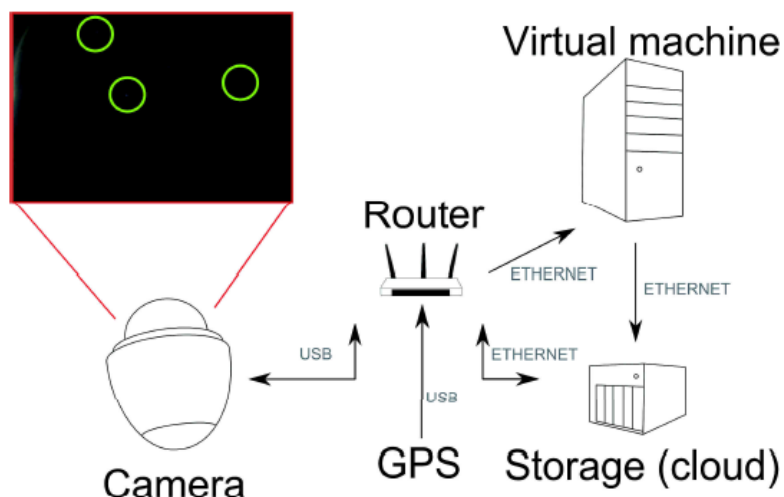


Obr. 24 – Návrh [39] a realizace [40] jedné části systému „Pi of the sky“ se čtyřmi kamerami

3.2.5 WILLIAM

WILLIAM (Wide-field all-sky image analyzing monitoring system) je celooblohová kamera pro snímání noční oblohy a vyhodnocení vhodných povětrnostních podmínek pro pozorování hvězd teleskopem. [35] Celý systém funguje automaticky na základě množství pozorovatelných hvězd. Pokud aktuální snímek noční oblohy obsahuje menší počet detekovaných hvězd, než pro který je systém kalibrován, tak se podmínky vyhodnotí jako možnost oblačnosti nebo deště, tedy jako nevhodné pro pozorování. [41]

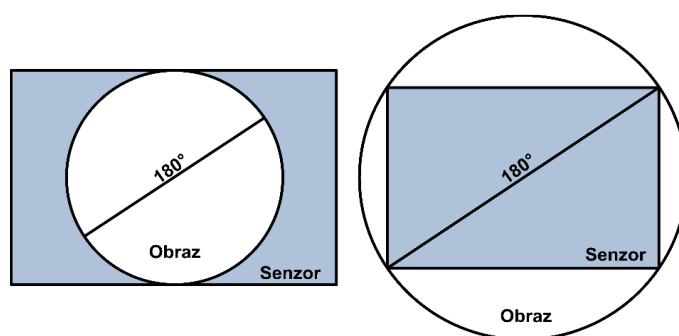
Hlavními částmi systému jsou DSLR fotoaparát, širokoúhlý objektiv typu rybí oko a router s ovládacím skriptem (viz obr. 4). [35]



Obr. 25 – Schéma systému WILLIAM [35]

V systému je použita digitální zrcadlovka Nikon D5100 s CMOS senzorem velkým 23,6 x 15,6 mm a s rozlišením 4928 x 3264 pixelů.

K fotoaparátu byl zvolen objektiv typu rybí oko značky Sigma o ohniskové vzdálenosti $f = 10$ mm. Jedná se o diagonální objektiv typu rybí oko. Tento typ byl zvolen, jelikož umožňuje větší využití celé plochy obrazového senzoru oproti druhému typu, cirkulárnímu objektivu. Nevýhodou diagonálního objektivu je zmenšené zorné pole, avšak v případě systému WILLIAM je důležitější velikost rozlišení. Celé zařízení je umístěné ve vodotěsném vytápěném kamerovém krytu. [41]



Obr. 26 – Porovnání cirkulárního (vlevo) a diagonálního (vpravo) objektivu typu rybí oko [41]

Fotoaparát je připojen k routeru, v jehož paměti je hlavní skript zajišťující ovládání systému. Skripty nastavují fotoaparát (ISO, expoziční čas, clona, atd.) podle aktuálně požadovaných úloh v rámci denního nebo nočního režimu (tato nastavení se mění v závislosti na aktuálním čase a GPS pozici systému).

Dalšími úlohami routeru jsou průběžné odesílání zaznamenaných fotografií do databáze na vzdáleném úložišti, a také vzdálené ovládání virtuálního stroje, který provádí zpracování uložených obrazových dat v databázi. Uložená data v databázi mohou také sloužit pro testování nových detekčních algoritmů. [41]

Před vyhodnocováním zaznamenaných snímků dochází nejprve k maskování nežádoucích objektů jako jsou stožáry či stromy, které se na snímku mohou objevit kvůli velkému zornému úhlu. Následuje detekce hvězdných objektů, která se provádí filtrací oblastí snímku s konvolučním jádrem. Takto detekované hvězdné objekty jsou označeny značkou. Následně jsou porovnávána množství detekovaných objektů se známými hvězdami z astronomického katalogu. Na základě tohoto porovnání je vyhodnoceno, zda jsou vhodné podmínky pro sledování hvězd, případně jakým směrem se má dalekohled natočit pro dosažení optimálních podmínek. [35]



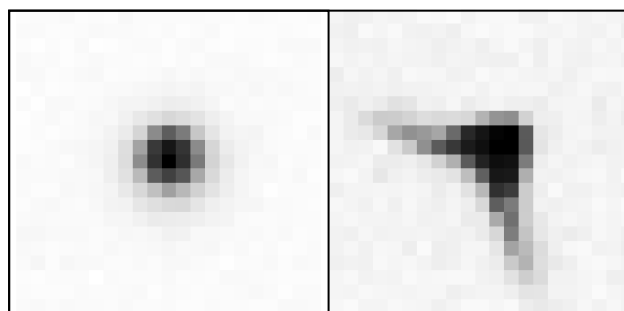
Obr. 27 – Fotografie objektivu a krytu systému WILLIAM [41]

4 Parametry systémů UWFOV

4.1 Point Spread Function (PSF)

V důsledku použití optiky s širokým úhlem záběru dochází k deformaci výsledného snímku, jejímž důvodem jsou difrakce světla a různé optické vady. Za účelem popsání těchto vad se využívá funkce PSF. [34] Tato funkce vyjadřuje impulzní odezvu systému. [28]

U běžných optických systémů by se bodový zdroj světla zobrazil pouze na ploše odpovídající jeho velikosti. U systémů UWFOV dochází v důsledku optických vad ke zvětšení této oblasti. Tato vada je snadno opravitelná v případě rotačně symetrického zkreslení (takové zkreslení lze aproximovat dvoudimenzionální Gaussovou funkcí). V oblastech vzdálených od středu může docházet k asymetrickému zkreslení původního zdroje světla. Například na obrázku 28 je zobrazeno PSF hvězdy UWFOV systému „Pi of the Sky“. Takový PSF model lze již obtížněji matematicky popsat. [34]



Obr. 28 – PSF hvězdy ve středu (vlevo) a na okraji snímku (vpravo) [34]

Model PSF reprezentuje optické vady daného zařízení. PSF může být aplikována jak na celý obraz nebo na jednotlivé části zvlášť. Složité optické systémy, jakými jsou UWFOV, lze tedy popsat pomocí pole jednotlivých funkcí PSF (PSF pro všechny diskrétní body přes celé pole vidění - FOV). [28]

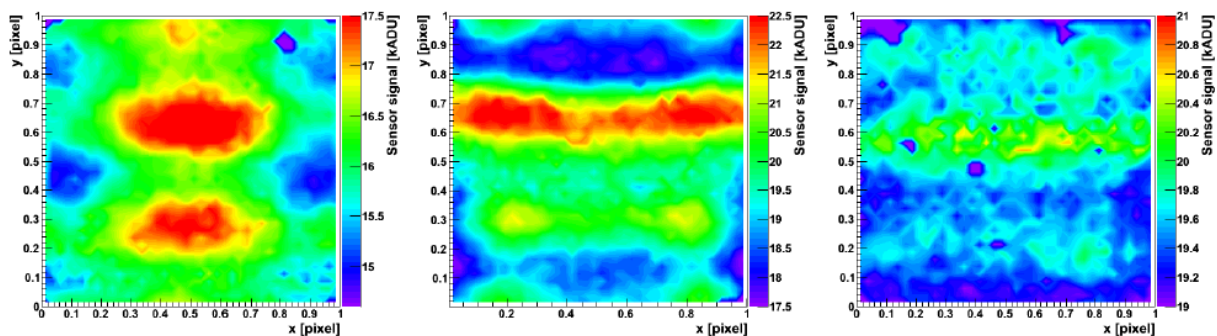
Různé způsoby získání co nejpřesnějších modelů PSF pro optické soustavy jsou předmětem aktuálních výzkumů. Na těchto výsledcích je závislá kvalita snímků pořízených UWFOV systémy. Jednou z možností získání PSF je vytvoření modelu vlnoplochy zatížené optickými vadami. Takový model lze sestavit pomocí užití Zernikových polynomů. [28]

4.2 Senzitivita pixelu

Astronomické UWFOV systémy se zaměřují na snímání rozsáhlé části oblohy, proto zaznamenané hvězdy z těchto systémů zabírají pouze malou část výsledného rastru (řádově desítky px). Malá plocha zaznamenané informace o daném vesmírném objektu je důvod, proč se může u výsledných snímků negativně projevit vlastnost obrazového senzoru, která je u běžných fotografií zanedbatelná. Jedná se o senzitivitu pixelu.

Žádná buňka obrazového senzoru není ideální, a tudíž se její citlivost na světlo ve středu a na jejích okrajích liší. Je to způsobeno elektronikou, která je součástí každé buňky. Tato citlivost je také odlišná pro různé vlnové délky světla [34].

Tuto vlastnost lze proměřit pomocí světelného zdroje zaostřeného na menší plochu, než je velikost jediné buňky obrazového senzoru. Na obrázku 29 jsou zobrazeny výsledky měření senzitivity pixelu polské skupiny vědců z projektu „Pi of the Sky“. Z těchto grafů lze vyčíst, že změřené zařízení má největší výchyly citlivosti pro vlnové délky odpovídající modré barvě. [34]



Obr. 29 – Změřená senzitivita pixelu pro modrou (levo), červenou (střed) a bílou (pravo) diodu [34]

Tyto výsledky nelze brát obecně, jelikož se vlastnosti mohou lišit pro každý obrazový senzor v závislosti na jeho parametrech (použitá technologie, velikost 1 px, aj.).

5 Algoritmy interpolace obrazu

Tato kapitola se zabývá testováním vlivu vzorkování na konečném rastru obrazu na tvar PSF. Byly navrženy, zrealizovány a vyhodnoceny dvě hlavní funkce. První se zabývá vlivem zvětšení rastru, druhá vlivem posunutí.

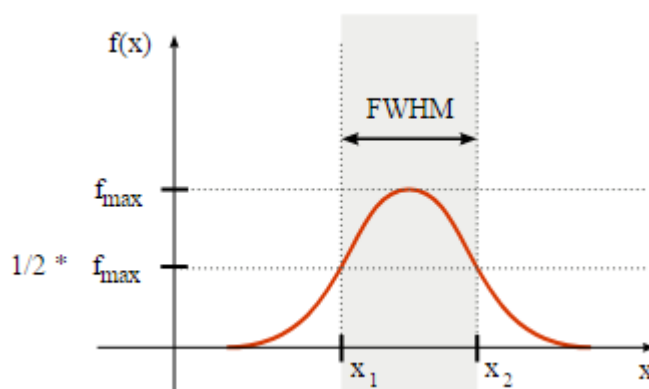
Testovací algoritmy byly vytvořeny v matematickém programu MATLAB. Všechna využitá data (vstupní snímky, vytvořené funkce a skripty, výstupní snímky, atd.) jsou součástí přílohy (viz seznam příloh).

5.1 Metody vyhodnocení

Pro porovnání změn v testovaných snímcích byly použity dvě metody – FWHM a RMSE.

5.1.1 FWHM (Full Width at Half Maximum)

FWHM lze do češtiny přeložit jako „plná šíře v půli maxima“. To znamená, že hodnota FWHM odpovídá vzdálenosti mezi body, které se rovnají polovině maximální hodnoty daného vrcholu funkce. Princip je znázorněn na obrázku 30. Tuto hodnotu lze v této práci využít na porovnání tvaru profilů zaznamenaných objektů.



Obr. 30 – princip FWHM znázorněný na gaussově funkci

5.1.2 RMSE (Root Mean Square Error)

RMSE je metoda, která se používá k porovnání mezi hodnotami (např. dvou vektorů či matic). Její hodnota vyjadřuje odmocninu z průměru odchylek na druhou. Často se používá k porovnání hodnot předpovědaných a hodnot dosažených. [42] V této práci je RMSE využita

k porovnání vstupní matice A_i s maticí požadovaného tvaru A_d . RMSE je zde vypočtena podle následující rovnice:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_i \sum_j (A_i(i, j) - \hat{A}_d(i, j))^2}$$

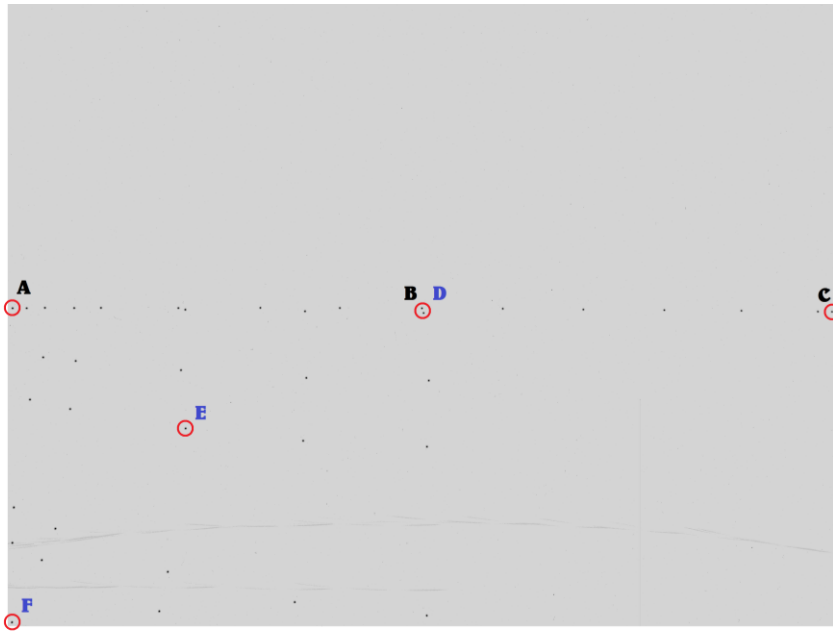
5.2 Vstupní data

Jako vstupní data pro testovací algoritmus byly využity snímky z kamery systému WILLIAM (dvě sady, celkem 37 snímků). Jedná se o snímky bodového zdroje světla pořízené v laboratoři. Parametry těchto snímků byly zjištěny pomocí funkce *imfinfo* a jsou zobrazeny na obrázku 31. Vstupní snímky jsou tedy ve formátu .tif s bezztrátovou kompresí (LZW), bitovou hloubkou 16 bitů a barevná informace je ve stupních šedi (nejmenší hodnota 0 odpovídá černé, nejvyšší 65 535 bílé).

```
>> imfinfo('star_0001.tif')
      Format: 'tif'
      Width: 3358
      Height: 2536
      BitDepth: 16
      ColorType: 'grayscale'
      Compression: 'LZW'
      PhotometricInterpretation: 'BlackIsZero'
      MaxSampleValue: 65535
      MinSampleValue: 0
```

Obr. 31 – Parametry vstupních snímků

Každý z těchto snímků zachycuje profil, resp. PSF bodového zdroje světla v určitém místě. Dohromady pokrývají důležitá místa obrazové plochy, ve kterých se tento profil může lišit. Všechna místa, ve kterých byl zaznamenán obraz bodového zdroje světla jsou zobrazena na obrázku 32. Pro účely testování algoritmů bylo vybráno 6 snímků znázorňujících 5 pozic bodového zdroje světla (střed je zaznamenán na dvou snímcích – každý z jiné sady). Tyto vybrané profily jsou označeny písmeny A až F (také jsou zobrazeny na obrázku 32).



Obr. 32 – Pozice bodového zdroje světla na vstupních snímcích s označenými vybranými polohami

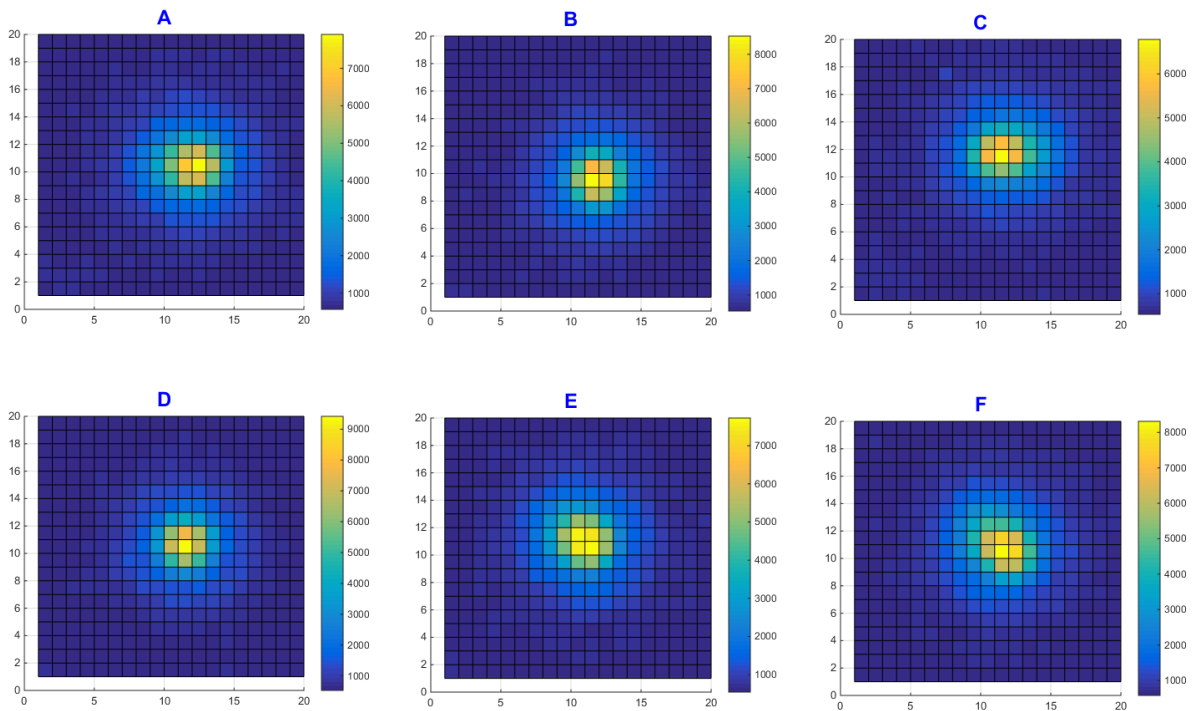
Profily bodového zdroje světla označené A až F byly pomocí funkce *imread* (obr. 33) vyříznuty a převedeny do matic hodnot o velikosti 20x20 (odpovídající částem původních snímků o velikosti 20x20 px). Na obrázku 34 je vyčíslena matice A, která odpovídá profilu bodového zdroje z pozice levého kraje (horizontálně) a středu (vertikálně).

```
% A (levo-střed)
A = imread('star_0001.tif', 'PixelRegion', {[1240,1259], [10,29]});
```

Obr. 33 – Ukázka vyříznutí oblasti odpovídající profilu

A														
692	660	657	682	674	721	696	699	728	709	678	679	652	616	634
664	629	698	668	720	779	775	844	833	696	719	690	685	645	613
627	687	696	775	765	861	981	1051	1035	986	892	830	734	662	713
657	700	786	888	942	1002	1303	1330	1352	1291	1132	950	854	700	684
744	752	836	977	1093	1414	1672	1704	1777	1550	1351	1194	1021	797	717
771	801	916	1116	1619	1885	2533	3157	3230	2438	1620	1228	1171	874	707
663	781	961	1326	1915	2751	4162	5731	6080	4549	2364	1263	1151	928	752
701	798	966	1424	2092	3213	4983	6920	7904	5697	2944	1463	1272	943	779
703	763	931	1316	1982	2838	4316	5541	5986	4500	2429	1497	1175	929	734
708	769	826	1101	1422	1969	2570	3141	3193	2529	1791	1338	1225	843	696
696	736	867	946	1138	1494	1677	1754	1752	1594	1417	1170	964	787	702
668	723	824	827	935	1108	1244	1357	1322	1339	1104	1012	817	731	640
640	701	737	755	920	908	1045	1145	1051	986	895	786	772	710	656
610	657	687	708	776	833	817	833	765	715	700	717	683	683	666
657	670	746	676	673	714	723	668	711	698	660	721	648	621	702

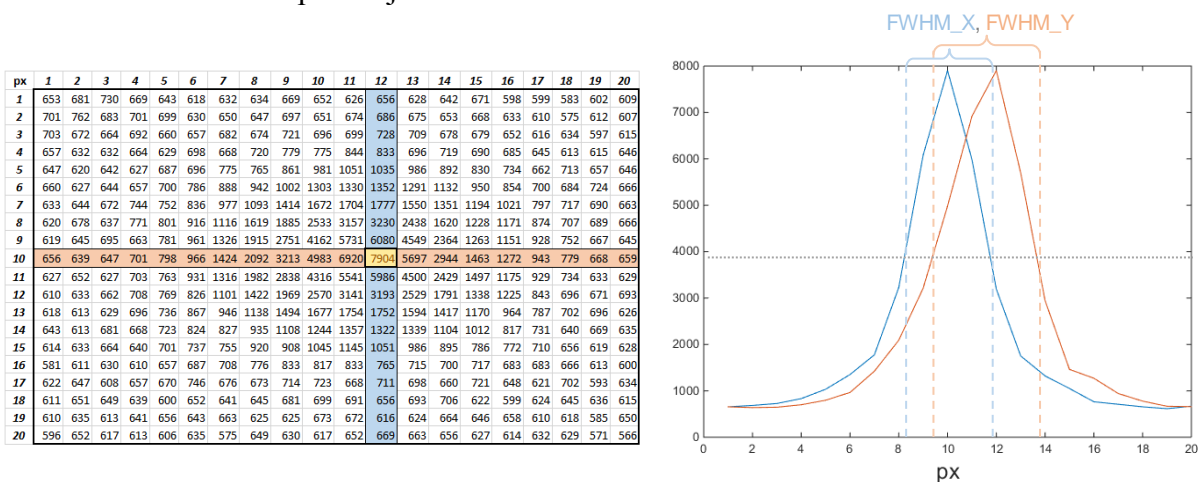
Obr. 34 – Ukázka části matice A s vyznačenou max. hodnotou a hodnotami pod 700



Obr. 35 - Profily matic A až F

Na obrázku 35 jsou zobrazeny profily všech vybraných poloh zaznamenaného bodového zdroje světla (nadále označených jako matice). Z tohoto obrázku lze vyvodit, že matice B a D (oboje: střed-střed) mají téměř rotačně symetrický tvar. Zatímco matice A (levo-střed) a C (pravo-střed) mají již viditelný horizontálně roztažený profil. Nejvýraznější deformace profilu je vidět u matice F (levo-dole) a matice E (střed mezi D a F).

Pro ověření těchto tvrzení byla pro všechny matice spočítána FWHM ve vertikálním a horizontálním směru protínající bod maxima.



Obr. 36 – FWHM ve vertikálním a horizontálním směru matice A s max. hodnotou v bodě (10,12)

Vypočítané hodnoty FWHM jsou zobrazeny v tabulce na obrázku 37. Součástí této tabulky je řádek max_value, ve kterém je informace o hodnotách maxima. Na obrázku 38 jsou pro úplnost zobrazeny středy všech matic s vyznačenými hodnotami, které jsou větší než polovina maximální hodnoty.

Tyto výsledky potvrzují předchozí závěry, s výjimkou matice B, která má mírně narušený symetrický profil. To může být způsobeno šumem. Jelikož buňky použitých matic mají poměrně malé hodnoty oproti možné maximální (65 535), mohou být ovlivněny šumem, který se více projevuje v místech nižšího jasu (viz kapitola 2.6.3).

FWHM	matice:					
směr	A <i>levo</i>	B <i>střed</i>	C <i>pravo</i>	D <i>střed</i>	E <i>šikmo</i>	F <i>roh</i>
X	4	4	5	3	4	4
Y	3	3	3	3	4	4
max_value	7904	8528	6784	9416	7727	8313

Obr. 37 – Tabulka velikostí FWHM v horizontálním (x) a vertikálním (y) směru a maximálních hodnot.

A							B							C						
1885	2533	3157	3230	2438	1620	1228	1566	2241	3058	2956	1978	1360	1185	1186	1468	2004	2198	2062	1849	1511
2751	4162	5731	6080	4549	2364	1263	2072	4193	6288	5770	3486	1689	1289	1451	2495	3887	4503	3866	2709	2135
3213	4983	6920	7904	5697	2944	1463	2549	5555	8528	7831	4497	2098	1430	1658	3440	5646	6784	5698	3803	2586
2838	4316	5541	5986	4500	2429	1497	2219	4761	7109	6376	4094	2098	1428	1537	2985	4950	5738	5015	3462	2415
1969	2570	3141	3193	2529	1791	1338	1604	2777	3939	3688	2396	1751	1325	1232	1803	2868	3266	3021	2464	1845
1494	1677	1754	1752	1594	1417	1170	1342	1702	1881	1939	1712	1380	1065	1116	1386	1417	1713	1704	1570	1329

D							E							F						
1643	2488	2966	2474	1643	1309	1242	1520	1776	2218	2280	1732	1376	1236	1512	1803	2440	3286	3270	2308	1429
2476	4869	6438	5105	2650	1466	1254	2062	3026	4680	5037	3458	1718	1265	1811	2543	4132	6193	6050	4052	1933
3420	6921	9416	6938	3474	1790	1282	2810	4770	7434	7727	5210	2349	1362	2368	3614	6226	8313	7653	4596	2230
3200	6139	7724	6378	3447	1717	1292	3013	5321	7531	7356	5051	2369	1477	2370	4172	6371	7477	6449	3992	2111
2098	3492	4272	3553	2334	1615	1241	2704	3932	5247	4871	3236	1916	1411	2502	3493	4579	4674	3974	2400	1742
1426	1701	2095	2029	1608	1216	1072	2036	2704	2797	2658	1850	1503	1401	1979	2636	3008	2824	2258	1827	1478

Obr. 38 – Středy matic A až F s vyznačenými hodnotami, které jsou větší než polovina maxima.

Zobrazené profily potvrzují fakt, že zkreslení profilu světelného bodu je závislé na poloze. Čím dále je zaznamenaný bod od středu, tím více se jeho deformace zvětšuje. Následující části se budou zabývat tím, zda tyto deformace nelze částečně opravit pomocí zvětšení či posunutí rastru.

5.3 Vliv zvětšení rastru

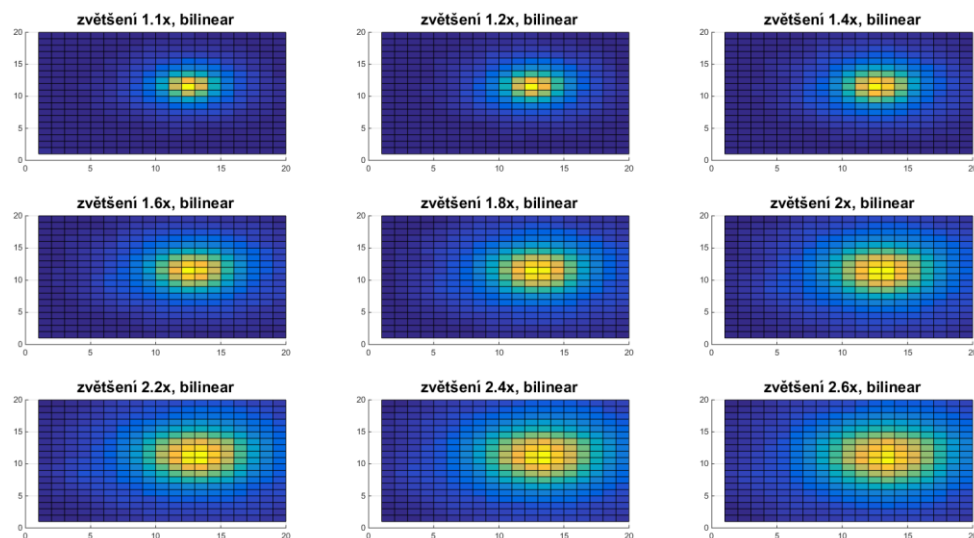
Vliv zvětšení rastru byl otestován pomocí funkce *imresize*, jejíž vstupní parametry jsou hodnota zvětšení a zvolený typ interpolace. Tato funkce byla následně doplněna o funkci zajišťující stálé rozměry vstupní matice. Ve výsledku se zvětšuje rastr o danou hodnotu, ale rozměry matice se nemění. To má za následek zvětšení daného objektu.

5.3.1 Princip

Interpolace spočívá v rozšíření hodnot funkce dopočítáním v závislosti na okolních hodnotách. Podle způsobu výpočtu se dělí na několik druhů. V testech popsaných níže byly využity interpolace nearest, bilinear a bicubic. Nearest je nejjednodušší metoda, která doplňuje nové hodnoty na základě nejbližší hodnoty. Bilineární interpolace používá pro každou hodnotu výstupního pixelu vážený průměr dvou okolních hodnot. Poslední typ interpolace (bicubic) využívá vážený průměr čtyř okolních hodnot pro každou hodnotu výstupního pixelu. [43]

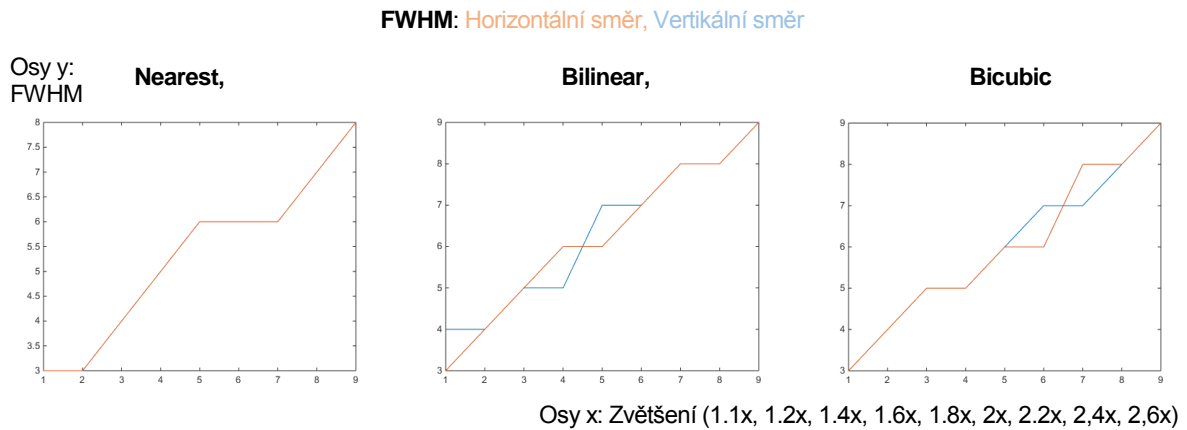
5.3.2 Aplikování na vstupní data, vyhodnocení

Na matici D byla aplikována interpolační metoda s rozsahem zvětšení 1.1 až 2.6. Byly vyzkoušeny všechny tři druhy interpolací. Na obrázku 39 je zobrazena bilineární interpolace. Ostatní metody tzn. nearest a bicubic jsou součástí přílohy.



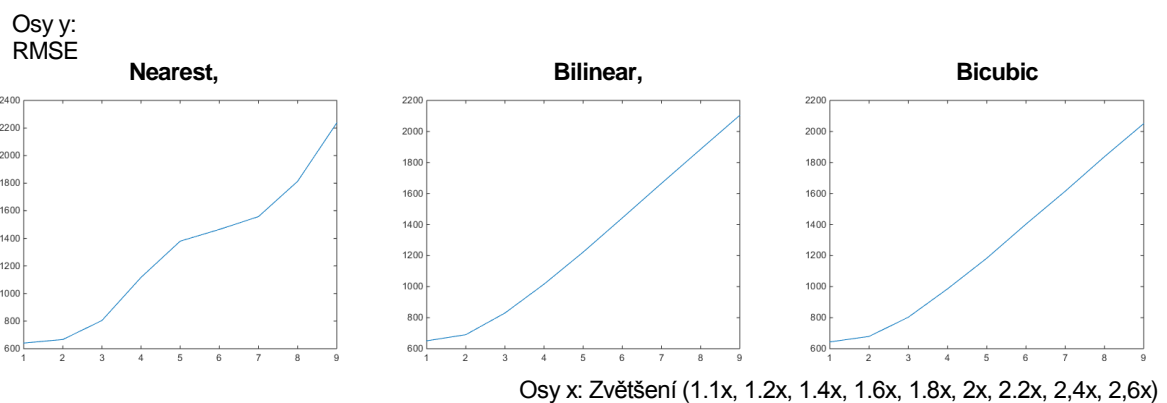
Obr. 39 - Aplikace různých zvětšení rastru s využitím bilineární interpolace.

Pro všechna zvětšení byla vypočítána hodnota FWHM. Výsledky jsou zobrazeny v grafech na obrázku 40. Z grafů plyne, že při nevhodném zvětšení může dojít k deformaci profilu. Například při interpolaci Bilinear $x = 4 \rightarrow$ zvětšení 1.6x se profil matice roztáhne v horizontálním směru. Výjimkou je interpolace nearest, která zachovává poměr velikostí horizontální a vertikální FWHM.



Obr. 40 – FWHM všech zvětšení matice D

Z porovnání RMSE původní (nezvětšené) matice D a zvětšených matic lze vyvodit, že u interpolace matic dosahují metody bilinear a bicubic téměř srovnatelných výsledků. Z obou metod dosahuje bilinear nepatrně lepších hodnot. Metoda nearest není vhodná pro větší hodnoty zvětšení.



Obr. 41 – RMSE porovnávající všechna zvětšení matice D s původní maticí

5.4 Vliv posunutí rastru

5.4.1 Princip

Pro možnost otestování vlivu posunutí rastru na konečný profil PSF byla vytvořena skupina funkcí (*zvetseni*, *posun*, *sikmyposun* a *zmenseni_zpet*). Princip těchto funkcí bude znázorněn a popsán na matici X.

```
>> X = [ 1 2 ; 3 4]
```

```
X =
```

```
1    2
3    4
```

Obr. 42 – Testovací matice X

Aby bylo možné matici hodnot posunout o méně než 1px, musí se každý bod matice rozdělit na více menších bodů. Tuto možnost zajišťuje funkce *zvetseni*, v jejímž vstupním parametru lze nadefinovat na kolik hodnot se rozdělí každý bod.

```
>> X2 = zvetseni (X,2)
```

```
X2 =
```

```
0.2500    0.2500    0.5000    0.5000
0.2500    0.2500    0.5000    0.5000
0.7500    0.7500    1.0000    1.0000
0.7500    0.7500    1.0000    1.0000
```

Obr. 43 – zvětšená (2x) matice X2

V případě matice X2 se každý bod původní matice X rozdělil na 2^2 bodů. Hodnota původního pixelu se rovnoměrně rozdělila mezi 4 nově vzniklé buňky. V tomto případě je zanedbána senzitivita pixelu a každý pixel je tedy brán jako ideální s rovnoměrnou citlivostí po celé své ploše.

Následujícím krokem je využití funkce *posun* nebo *sikmyposun*. Tyto funkce posunou hodnoty matice v definovaném směru [(Nahoru, Dolu, doLeva, doPrava) nebo šikmo (NL, NP, DL, DP)] o libovolný počet pixelů. Princip je znázorněn na obrázku 44.

```
>> X3 = sikmyposun (X2,1, 'NP')  
  
X3 =  
  
      0      0.2500      0.2500      0.5000  
      0      0.7500      0.7500      1.0000  
      0      0.7500      0.7500      1.0000  
      0           0           0           0
```

Obr. 44 – posunutá (o 1px směrem nahoru-doprava) matice X3

Posledním krokem je vrácení matice do původních rozměrů. Výsledná hodnota každého bodu bude odpovídat součtu všech hodnot danému bodu náležících. Např. součtem hodnot bodů (11), (12), (21), (22) matice X3 vznikne bod (11) matice X4, atd.

```
>> X4 = zmenseni_zpet (X3, 2)  
  
X4 =  
  
      1.0000      2.5000  
      0.7500      1.7500
```

Obr. 45 – Výsledná matice X4

Výsledná matice X4 tedy vznikla posunem rastru původní matice X o 0,5 px v šikmém směru nahoru-doprava.

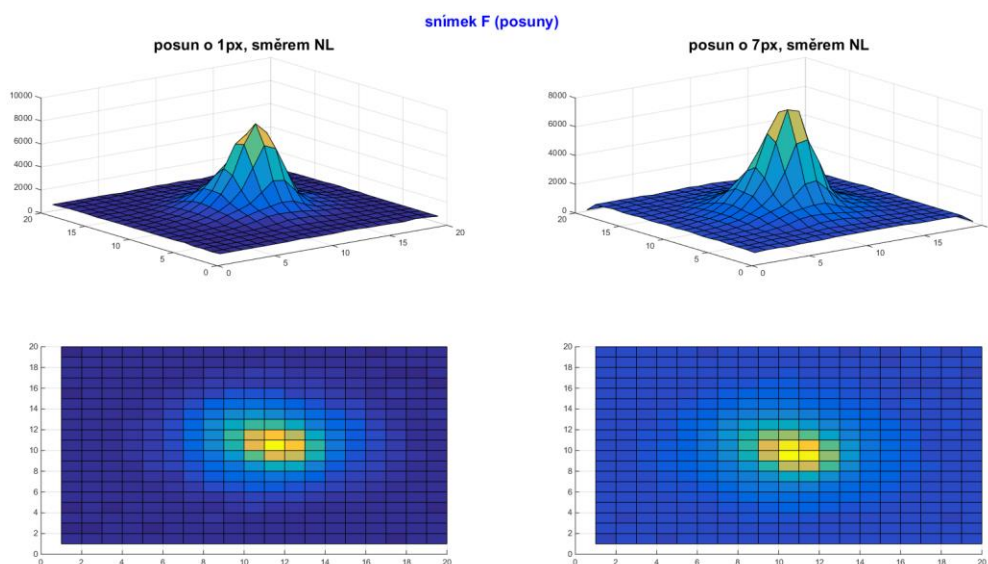
Pro usnadnění vykreslení požadovaných posunů v požadovaných směrech byly vytvořeny 2 zobrazovací funkce - *zobraz_posuny* a *zobraz_sikme_posuny*.

```
zobraz_posuny (matice,nazev,druhposunu,zvetseni, posuny)
zobraz_sikme_posuny (matice,nazev,druhposunu,zvetseni, posuny)
```

Vstupní parametry těchto funkcí jsou obdobné. Parametr *matice* představuje vstupní matici, na kterou bude aplikován posun, *druhposunu* – zde se vypíše hodnota 1 až 5 v závislosti na požadovaném směru posunu [možnosti funkce *zobraz_posuny*: 1 ('N'), 2 ('D'), 3 ('L'), 4 ('P'), 5 (vše), funkce *zobraz_sikme_posuny*: 1 ('NL'), 2 ('NP'), 3 ('DL'), 4 ('DP'), 5 (vše)], *zvetseni* vyjadřuje na kolik bodů se rozdělí každý bod vstupní matice. Velikost tohoto parametru také určuje, o jakou min hodnotu lze posunout rastr (např. *zvetseni* 2 - rastr lze posunout min o 1/2, *zvetseni* 8 – rastr lze posunout min o 1/8). Do vstupního parametru *posuny* lze vyplnit vektor hodnot všech požadovaných hodnot posunutí. Poslední neuvedený parametr *nazev* plní pouze funkci dopsání do názvu grafu, o jakou se jedná matici.

```
matice = F ;
nazev = 'F' ;
druhposunu = 1 ; % možnosti: 1 ('NL'), 2 ('NP'), 3 ('DL'), 4 ('DP'), 5 (vše)
zvetseni = 8 ; % na kolik subpixelu se rozdělí jeden pixel (1px = X*X px)
posuny = [1 7] ; % vektor všech posunu ... např [1 2 3]

zobraz_sikme_posuny (matice,nazev,druhposunu,zvetseni, posuny)
```



Obr. 46 – Ukázka použití funkce zobrazení šikmých posunů

5.4.2 Aplikování na vstupní data, vyhodnocení

Funkce posunu popsané v předcházející kapitole byly otestovány na maticích A až F. Pro vyhodnocení výsledků byla použita metoda RMSE. Výsledky této metody zobrazuje vytvořená funkce `zobraz_RMSE`.

```
Vystup = zobraz_RMSE(matice,porovnavaci_mat,zve,smery)
```

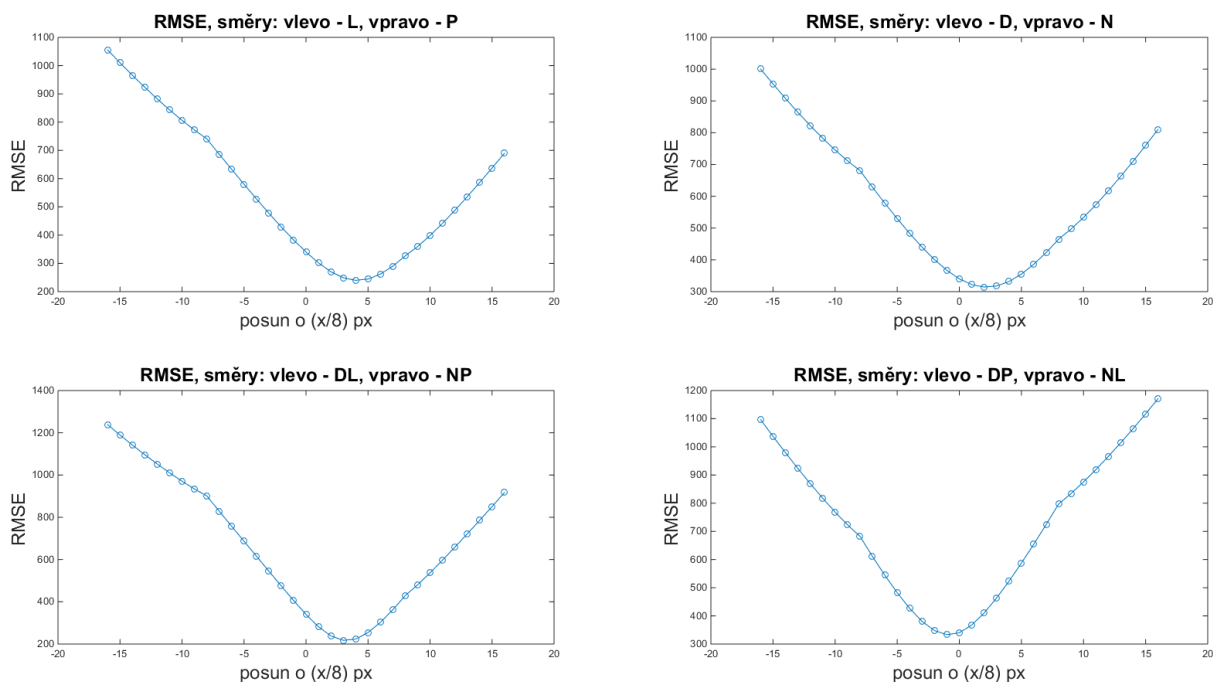
Úkolem funkce `zobraz_RMSE` je vypočítání hodnoty RMSE pro všechny zvolené posuny vstupní matice v porovnání s maticí, která je zvolena jako referenční. Vstupními parametry této funkce jsou: 1. matice, na které budou testovány posuny, 2. referenční matice, 3. parametr zvětšení, který vyjadřuje krok, s jakým se bude posouvat (např. `zve 2` – posuny s krokem $\frac{1}{2}$, atd.), 4. směry, ve kterých se bude posouvat, jsou v této funkci na rozdíl od předchozích funkcí propojeny tak, aby se vyhodnocovalo RMSE v závislosti na horizontálním (L+P), vertikálním (D+N) či v šikmých směrech (DL+NP nebo DP+NL).

V následující části je zdokumentována a popsána aplikace funkce `zobraz_RMSE` na matici E. Jako referenční matice byla zvolena matice D, jelikož má jako středová matice nejmenší zkreslení profilu a má téměř rotačně symetrický tvar. Byly testovány posuny matice E s krokem $\frac{1}{8}$ pixelu ve všech směrech a pozorovány změny ve vyhodnocení RMSE. Na obrázku 47 je zobrazen kód vykreslující výsledky a na obrázku 48 jsou tyto výsledky zobrazeny.

(pozn. Matice E3 a D3 vyvolané v obrázku níže, odpovídají přesně maticím E a D, pouze jsou převedeny do vhodnějšího datového typu - double).

```
figure()
subplot(2,2,1)
RMSE_horizont = zobraz_RMSE(E3,D3,8,1);
subplot(2,2,2)
RMSE_vertikal = zobraz_RMSE(E3,D3,8,2);
subplot(2,2,3)
RMSE_diag1 = zobraz_RMSE(E3,D3,8,3);
subplot(2,2,4)
RMSE_diag2 = zobraz_RMSE(E3,D3,8,4);
```

Obr. 47 – vykreslení výsledků



Obr. 48 – Grafy RMSE v závislosti na posunech s krokem 1/8 pixelu ve všech směrech, hodnota 0 na ose x odpovídá RMSE mezi referenční maticí a vstupní maticí bez posunu. Záporné hodnoty odpovídají posunům o x/8 pixelu ve směru nadepsaném jako vlevo, kladné hodnoty odpovídají posunům o x/8 pixelu ve směru nadepsaném jako vpravo.

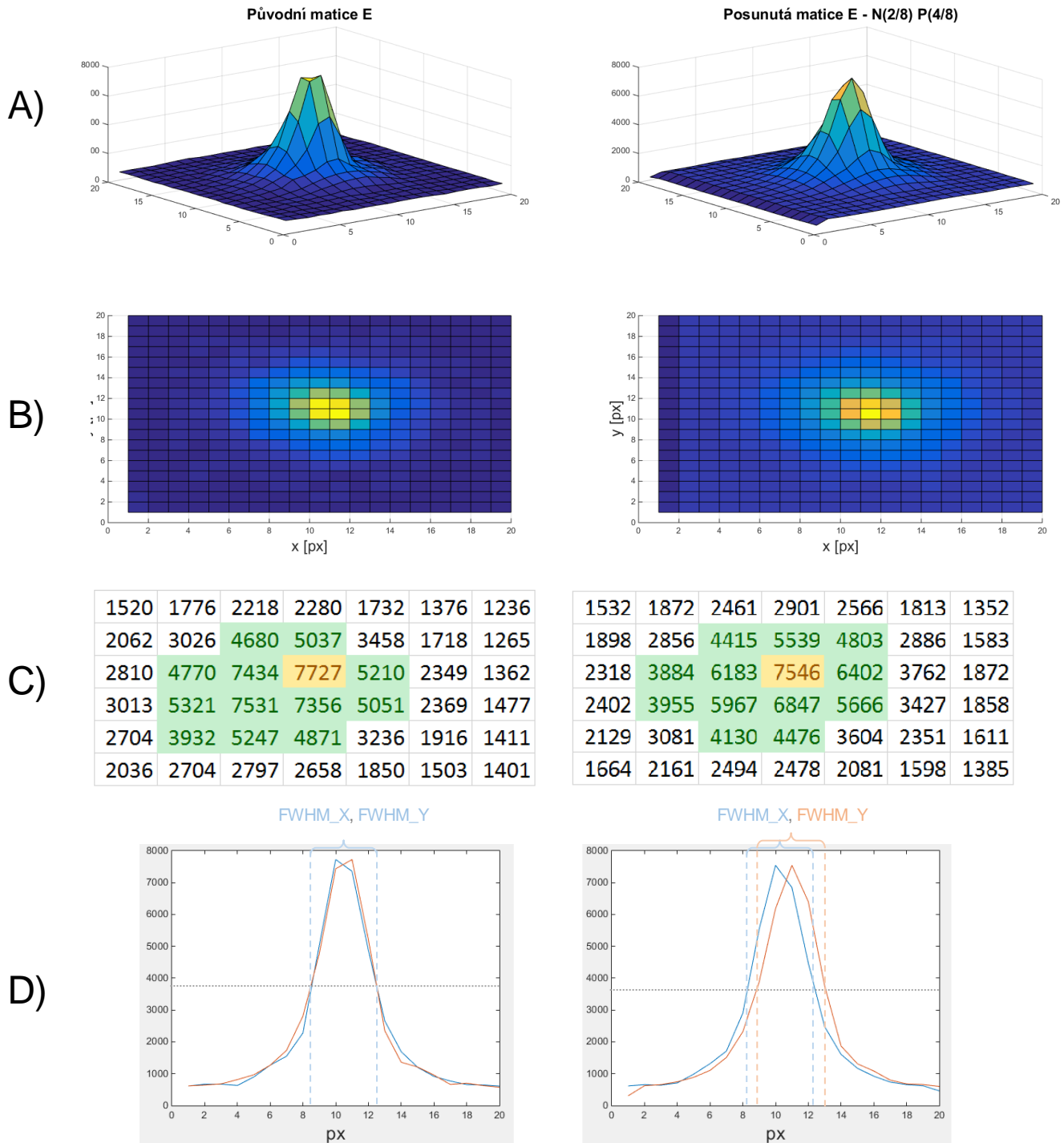
Z Grafů na obr 48 plyne, že posunutím určitým směrem (např. o 3/8 px nahoru nebo doprava) se snižuje hodnota RMSE oproti RMSE mezi referenční maticí a vstupní maticí bez posunu (hodnota v nule na ose X ... $RMSE(0) = 340,1$). Z toho plyne, že je možné upravit profil matice E pomocí posunu tak, aby se více přiblížil profilu referenční matice D. V tabulce na obr. 49 jsou z jednotlivých grafů vypsána místa s nejnižší hodnotou RMSE.

	posun		RMSE
	o kolik px	směr	
bez posunu	-	-	340,10
horizont	4/8	P	239,97
vertical	2/8	N	314,42
diag1	3/8	NP	217,53
diag2	1/8	DP	333,06

Obr. 49 – Nejnižší hodnoty RMSE

Pro dosažení nejnižší hodnoty RMSE byla vyzkoušena kombinace nejlepších výsledků posunutí (viz tabulka na obr. 49) v horizontálním a vertikálním směru. Bylo dosaženo hodnoty $RMSE\ N(2/8)\ P(4/8) = 201,6$. Tato hodnota znázorňuje, že posunutím rastru o 2/8 pixelu nahoru a zároveň 4/8 pixelu doprava, by měl vyjít takový profil matice E,

který se nejvíce (ze všech posunů s krokem 1/8) blíží profilu matice D. Porovnání původní matice E s posunutou maticí E je na obrázku 50.



Obr. 50 - Porovnání původní matice E a matice E posunuté o N(2/8) P(4/8).

Z porovnání původní a posunuté matice E plyne, že se sice nezmenší velikost FWHM ($X = 4, Y = 4$) (obr 50 C, D), ale celkový profil matice E se zlepšil. Místo 4 podobných hodnot blížících se maximu je v nové matici pouze jediná (obr 50 A, B). Navíc je zde částečně potlačený vliv deformace, která vznikla umístěním dále od středu (obr 50 C).

Z těchto závěrů plyne, že úpravu posunem rastru u matice E lze považovat za úspěšnou. Lehce deformovaný profil původní matice se tak více blíží profilu rotačně symetrickému.

5.4.3 Vliv posunutí rastru - závěr

Funkce *zobraz_RMSE* byla aplikována i pro ostatní matice. Výsledky tohoto testování jsou v příloze (viz seznam příloh). Změny v profilech ostatních matic nebyly již tak výrazné. Hlavním důvodem může být fakt, že matice E měla ze všech testovaných matic nejvíce zdeformovaný profil. U některých matic navíc došlo ke zlepšení rotační symetrie na úkor FWHM.

Z těchto výsledků vyplývá, že posunutím rastru o nepatrnou část (méně než 1 pixel) lze upravit profil objektu tak, aby lépe odpovídal svému skutečnému tvaru, čímž se částečně redukuje optické vady spojené s využitím širokoúhlého objektivu. Velmi záleží na vhodném výběru referenční matice. Ideálním řešením by bylo vytvoření takového modelu pro daný objekt, který by představoval zachycený objekt bez tvarové deformace.

Jelikož vyzkoušené funkce nebraly v potaz senzitivitu pixelu, může být dalším tématem testování, jak by se změnila výsledky pro různé aproximační funkce senzitivity pixelu.

6 Závěr

Obrazové systémy pro celooblohové snímání nachází velké využití v oblastech astronomie. Tyto systémy se využívají kromě klasického pozorování hvězd také v některých speciálních projektech. Například v observatoři Pierre Auger celooblohová kamera sleduje oblohu a v případě příliš intenzivního světla vydává příkaz k zakrytí dané části fotonásobičů. Dalším zajímavým systémem jsou bolidové kamery, které provozuje Astronomický ústav Akademie věd České republiky. Tyto kamery pozorují jasné meteory. Ze záznamů se následně vyhodnocují jejich dráhy a vlastnosti.

Systém WILLIAM využívá celooblohovou kameru (digitální zrcadlovku Nikon D5100) pro snímání noční oblohy a vyhodnocení vhodných povětrnostních podmínek pro pozorování hvězd teleskopem. Zaznamenaná data jsou automaticky vyhodnocena na základě porovnání množství rozpoznávaných hvězd se známými hvězdami z astronomického katalogu. Po vyhodnocení výsledků systém odešle příkazy dalekohledu, zda jsou vhodné podmínky na pozorování či nikoliv.

Pro zajištění dostatečně velkého zorného úhlu celooblohové systémy většinou využívají širokoúhlé objektivy. Využití této optiky s sebou přináší jisté nedostatky v podobě optických vad či difrakcí světla. Tyto vady mohou zapříčinit deformaci výsledného snímku. Deformace se popisuje pomocí funkce PSF, která vyjadřuje impulzní odezvu systému. Vliv deformace obrazu je nejvíce znatelný na okrajích snímku.

Vzhledem k širokému záběru snímání mají celooblohové systémy velké nároky na obrazové senzory. Snímané objekty mohou dopadnout pouze na malou část senzoru (v řádu desítek pixelů), proto jsou velké nároky na rozlišení, velikost každého pixelu a šumové vlastnosti senzoru.

Úkolem této práce bylo zkoumání vlivu vzorkování na konečném rastru na tvar PSF. Za tímto účelem byly testovány snímky ze systému WILLIAM. Bylo vybráno několik pozic na snímané ploše s odlišným profilem. Na jednotlivé snímky byla aplikována sada funkcí, které testovaly, jak se změní profil snímků při posunu rastru v libovolném směru o méně než 1 pixel. Z testů plyne, že vhodným posunutím rastru o nepatrnou část lze částečně vylepšit profil snímaného objektu. Pro dosažení nejlepších výsledků je vyžadováno zvolení vhodného referenčního modelu.

7 Seznam použité literatury

- [1] Senzory pro DF. Fotofocus.cz [online]. [cit. 2017-02-17].
Dostupné z: http://www.fotofocus.cz/cz_senzory-pro-df,227.html
- [2] Inside Nikon D5200. Chipworks.com [online]. [cit. 2017-02-17].
Dostupné z: <http://www.chipworks.com/about-chipworks/overview/blog/inside-nikon-d5200-dslr-toshiba-found>
- [3] Encyklopedie fyziky: Fyzikální podstata [online]. [cit. 2017-04-03]. Dostupné z:
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/723-fyzikalni-podstata>
- [4] PIHAN, Roman. Mistrovství práce s DSLR, vydání deváté. Praha: IDIF, 2014. ISBN 978-80-905601-3-0.
- [5] Slovník fotografických pojmů. Fotoroman.cz [online]. [cit. 2017-02-17].
Dostupné z: <http://fotoroman.cz/glossary.htm>
- [6] KUBA, Petr. Televizní technika: studiové zpracování televizního signálu. Praha: BEN - technická literatura, 2000. ISBN 80-86056-88-0.
- [7] Moire. The-print-guide.blogspot.cz [online]. [cit. 2017-02-17].
Dostupné z: <http://the-print-guide.blogspot.cz/2009/12/moire.html>
- [8] Dpreview.com [online]. [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <https://www.dpreview.com>
- [9] Formáty a kodeky videa. Grantvideo.cz [online]. [cit. 2017-04-18].
Dostupné z: <http://www.grantvideo.cz/kodeky.html>
- [10] Obrazový procesor – ilustrace. Czc.cz [online]. [cit. 2017-02-17]. Dostupné z:
<https://www.czc.cz/nikon-d5300-18-55-vr-af-p-cervena/185049/produkt>
- [11] Vývoj snímacích čipů. Digimanie.cz [online]. [cit. 2017-02-17].
Dostupné z: <http://www.digimanie.cz/fotomobily-snimaci-cipy-cmos-vs-ccd/2885>
- [12] CMOS. Canon.com [online]. [cit. 2017-02-18].
Dostupné z: http://www.canon.com/technology/s_lab/light/003/05.html
- [13] Moravské přístroje - úvod do techniky CCD čipů. Gxccd.com [online].
[cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <http://www.gxccd.com/art?id=303&lang=405>
- [14] Ilustrace Super had CCD. Secutech.com. [online]. [cit. 2017-02-17].
Dostupné z: <http://www.secutech.com.au/support/>
- [15] Snímací čipy. Digimanie.cz [online]. [cit. 2017-02-17].
Dostupné z: <http://www.digimanie.cz/jak-si-vybrat-kompakt-snimaci-cipy/3253-2>

- [16] CMOS. Fairchildsemi.com [online]. [cit. 2017-04-18].
Dostupné z: <https://www.fairchildsemi.com/application-notes/AN/AN-77.pdf>
- [17] CMOS sensor. Canon.com [online]. [cit. 2017-02-18]. Dostupné z:
<http://www.canon.com/technology/approach/history/digital-tech.html#modal-01>
- [18] Imaging Technology. Fujifilmholdings.com [online]. [cit. 2017-02-18]. Dostupné z:
<http://www.fujifilmholdings.com/en/rd/technology/detail/core/imaging.html>
- [19] BSI CMOS. Sony.net [online]. [cit. 2017-02-18].
Dostupné z: <http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press/200806/08-069E/index.html>
- [20] BSI CMOS. Digimanie.cz [online]. [cit. 2017-02-17].
Dostupné z: <http://www.digimanie.cz/bsi-cmos-snimac-popis-technologie/3650-3>
- [21] velikost snímáče. Megapixel.cz [online]. [cit. 2017-02-17].
Dostupné z: <https://www.megapixel.cz/velikost-snimace>
- [22] Článek: proč je důležitá velikost snímáče fotoaparátu. Fotolab.cz [online].
[cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <https://www.fotolab.cz/blog/velikost-snimace/>
- [23] Šum v digitální fotografii. Fotoaparát.cz [online]. [cit. 2017-02-17].
Dostupné z: <https://www.fotoaparát.cz/clanek/323/sum-v-digitalni-fotografii-7193/>
- [24] Sekvenční snímání. Megapixel.cz [online]. [cit. 2017-02-17].
Dostupné z: <https://www.megapixel.cz/sekvencni-snimani>
- [25] Dynamický rozsah. Karf.cz [online]. [cit. 2017-02-18].
Dostupné z: <http://www.karf.cz/dynamicky-rozsah-digitalnich-fotoaparatu/>
- [26] CCD v astronomii. pozorovanislunce.eu [online]. [cit. 2017-04-18].
Dostupné z: <http://pozorovanislunce.eu/userfiles/files/dokumenty/workshop-II-ccd-v-astronomii-uprava.pdf>
- [27] Bolidová kamera. Spacedevices.i-line.cz [online]. [cit. 2017-04-18].
Dostupné z: http://spacedevices.i-line.cz/bolid_cz.html
- [28] Janout, P.; Páta, P.; Skala, P.; Bednář, J. PSF Estimation of Space-Variant Ultra-Wide Field of View Imaging Systems. *Appl. Sci.* 2017, 7, 151.
- [29] Uživatelé All-sky kamer. Allskycam.com [online]. [cit. 2017-04-18].
Dostupné z: <http://www.allskycam.com/whoare.php>
- [30] Moonglow technologies. Moonglowtech.com [online]. [cit. 2017-04-18].
Dostupné z: <http://www.moonglowtech.com/products/AllSkyCam/index.shtml>
- [31] Mapa All-sky kamer. Allskycam.com [online]. [cit. 2017-04-18].

- Dostupné z: <http://www.allskycam.com/index.php>
- [32] Alcor-systém. Alcor-system.com [online]. [cit. 2017-03-30].
Dostupné z: http://www.alcor-system.com/new/AllSky/Omea_camera.html
- [33] Astronomický ústav Akademie věd České republiky (Asú) [online]. [cit. 2017-03-30].
Dostupné z: <http://www.asu.cas.cz/cz/veda-a-vyzkum/vedecka-oddeleni/oddeleni-mph>
- [34] Piotrowski, L.W.; Batsch, T.; Czyrkowski, H.; Cwiok, M.; Dabrowski, R.; Kasprowicz, G.; Majcher, A.; Majczyna, A.; Malek, K.; Mankiewicz, L.; et al. PSF modelling for very wide-field CCD astronomy. *Astron. Astrophys.* 2013, 551, A119.
- [35] Janout, P.; Páta, P.; Bednář, J.; Anisimova, E.; Blažek, M.; Skala, P. Stellar objects identification using wide-field camera. In *SPIE Proceedings Vol. 9450: Photonics, Devices, and Systems VI*; SPIE:Washington, DC, USA, 2015; p.94501I.
- [36] Pierre Auger. Auger.org [online]. [cit. 2017-04-18].
Dostupné z: <https://www.auger.org/index.php/about-us/institutions>
- [37] Moravské přístroje – Pierre Auger. Gxccd.com [online].
[cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <http://www.gxccd.com/art?id=395&cat=128&lang=405>
- [38] Astronomický ústav Akademie věd České republiky (Asú): článek [online].
[cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.asu.cas.cz/articles/874/19/na-cem-pracujeme-jasna-perseida-s-neobvykle-vysokou-pocatecni-vyskou>
- [39] SOKOLOWSKI, Marcin. 'Pi of the Sky' project studies rapidly-varying astrophysical objects. *SPIE Newsroom* [online]. 2006, DOI: 10.1117/2.1200612.0516. ISSN 18182259.
- [40] Pi of the sky [online]. [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <https://www.pi.fuw.edu.pl/>
- [41] Janout, P.; Páta, P.; Celooblohová kamera s extrémně širokoúhlým zorným polem: All-sky camera with extreme wide-field of view. *Jemná mechanika a optika.* 2014, 59(10), 281-283. ISSN 0447-6441.
- [42] RMSE. www.kaggle.com [online]. [cit. 2017-05-24].
Dostupné z: <https://www.kaggle.com/wiki/RootMeanSquaredError>
- [43] Interpolation methods. www.mathworks.com [online]. [cit. 2017-05-24].
<https://www.mathworks.com/help/vision/ug/interpolation-methods.html>

8 Seznam obrázků

OBR. 1 - OBRAZOVÝ SENZOR [1]	8
OBR. 2 - STRUKTURA BAYEROVI MASKY [5]	9
OBR. 3 - PRINCIP INTERPOLACE U BAYEROVI MASKY [5]	9
OBR. 4 - PRINCIPY DĚLENÍ SVĚTLA DICHROICKÝMI ZRCADLY (VLEVO) A OPTICKÝM HRANOLEM (VPRAVO). [6]	10
OBR. 5 - ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA CELÉHO ŘETĚZCE	11
OBR. 6 VLEVO – VADA MOIRÉ U PROUŽKOVANÉ KOŠILE [7], VPRAVO – SADA FILTRŮ PŘED OBRAZOVÝM SENZOREM + ČISTÍCÍ MECHANISMUS [8].....	11
OBR. 7 – UKÁZKA OBRAZOVÝCH PROCESORŮ (VLEVO EXPEED ZNAČKY NIKON [10], VPRAVO DIGIC OD CANONU [8])...	13
OBR. 8 - JEDNA BUŇKA SENZORU CCD [6]	14
OBR. 9 – MECHANISMUS POSUVU NÁBOJE MEZI DVĚMA BUŇKAMI SENZORU	15
OBR. 10 - PRINCIP SNÍMAČE CCD TYPU FT.....	16
OBR. 11 - PRINCIPY SNÍMAČE CCD: TYP IT (VLEVO) A TYP FIT (VPRAVO).....	17
OBR. 12 – TECHNOLOGIE HAD CCD [14].....	18
OBR. 13 - TECHNOLOGIE SUPER HAD CCD [14]	18
OBR. 14 – SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ JEDNÉ BUŇKY SENZORU CMOS [18].....	19
OBR. 15 – POROVNÁNÍ TECHNOLOGII CMOS A BSI CMOS [19].....	20
OBR. 16 – TABULKA POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ CCD A CMOS.....	21
OBR. 17 -ZOBRAZENÍ PLOCH RŮZNÝCH FORMÁTŮ OBRAZOVÝCH SENZORŮ [8]	22
OBR. 18 – TABULKA POROVNÁVAJÍCÍ VELIKOST SENZORU, PLOCHU SENZORU A CROP FAKTOR V ZÁVISLOSTI NA FORMÁTU. [21]	23
OBR. 19 – OBRÁZEK ZNÁZORŇUJÍCÍ VELIKOST PIXELŮ U DVOU RŮZNĚ VELKÝCH SENZORŮ, SE SHODNÝM ROZLIŠENÍM [22]	24
OBR. 20 – ZÁVISLOST ÚROVNÍ SIGNÁLU A ŠUMU NA DOBĚ EXPOZICE [5]	26
OBR. 21 – UKÁZKY FOTEK Z CELOOBLOHOVÝCH ZAŘÍZENÍ SPOLEČNOSTI ALCOR SYSTEM [32]	29
OBR. 22 – UKÁZKA ZAZNAMENANÉHO BOLIDU A VÝVOJ JEHO STOPY [38]	30
OBR. 23 – BOLIDOVÁ KAMERA [27]	31
OBR. 24 – NÁVRH [39] A REALIZACE [40] JEDNÉ ČÁSTI SYSTÉMU „PI OF THE SKY“ SE ČTYŘMI KAMERAMI	32
OBR. 25 – SCHÉMA SYSTÉMU WILLIAM [35]	33

OBR. 26 – POROVNÁNÍ CÍRKULÁRNÍHO (VLEVO) A DIAGONÁLNÍHO (VPRAVO) OBJEKTIVU TYPU RYBÍ OKO [41].....	33
OBR. 27 – FOTOGRAFIE OBJEKTIVU A KRYTU SYSTÉMU WILLIAM [41]	34
OBR. 28 – PSF HVĚZDY VE STŘEDU (VLEVO) A NA OKRAJI SNÍMKU (VPRAVO) [34].....	35
OBR. 29 – ZMĚŘENÁ SENZITIVITA PIXELU PRO MODROU (LEVO), ČERVENOU (STŘED) A BÍLOU (PRAVO) DIODU [34] ...	36
OBR. 30 – PRINCIP FWHM ZNÁZORNĚNÝ NA GAUSSOVĚ FUNKCI.....	37
OBR. 31 – PARAMETRY VSTUPNÍCH SNÍMKŮ.....	38
OBR. 32 – POZICE BODOVÉHO ZDROJE SVĚTLA NA VSTUPNÍCH SNÍMČÍCH S OZNAČENÝMI VYBRANÝMI POLOHAMI.....	39
OBR. 33 – UKÁZKA VYŘÍZNUTÍ OBLASTI ODPOVÍDAJÍCÍ PROFILU A	39
OBR. 34 – UKÁZKA ČÁSTI MATICE A S VYZNAČENOU MAX. HODNOTOU A HODNOTAMI POD 700	39
OBR. 35 - PROFILY MATICE A AŽ F.....	40
OBR. 36 – FWHM VE VERTIKÁLNÍM A HORIZONTÁLNÍM SMĚRU MATICE A S MAX. HODNOTOU V BODĚ (10,12)	40
OBR. 37 – TABULKA VELIKOSTÍ FWHM V HORIZONTÁLNÍM (X) A VERTIKÁLNÍM (Y) SMĚRU A MAXIMÁLNÍCH HODNOT. .	41
OBR. 38 – STŘEDY MATICE A AŽ F S VYZNAČENÝMI HODNOTAMI, KTERÉ JSOU VĚTŠÍ NEŽ POLOVINA MAXIMA.....	41
OBR. 39 - APLIKACE RŮZNÝCH ZVĚTŠENÍ RASTRU S VYUŽITÍM BILINEÁRNÍ INTERPOLACE.....	42
OBR. 40 – FWHM VŠECH ZVĚTŠENÍ MATICE D	43
OBR. 41 – RMSE POROVNÁVAJÍCÍ VŠECHNA ZVĚTŠENÍ MATICE D S PŮVODNÍ MATICÍ	43
OBR. 42 – TESTOVACÍ MATICE X.....	44
OBR. 43 – ZVĚTŠENÁ (2x) MATICE X2.....	44
OBR. 44 – POSUNUTÁ (O 1PX SMĚREM NAHORU-DOPRAVA) MATICE X3	45
OBR. 45 – VÝSLEDNÁ MATICE X4.....	45
OBR. 46 – UKÁZKA POUŽITÍ FUNKCE ZOBRAZENÍ ŠIKMÝCH POSUNŮ	46
OBR. 47 – VYKRESLENÍ VÝSLEDKŮ	47
OBR. 48 – GRAFY RMSE V ZÁVISLOSTI NA POSUNECH S KROKEM 1/8 PIXELU VE VŠECH SMĚRECH, HODNOTA 0 NA OSE X ODPOVÍDÁ RMSE MEZI REFERENČNÍ MATICÍ A VSTUPNÍ MATICÍ BEZ POSUNU. ZÁPORNÉ HODNOTY ODPOVÍDAJÍ POSUNŮM O X/8 PIXELU VE SMĚRU NADEPSANÉM JAKO VLEVO, Kladné hodnoty odpovídají posunům o x/8 pixelu ve směru nadepsaném jako vpravo.	48
OBR. 49 – NEJNIŽŠÍ HODNOTY RMSE	48
OBR. 50 - POROVNÁNÍ PŮVODNÍ MATICE E A MATICE E POSUNUTÉ O N(2/8) P(4/8).	49

9 Seznam příloh

OBRÁZKY, GRAFY:

- I. Obrázky s výsledky vlivu posunu (matice A, B, E, F)
- II. Grafy RMSE (E3-D3) pro všechny směry posunu
- III. Výsledky vlivu zvětšení (matice D, E), grafy RMSE, FWHM

MATLAB:

Hlavní funkce:

- I. **Nahraj** ... Nahraje do programu definované matice A až F (všechny veliké 20x20 px, se středem v bodě [10,11])
- II. **Copy** ... Převeď matici na datový typ double
- III. **Zvětšení, posun, šikmy_posun, zmenšení_zpet** ... funkce popsané v kapitole 5.4.1
- IV. **RMSE** ... Vyhodnotí velikost RMSE mezi dvěma maticemi
- V. **FWHM** ... Vypočítá hodnotu FWHM v horizontálním a vertikálním směru

Zobrazovací funkce a skripty:

- I. **Zobraz_posuny** ... Vykreslí do grafů zadané posuny
- II. **Zobraz_sikme_posuny** ... Vykreslí do grafů zadané posuny v šikmém směru
- III. **Zobraz_vsechny_RMSE** ... Zobrazí v jediném grafu RMSE dvou matic, pro všechny směry posunu
- IV. **Interpolace** ... zobrazí požadované interpolace