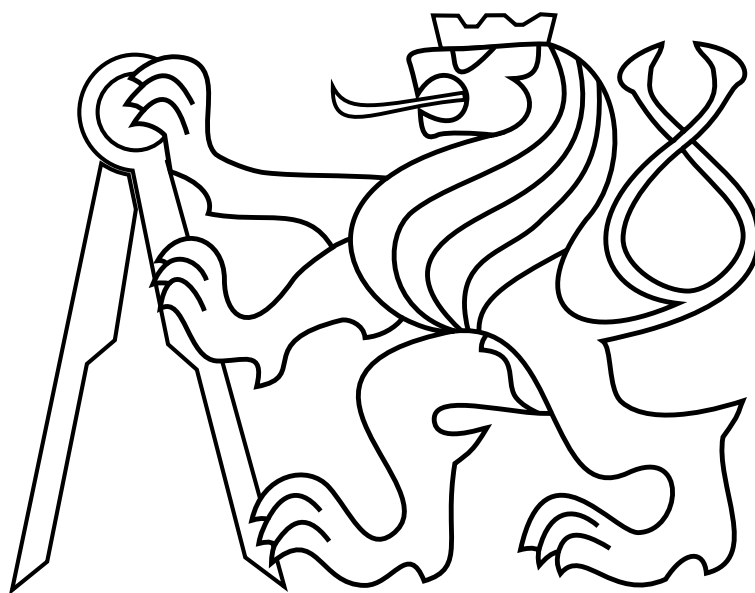


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Diplomová práce



Bc. Tomáš Mazanec

Metody korekce nehomogenity obrazu z mikrobolometrických senzorů

Katedra radioelektroniky

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

Studijní program: Elektronika a komunikace
Obor: Audiovizuální technika a zpracování signálů
Akademický rok 2017 / 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Mazanec** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **420301**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Studijní obor: **Audiovizuální technika a zpracování signálů**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Metody korekce nehomogenity obrazu z mikrobolometrických senzorů

Název diplomové práce anglicky:

Methods for Inhomogeneity Correction of Images from Microbolometric Sensors

Pokyny pro vypracování:

Cílem diplomové práce je analýza a popis současných metod korekce nehomogenity obrazu (NUC) na mikrobolometrických senzorech a následné zpracování postupu pro omezení nespojitých skoků hodnot v obraze pro ortofotogrametrické zpracování termovizních dat. Nastudujte současné metody korekce nehomogenity používané u mikrobolometrických senzorů (Non-Uniformity Correction). Dále nasnímejte datasety termovizních radiometrických snímků z bezpilotního prostředku na velké oblasti a tyto datasety následně analyzujte z hlediska aplikace NUC korekce v různých operačních podmínkách (změna okolní teploty, atmosférické jevy, apod.). Zaměřte se především na návrh metody pro kompenzace velkých skoků po NUC korekci.

Seznam doporučené literatury:

- [1] M. Bass a další, Handbook of Optics, I. - V., Optical Society of America, McGraw-Hill, 2009.
- [2] Paul W. Kruse, Uncooled Thermal Imaging Arrays, Systems, and Applications, SPIE PRESS BOOK, 2001
- [3] M. Vollmer, K.P. Möllmann, Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications, Wiley-VCH, 2nd edition, 2010.
- [4] A. Daniels, Field Guide to Infrared Systems, Detectors, and FPAs, Second Edition, SPIE PRESS BOOK, 2010.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **07.02.2018** Termín odevzdání diplomové práce: **25.05.2018**
Platnost zadání diplomové 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 děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

V Praze dne.....

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu doc. Mgr. Petru Pátovi Ph.D. za odborné vedení práce, věcné připomínky, cenné rady a vstřícnost při konzultacích a vypracovávání diplomové práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se věnuje teoretickému rozboru používaných metod pro korekci nehomogenit na snímcích z mikrobolometrických sensorů a následným návrhem algoritmu pro korekci nehomogenit způsobených jak rozdílným offsetem a ziskem senzoru, tak zejména vinětací objektivu. Navržený algoritmus, založený na běžných metodách pro zpracování snímků z mikrobolometrických sensorů respektive z IRFPA (infrared focal plane array), je implementován ve vývojovém prostředí Matlab. Následně je tento algoritmus otestován na snímcích z infračervené kamery a porovnán s korigovanými snímky přímo z kamery. Na závěr jsou shrnuty výsledky, pozitiva a negativa navrženého algoritmu.

Klíčová slova: termografie, termální kamera, infračervené kamery, korekce nehomogenit, NUC

Abstract

The thesis is focused on the theoretical analysis of methods which are used for the non-uniformity correction of images from microbolometer sensors and on the subsequent design of the algorithm for the non-uniformity correction of an image caused by different offset and gain of each bolometer and vignetting of lens. The proposed algorithm is based on conventional methods of processing images from microbolometer sensors, respectively IRFPA (infrared focal plane array) and is implemented in Matlab development environment. Subsequently this algorithm is tested on the images from an infrared camera and is compared with the corrected images from the camera. In conclusion we summarize the results, the positives and the negatives of the proposed algorithm.

Keywords: thermography, thermal camera, infrared camera, non-uniformity correction, NUC

Obsah

Seznam obrázků	III
Seznam tabulek	V
Seznam použitých zkratk	VI
1 Úvod	1
2 Úvod do infračervené techniky	2
2.1 Motivace	2
2.2 Základní pojmy a zákony v infračervené oblasti	2
2.3 Rovnice termografie	4
2.4 Termokamera	6
2.4.1 Optika	6
2.4.2 Detektor	7
2.4.2.1. Tepelné detektory	7
2.4.2.2. Fotonové (kvantové) detektory	9
2.4.2.3. Srovnání obou typů detektorů	9
2.4.3 Elektronika	10
2.5 Parametry termokamery	10
2.5.1 Spektrální rozsah	11
2.5.2 Teplotní rozsah	11
2.5.3 Teplotní citlivost	11
2.5.4 Rozlišení	12
2.5.5 Přesnost měření	12
2.5.6 Obrazová frekvence	12
2.5.7 Zorné pole	13
3 Kalibrace a korekce vad	14
3.1 Kalibrační postup termokamery	14
3.2 Vady v IR obraze a jejich korekce	14
3.3 Non-uniformity Correction	15
3.3.1 Reference-based NUC	16
3.3.2 Scene-based NUC	16
4 Přístrojové vybavení	18
4.1 Termokamera	18
4.2 Kalibrační černá tělesa	19
5 Popis vybraných metod korekce nehomogenit	21
5.1 Supplemental flat field correction	21
5.2 Algoritmus s odhadem offsetu detektoru	26

6 Implementace vybraných korekčních metod	29
6.1 Pořízení kalibračních a testovacích dat	29
6.1.1 Získání flat field a testovacích snímků	29
6.1.2 Formát dat	30
6.2 Implementace Supplemental flat field correction	30
6.2.1 Vyhodnocení algoritmu SFFC	32
6.3 Implementace algoritmu s odhadem offsetu detektoru - MTPC	36
6.3.1 Vyhodnocení algoritmu MTPC	37
6.4 Implementace modifikovaného algoritmu s odhadem offsetu detektoru	39
6.4.1 Vyhodnocení navrženého algoritmu	41
7 Srovnání implementovaných korekčních metod	45
7.1 Vyhodnocení účinnosti algoritmů	45
7.2 Testování algoritmů na nehomogenní scéně	49
8 Závěr	52
8.1 Diskuze možných vylepšení	53
9 Literatura	54
A Obrazové přílohy	56
B Grafy	62
C Dvd disk	67

Seznam obrázků

1	Elektromagnetické záření. [15]	3
2	Planckův vyzařovací zákon. [9]	4
3	Schéma rovnice termografie. [22]	5
4	Blokové schéma termokamery. [25]	6
5	Spektrální propustnost materiálů pro různé vlnové délky. [10]	6
6	Spektrální propustnost materiálů pro různé vlnové délky. [19]	7
7	Struktura mikrobolometru. [2]	8
8	Mikrobolometry uskupeny do 2D matice. [11, 13]	8
9	Spektrální citlivost pro různé typy detektorů. [27]	10
10	Srovnání termogramu pořízeného kamerami s rozdílnou teplotní citlivostí. [17]	11
11	Výsledný termogram. [12]	12
12	Zorné pole kamery při použití objektivů s rozdílnou ohniskovou vzdáleností. [25]	13
13	Katalogové parametry stacionární termokamery FLIR A655sc. [23]	13
14	Vinětace při snímání termokamerou.	14
15	NUC korekce znázorněná pomocí převodních charakteristik. (Převzato a upraveno z [16])	17
16	Kamerový modul TAU 2 [24]	18
17	Kalibrační černé těleso FLUKE 4148 [5]	19
18	Kalibrační černé těleso FLUKE 9133 [4]	19
19	Kalibrační černé těleso od firmy FLIR [3]	20
20	Schéma IR kamery dle patentu FLIR [26]	22
21	Schéma algoritmu pro výpočet SFFC mapy dle patentu FLIR [26]	23
22	Schéma možné konvoluční filtrace SFFC mapy dle patentu FLIR [26]	24
23	Aplikace SFFC mapy na nekorigované snímky dle patentu FLIR [26]	24
24	Škálování SFFC mapy v závislosti na rychlosti změny teploty [8]	25
25	Blokový diagram algoritmu korigující vinětační a offset termokamery [18].	28
26	Schéma algoritmu pro výpočet SFFC mapy dle patentu FLIR	30
27	Porovnání vlastností algoritmu SFFC v závislosti na zadaných parametrech pro testovací snímek pořízený při teplotě 45 °C	34
28	Obrázek (a) zobrazuje testovací nekorigovaný snímek, obrázek (b) zobrazuje korigovaný snímek	35
29	Obrázek (a) zobrazuje 3D model testovaného nekorigovaného snímku, obrázek (b) zobrazuje korigovaný snímek	35
30	Diagram implementovaného algoritmu	37
31	Vliv zvyšujícího se počtu snímků k průměrování na RMSE a SNR v korigovaném snímku	38
32	Obrázek (a) zobrazuje testovací nekorigovaný snímek, obrázek (b) zobrazuje korigovaný snímek	38
33	Obrázek (a) zobrazuje 3D model testovaného nekorigovaného snímku, obrázek (b) zobrazuje korigovaný snímek	39
34	Diagram modifikovaného algoritmu	40
35	Porovnání časové náročnosti výpočtu jednotlivých algoritmů	41
36	Porovnání vlastností navrženého algoritmu v závislosti na zadaných parametrech pro testovací snímek pořízený při teplotě 45 °C	42

37	Obrázek (a) zobrazuje testovací nekorigovaný snímek, obrázek (b) zobrazuje korigovaný snímek	43
38	Obrázek (a) zobrazuje 3D model testovaného nekorigovaného snímku, obrázek (b) zobrazuje korigovaný snímek	43
39	Vliv filtrace na RMSE a SNR v závislosti na N	44
40	Bloky pořízené v korigovaných snímcích	45
41	Obrázek (a) zobrazuje testovací nekorigovaný snímek, obrázek (b) zobrazuje korigovaný snímek	46
42	Obrázek (a) zobrazuje 3D model testovaného nekorigovaného snímku, obrázek (b) zobrazuje korigovaný snímek	46
43	Porovnání homogenity v korigovaných a nekorigovaném snímku pořízeného na homogenní ploše o teplotě 45 °C	47
44	Testovací nekorigovaný snímek 45-20-frame7 pořízený za teploty 45°C	48
45	Korigované snímky dle jednotlivých algoritmů (a) korekce z kamery FLIR, (b) korekce SFFC algoritmem, (c) korekce MTPC algoritmem, (d) korekce navrženou modifikací MTPC algoritmu	49
46	Testovací nekorigovaný snímek nehomogenní scény	50
47	Korigované snímky dle jednotlivých algoritmů (a) korekce z kamery FLIR, (b) korekce SFFC algoritmem, (c) korekce MTPC algoritmem, (d) korekce navrženou modifikací MTPC algoritmu	51
48	Testovací nekorigovaný snímek 25-20-frame7 pořízený za teploty 25°C	56
49	Korigované snímky dle jednotlivých algoritmů (a) korekce z kamery FLIR, (b) korekce SFFC algoritmem, (c) korekce MTPC algoritmem, (d) korekce navrženou modifikací MTPC algoritmu	57
50	Testovací nekorigovaný snímek 75-20-frame7 pořízený za teploty 75°C	58
51	Korigované snímky dle jednotlivých algoritmů (a) korekce z kamery FLIR, (b) korekce SFFC algoritmem, (c) korekce MTPC algoritmem, (d) korekce navrženou modifikací MTPC algoritmu	59
52	Testovací nekorigovaný snímek nehomogenní scény	60
53	Korigované snímky dle jednotlivých algoritmů (a) korekce z kamery FLIR, (b) korekce SFFC algoritmem, (c) korekce MTPC algoritmem, (d) korekce navrženou modifikací MTPC algoritmu	61
54	Porovnání vlastností navrženého algoritmu v závislosti na zadaných parametrech pro testovací snímek pořízený při teplotě 25 °C	63
55	Porovnání vlastností navrženého algoritmu v závislosti na zadaných parametrech pro testovací snímek pořízený při teplotě 75 °C	64
56	Porovnání homogenity v korigovaných a nekorigovaném snímku pořízeného na homogenní ploše o teplotě 25 °C	65
57	Porovnání homogenity v korigovaných a nekorigovaném snímku pořízeného na homogenní ploše o teplotě 75 °C	66

Seznam tabulek

1	Seznam použitých zkratk	VI
2	Srovnání hlavních rozdílů tepelných a fotonových detektorů	9
3	Základní parametry použitého kamerového modulu od firmy FLIR	18
4	Základní parametry kalibračního černého tělesa FLUKE 4181	19
5	Základní parametry kalibračního černého tělesa FLUKE 9133	20
6	Základní parametry kalibračního černého tělesa od firmy FLIR	20
7	Škálovací faktor k dané rychlosti změny teploty kamery	25
8	Proměnné parametry v algoritmu SFFC	32
9	Obsah disku	67

Seznam použitých zkratek

V tabulce č. 1 jsou vypsané všechny použité zkratky v této diplomové práci.

Zkratka	Význam
IR	Infrared
NIR	Near Wave Infrared
SWIR	Short Wave Infrared
MWIR	Medium Wave Infrared
LWIR	Long Wave Infrared
FIR	Far Wave Infrared
FOV	Field of View
NETD	Noise Equivalent Temperature Difference
NUC	Non-Uniformity Correction
FPA	Focal Plane Array
SFFC	Supplemental Falt Field Forrection
MSE	Mean Square Error
RMSE	Root Mean Square Error
SNR	Signal to Noise Ratio
MTPC	Modified Two Point Corecction

Tabulka 1: Seznam použitých zkratek

1 Úvod

Monitorování pomocí termokamer je v současné době velmi populární a na vzestupu. Jsou proto kladeny na termokamery čím dál větší nároky co se týče technických parametrů, jako jsou rozlišení termokamery, teplotní citlivost, teplotní rozsah a jiné. Jedním z důležitých parametrů je přesnost měření, která je ovlivněna mnoha aspekty, jako je například citlivost snímače, použitý objektiv, provozní podmínky a jiné. Aby tedy měření bylo co nejpřesnější, provádí se standardně několik korekcí, které by měly eliminovat vlivy mající negativní dopad na přesnost měření.

Tato diplomová práce si klade za cíl korigovat nehomogenitu v obraze, která je nejčastěji způsobená vinětací objektivu a časovou nestabilitou senzoru, který má v čase jiný offset a zisk pro každý pixel. Korekce by měla být provedena za použití vhodných algoritmů eliminujících tyto vlivy.

Práce je rozdělena do dvou částí. První část se věnuje teoretickému popisu základních informací z oblasti infračervené techniky. Dále byly po studiu nejčastěji používaných algoritmů ke korekci vinětace a nehomogenit ze senzoru vybrány dva algoritmy, které byly následně popsány, implementovány v prostředí Matlab a následně zhodnoceny. Druhá část práce se věnuje návrhu vhodné modifikace stávajících algoritmů, která by vykazovala zlepšení oproti stávajícím metodám. Tento návrh byl následně implementován v prostředí Matlab a porovnán se stávajícími algoritmy.

2 Úvod do infračervené techniky

Tato kapitola má za cíl podat čtenáři základní informace o infračervené technice.

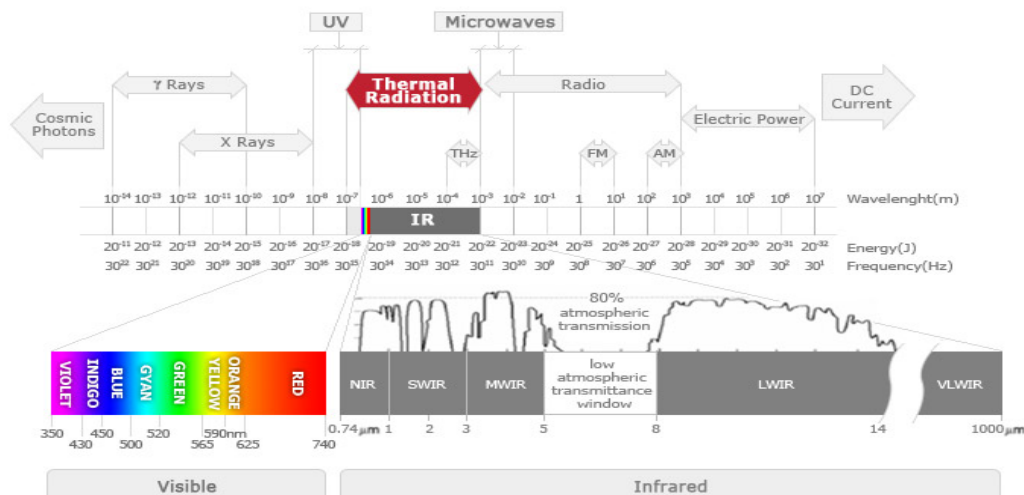
2.1 Motivace

V současné době je infračervená technika čím dál častěji využívána v řadě lidských odvětví a to jak na poli vědeckých, tak v oblasti průmyslových aplikací, kde se využívá například v medicíně, stavebnictví, strojírenství, elektroprůmyslu a chemickém průmyslu. Infračervená technika se hojně využívá v oblastech spektroskopické analýzy. Ve spektroskopické analýze se vychází ze znalostí, že každá látka absorbuje a odráží jiné spektrum a lze tak přesně identifikovat danou látku. Dále se IR oblast využívá v hyperspektrální analýze, telekomunikacích, zejména v optických vláknech, měřicí technice a v mnoha dalších oblastech. IR technika se také využívá například v termografii ke zjišťování tepelných ztrát ve stavebnictví a strojírenství, prediktivní údržbě elektrických zařízení, vyhledávání poškozených fotovoltaických panelů či hledání zánětů pod kůží. Dále termografie nachází využití pro záchranný hasičský sbor či při hledání osob. Jak je vidět IR technika má mnohé využití. V této práci se zaměříme na zpracování dat z IR kamery. Se zvyšujícím se využitím při potenciálu termokamer se zvyšují i nároky na pořízený obraz, který podléhá nejrůznějším vadám způsobeným ať už optikou nebo elektronikou. V této diplomové práci se zaměřím zejména na korekci nehomogenity obrazu z mikrobolometrických senzorů.

2.2 Základní pojmy a zákony v infračervené oblasti

Infračervené záření [13, 20, 25], též někdy nazývané jako tepelné záření, je elektromagnetické záření, které je definováno v rozmezí cca 760 nm až 1 mm. Jelikož je to poměrně velká oblast, bylo IR záření rozděleno ještě na dílčí oblasti. Jak je vidět na obrázku níže, je IR záření rozděleno na pět podoblastí. Dělení je následující:

- NIR (near infrared) 0,76 – 1 μm
- SWIR (short wave infrared) 1 – 3 μm
- MWIR (medium wave infrared) 3 - 8 μm
- LWIR (long wave infrared) 8 - 15 μm
- FIR/VLWIR (far / very long wav infrared) 15 - 1000 μm



Obrázek 1: Elektromagnetické záření. [15]

Infračervené kamery též zvané termokamery jsou přístroje, které se používají k bezdotykovému měření teploty. Fungují na principu snímání intenzity tepelného záření daného tělesa. Tepelné záření též nazývané sálání je spolu s vedením a prouděním jedním ze způsobů, jak lze přenášet teplo. Jelikož všechny předměty s teplotou vyšší než je absolutní nula vyzařují energii ve formě elektromagnetického záření, lze změřením intenzity tohoto záření nepřímo stanovit povrchovou teplotu měřeného objektu. Vztah mezi teplotou tělesa a vyzářenou intenzitou na dané vlnové délce popisují následující tři fyzikální zákony.

- Stefanův-Boltzmannův zákon, který říká, že celková intenzita vyzářená tělesem roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty. Tento zákon je definovaný následující rovnicí:

$$I = \varepsilon \sigma T^4, \quad (1)$$

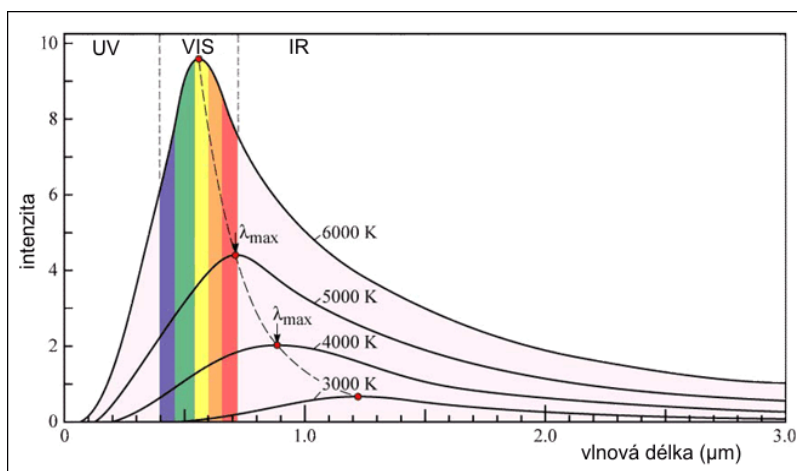
ε je emisivita povrchu měřeného tělesa, σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta, T je termodynamická teplota.

- Wienův posunovací zákon říká, že s rostoucí termodynamickou teplotou se maximální intenzita vyzářování posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám. Tento fakt je definovaný následující rovnicí:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}, \quad (2)$$

λ_{max} je vlnová délka maxima intenzity vyzářované energie, b je Wienova konstanta, T je termodynamická teplota.

- Planckův vyzářovací zákon, shrnuje dva předchozí a dává komplexnější náhled. Říká, kolik energie vyzáří dané těleso na dané vlnové délce při dané teplotě.



Obrázek 2: Planckův vyzařovací zákon. [9]

Díky výše zmíněným zákonům, jsme schopni měřit intenzitu vyzařování tělesa, respektive jsme schopni dopočítat povrchovou teplotu tělesa. Jelikož je tato práce zaměřena na obraz z mikrobolometrických senzorů pracujících v LWIR oblasti, bude nás zajímat právě tato oblast. Nicméně existují termokamery které pracují i v SWIR případně MWIR oblasti.

2.3 Rovnice termografie

Jak již bylo zmíněno výše, termokamery neměří povrchovou teplotu těles přímo, ale vypočítávají ji ze změřené intenzity tepelného záření tělesa a ze zadaných podmínek měření, za kterých se měření provádí. Tyto podmínky měření se velkou měrou podílí na výsledné povrchové teplotě tělesa, kterou kamera vypočítá. Proto je nutné zadat kameře určité parametry, za jakých podmínek měření probíhá [22, 21, 25, 14]. Tyto parametry jsou:

- Emisivita, což je bezrozměrná veličina, která reprezentuje schopnost tělesa vyzařovat teplo a je definovaná jako poměr mezi intenzitou vyzařování reálného tělesa a intenzitou vyzařování absolutně černého tělesa. Také je nutné vzít do úvahy, že emisivita reálného tělesa není konstantní, nýbrž je závislá na několika parametrech zejména pak vlnové délce, teplotě tělesa, struktuře povrchu, barvě povrchu a dalších okolnostech.
- Odražená zdánlivá teplota reprezentuje odraz tepelného záření od povrchu měřeného objektu. Kromě tepelného záření, které vyzařuje měřené těleso, se může od povrchu měřeného tělesa odrazit tepelné záření z okolí. Abychom mohli korigovat toto nežádoucí odražené tepelné záření, je nutné znát emisivitu a odrazivost povrchu měřeného tělesa. Obecně platí, že čím větší je emisivita, tím menší je odrazivost povrchu tělesa a tím menší je vliv odražené teploty. Proto se snažíme pro danou aplikaci měření vybrat takovou IR kameru s daným spektrálním rozsahem, kde má měřené těleso co možná největší emisivitu.

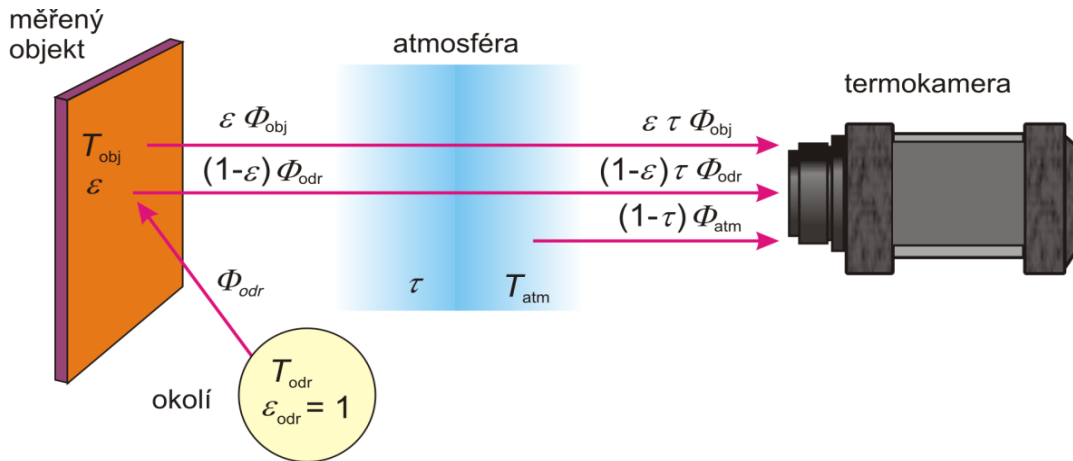
Mezi emisivitou a odrazivostí tělesa platí následující vztah:

$$\rho = 1 - \varepsilon \quad (3)$$

ρ je odrazivost povrchu měřeného tělesa, ε je emisivita povrchu měřeného tělesa.

- Parametry atmosféry. Mezi tyto parametry patří atmosferická teplota, atmosferická vlhkost a vzdálenost mezi měřeným tělesem a kamerou. Vzdálenost a atmosferická vlhkost mají rozhodující vliv na útlum tepelného záření tělesa, které se snažíme změřit. Čím je vzdálenost mezi měřeným tělesem a kamerou větší, tím je větší útlum záření. Atmosféra je však též zdrojem tepelného záření, které v našem měření působí rušivě. Abychom mohli toto záření eliminovat, musíme znát atmosferickou teplotu. Obecně platí, že čím vzdálenější tělesa jsou měřena, tím více se uplatní vliv atmosféry. Tyto parametry lze nastavovat pouze u pokročilejších termokamer.

Rovnice, pomocí které se dopočítává správná povrchová teplota měřeného tělesa, se nazývá rovnice termografie [22, 21, 25, 14, 12]. Tato rovnice zohledňuje všechny výše zmíněné parametry a díky nim lze dopočítat povrchovou teplotu tělesa. Je důležité znát tyto parametry, abychom mohli správně korigovat nežádoucí vlivy, jelikož záření dopadající na senzor je součtem všech výše zmíněných parametrů. Tuto skutečnost lze vidět na obrázku č.3.



Obrázek 3: Schéma rovnice termografie. [22]

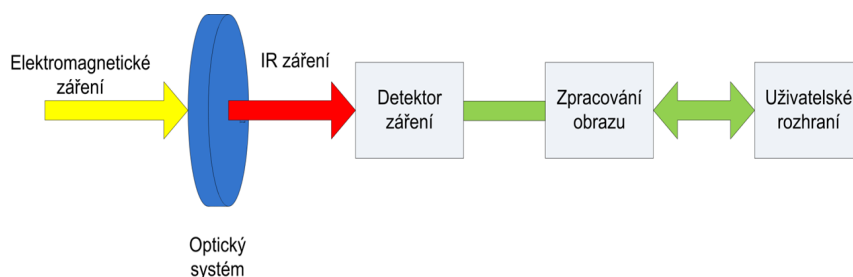
Obrázek č.3 znázorňuje měření pomocí termokamery a lze na něm demonstrovat rovnici termografie. Celkový zářivý tok, který dopadne na senzor, lze stanovit jako součet všech parametrů.

$$\Phi_{celk} = \varepsilon\tau\Phi_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau\Phi_{odr} + (1 - \tau)\Phi_{atm} \quad (4)$$

Φ_{celk} je celkový zářivý tok dopadající na detektor kamery, ε je emisivita povrchu měřeného tělesa, τ definuje vliv atmosféry, Φ_{obj} je zářivý tok měřeného objektu. Tento součin $\varepsilon\tau\Phi_{obj}$ můžeme chápat jako zářivý tok měřeného objektu zeslabený atmosférou. $(1 - \varepsilon)$ vyjadřuje odrazivost měřeného povrchu, Φ_{odr} je odražený zdánlivý zářivý tok z okolních zdrojů, odražený od povrchu měřeného tělesa, $(1 - \tau)\Phi_{atm}$ vlastní vyzařování atmosféry.

2.4 Termokamera

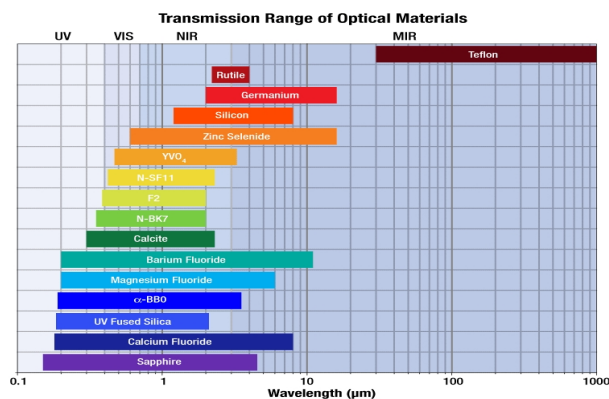
Konstrukce termokamer [25] je principiálně shodná s konstrukcí klasických kamer, respektive fotoaparátů. Objektiv shromažďuje a soustřeďuje paprsky tepelného záření na detektor, který zaznamenává intenzitu tepelného záření. Tato informace o intenzitě se následně digitalizuje a pomocí další elektroniky, vylepšující obraz pomocí různých algoritmů, získáme rozložení povrchové teploty měřeného objektu. Takto pořízený snímek se pak nazývá termogram. Stejně jako u běžných snímků, tak i termogram, je složen z jednotlivých pixelů (to je dáno diskretní strukturou senzoru), které odpovídají povrchové teplotě daného objektu v daném bodě. Blokové schéma konstrukce kamery je znázorněno na obrázku č.4.



Obrázek 4: Blokové schéma termokamery. [25]

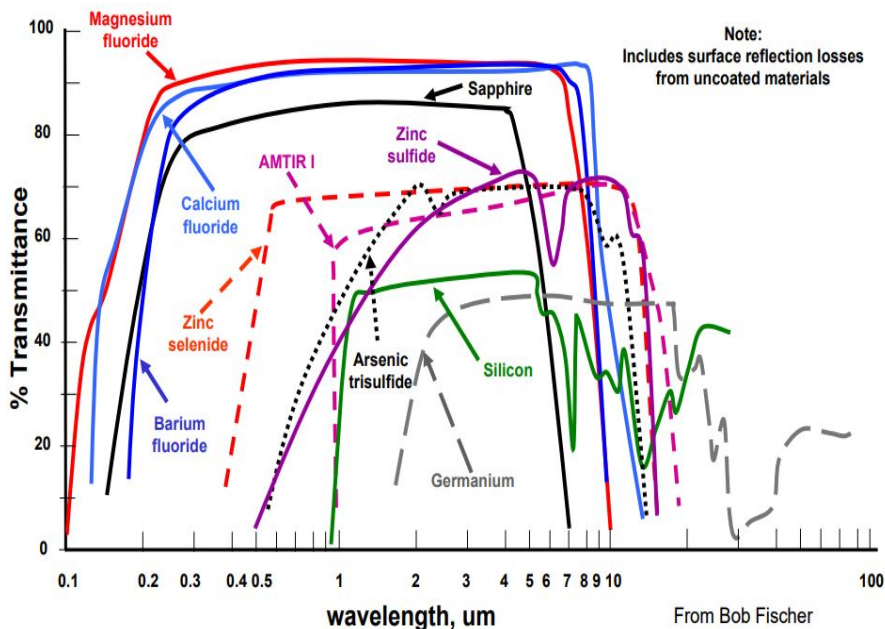
2.4.1 Optika

Optický člen, nebo chceme-li objektiv, používaný u termokamer [6, 10, 25], má stejnou funkci jako objektiv u klasických kamer. Shromažďuje a soustřeďuje paprsky IR záření na detektor. Oproti klasickým objektivům jsou však vyrobeny z jiných materiálů. Ve většině případů se používá germanium, které propouští paprsky v IR oblasti a naopak jiné oblasti utlumí. Dá se tedy říci, že též plní funkci filtru. Objektivy se samozřejmě dají vyrobit i z jiných materiálů, které disponují jinou spektrální propustností a lze je tedy použít na různé aplikace. Na následujícím schématu lze vidět, které materiály jsou propustné pro které vlnové délky.



Obrázek 5: Spektrální propustnost materiálů pro různé vlnové délky. [10]

Na obrázku č.6 pak můžeme vidět spektrální propustnost materiálů pro různé vlnové délky.



Obrázek 6: Spektrální propustnost materiálů pro různé vlnové délky. [19]

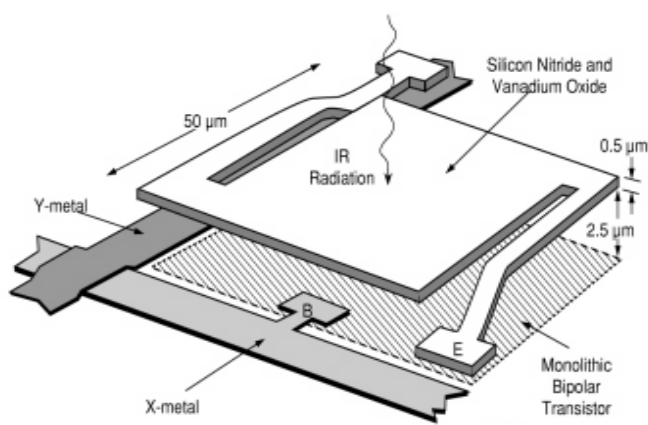
2.4.2 Detektor

Detektor [6, 25, 13, 16] pracuje v principu stejně jako standardní senzor, který se používá v kamerách či fotoaparátech. Liší se pouze v tom, že detektor zaznamenává IR záření nikoliv viditelné světlo. Toto záření a převede na elektrický signál, zdigitalizuje a zpracuje. Rozlišujeme dva základní typy IR detektorů a to tepelné a fotonové (kvantové). Tyto dvě skupiny detektorů se liší ve svém principu.

2.4.2.1. Tepelné detektory

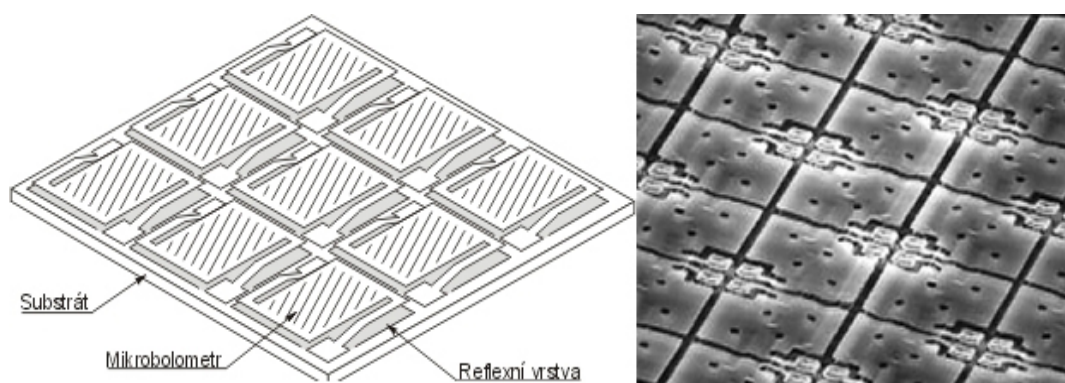
Tepelné detektory můžeme dále rozdělit na dvě hlavní skupiny: mikrobolometrické senzory [11, 16] a pyroelektrické senzory. Oba typy senzorů fungují na principu změny elektrických vlastností (typicky odpor, vodivost či napětí) v závislosti na teplotě detektoru, který je ohříván dopadajícím IR zářením. Hlavní výhodou těchto senzorů je, že dokáží pracovat při pokojové teplotě oproti fotonovým detektorům, které potřebují chlazení. Mikrobolometrické senzory pracují na relativně jednoduchém principu. Mikrobolometr mění svůj elektrický odpor v závislosti na své teplotě. Ta je závislá na množství absorbovaného dopadajícího infračerveného záření. IR záření v zásadě ohřívá mikrobolometry, které tak mění svůj odpor. Každý mikrobolometr je pokryt teplotně citlivým odporovým materiálem, který je schopný absorbovat IR záření. Tyto teplotně citlivé vrstvy jsou obvykle vyráběny z oxidů vanadu, nebo amorfního křemíku. Jednotlivé mikrobolometry jsou uskupeny do matice a vznikne tak

2D pole. Snímač detektoru je kromě mikrobolometrů vybaven vyčítací elektronikou a pomocnými obvody, které dokáží ze změny odporu mikrobolometru zjistit hodnotu intenzity dopadajícího IR záření. Následně tuto hodnotu zdigitalizují a použijí ji pro výpočet povrchové teploty v každém bodě snímané scény. Mikrobolometry mají můstkovou strukturu, která zajišťuje dobrou teplotní izolaci od monolitického křemíkového substrátu, na kterém se nejčastěji mikrobolometrická pole vyrábí. Teplotní izolace mikrobolometrů od svého okolí je důležitá, jelikož chceme docílit, aby změna teploty mikrobolometru byla úměrná pouze absorbovanému IR záření. V současné době se velmi často pod mikrobolometry nanáší reflexní vrstva, která má za úkol odrazit zpět do mikrobolometru IR záření, které nebylo absorbováno. Zlepší se tak účinnost celého snímače. Další výhodnou reflexní vrstvou je, že eliminuje vliv teploty substrátu, protože toto teplo odrazí zpět. Na následujícím obrázku č.7 je znázorněna struktura mikrobolometru.



Obrázek 7: Struktura mikrobolometru. [2]

Na obrázku níže pak můžeme vidět uspořádání mikrobolometrů do 2D matice, která dokáže zachytit celou snímanou scénu.



Obrázek 8: Mikrobolometry uskupeny do 2D matice. [11, 13]

Pyroelektrické detektory jsou založeny na pyroelektrickém jevu. Ten je vyvolán u některých krystalických materiálů vlivem změny teploty, kdy dojde k pohybu atomů v krystalické mřížce a následně tak vznikne přechodová polarizace materiálu. Se změnou teploty tedy vzniká náboj, který je následně detekován.

2.4.2.2. Fotonové (kvantové) detektory

Na rozdíl od tepelných detektorů, které fungují na principu přeměny IR záření na teplo, které posléze mění odpor bolometru, fungují na principu vnitřního fotoelektrického jevu. Dopadající IR záření absorbované detektorem dodá energii elektronům uvnitř polovodiče. Tyto elektrony se dostanou do excitovaného stavu a stanou se z nich volné elektrony, které jsou schopny nést elektrický proud. Zvýší se tak vodivost materiálu. Lze tak získat elektrický signál přímo po dopadu IR záření. To, na které vlnové délky bude polovodičový detektor citlivý, lze ovlivnit jeho složením. Často se v IR oblasti používají detektory vyrobené z InGaAs, HgCdTe, QWIP, InSb a další. Kamery s fotonovými detektory jsou výrazně citlivější, než kamery s tepelným detektorem. Vyžadují však chlazení a to až k teplotám 77K. Chlazení je nezbytné kvůli eliminaci šumu na detektoru, který je do značné míry ekvivalentní teplotě detektoru.

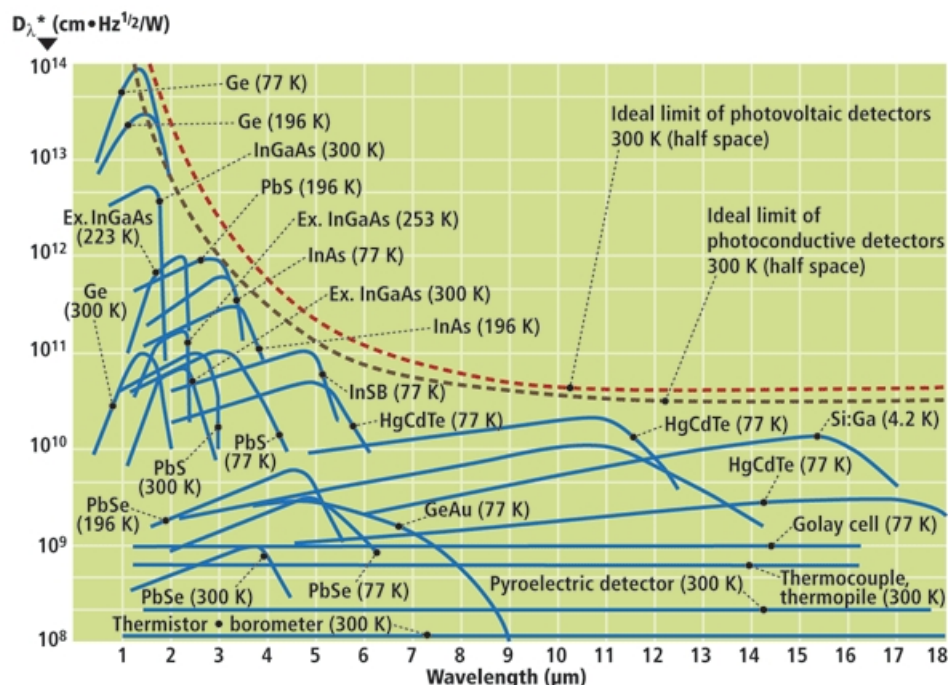
2.4.2.3. Srovnání obou typů detektorů

Porovnáme-li oba výše zmíněné typy detektorů, můžeme konstatovat následující fakta. Fotonové detektory jsou výrazně citlivější a přesnější než-li tepelné detektory. Vyžadují však masivní chlazení, což zapříčiňuje větší rozměry kamery a samozřejmě se to projeví i na ceně. V současné době dosahuje teplotní citlivost (NETD - Noise Equivalent Temperature Difference) u tepelných detektorů až k 30 mK. U fotonových chlazených detektorů bývá tato citlivost ještě větší a dostává se až pod hodnotu menší než 20 mK. Co se týká spektrální citlivosti detektorů, tak tepelné detektory bývají širokopásmové a méně citlivé oproti fotonovým detektorům, které bývají úzkopásmové, avšak podstatně citlivější. U fotonových detektorů bývá spektrální rozsah a citlivost závislý na materiálu a typu detektoru. Zatímco fotonové detektory mohou v úzkopásmovém režimu pracovat jak v SWIR, MWIR tak i LWIR oblasti, tepelné detektory pracují obvykle jen v LWIR oblasti a to typicky mezi 7 - 14 μm . Všechny výše zmíněné rozdíly definují některé parametry termokamery. V následující tabulce jsou shrnuty nejdůležitější rozdíly mezi detektory.

Vlastnost	Tepelný detektor	Fotonový detektor
spektrální citlivost	širokopásmová	úzkopásmová
teplotní citlivost	nízká	vysoká
pracovní teplota	pokožová	nízká teplota (nutné chlazení)
nejčastější typ	mikrobolometr	InSb, QWIP a další
cena	nízká	vysoká

Tabulka 2: Srovnání hlavních rozdílů tepelných a fotonových detektorů.

Na následujícím obrázku je vidět spektrální citlivost jednotlivých typů detektorů.



Obrázek 9: Spektrální citlivost pro různé typy detektorů. [27]

2.4.3 Elektronika

Detektor s objektivem však k pořízení kvalitního termogramu nestačí. Další zpracování je velmi podobné jako je zpracování signálu ve fotoaparátu nebo kameře. Po získání elektrického signálu z detektoru musí být tento signál zesílen a posléze zdigitalizován. To vše zajišťují další elektronické součástky. Po vyčtení signálu ze senzoru a převedení na digitální hodnotu pomocí A/D převodníku se pomocí různých algoritmů obraz vylepší. Dále za pomoci rovnice termografie, která vychází ze zadaných podmínek měření, si kamera dopočítá povrchovou teplotu měřené scény a pokud má kamera zabudovaný displej, tak uživateli rovnou zobrazí náhled scény se získanými teplotami.

2.5 Parametry termokamery

Všechny termokamery stejně jako všechny měřící přístroje mají určité parametry, které ovlivňují jejich použitelnost pro danou aplikaci [25]. Tyto parametry samozřejmě z velké části ovlivňují i cenu zařízení. Nejdůležitější parametry, které definují termokamery, jsou popsány níže.

2.5.1 Spektrální rozsah

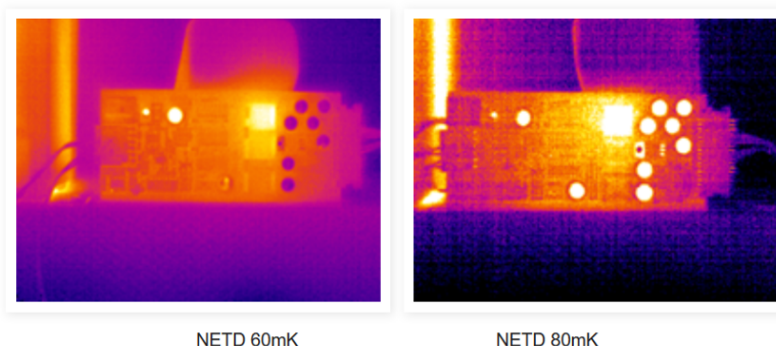
Spektrální rozsah termokamery udává rozsah vlnových délek, ve kterých je termokamera citlivá na IR záření. Jak již bylo zmíněno výše, termokamery s tepelným detektorem jsou citlivé typicky v rozsahu 7 - 14 μm . Termokamery s fotonovým detektorem bývají úzkopásmové, avšak podle typu použitého detektoru mohou být tyto kamery citlivé cca od 0,75 μm až do 14 μm .

2.5.2 Teplotní rozsah

Teplotní rozsah je rozsah, který definuje, jakou nejmenší a největší teplotu dokáže termokamera zaznamenat. V současné době nabízí mnoho termokamer 2 až 3 teplotní rozsahy. Ty však nelze měnit po pořízení termogramu a proto je důležité zvolit správný teplotní rozsah již před pořízením termogramu.

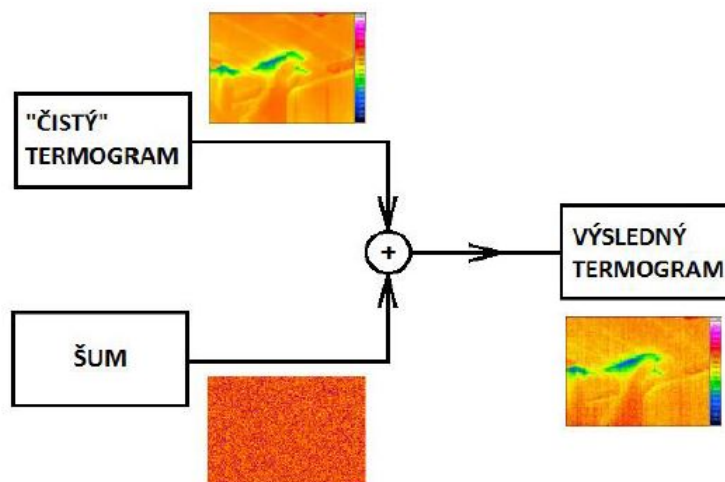
2.5.3 Teplotní citlivost

Teplotní citlivost [17] je jeden z velmi důležitých parametrů, udává jaký musí být nejmenší rozdíl teplot na povrchu měřeného objektu, aby byla kamera schopná tento rozdíl zaznamenat. Tento parametr je v praxi udáván pomocí parametru NETD (noise equivalent temperature difference), který definuje nejmenší rozdíl teplot, který vyvolá signál větší než je vlastní šum systému. Jinak řečeno rozdíl teplot na povrchu měřeného objektu musí být větší než vlastní šum systému. V praxi to znamená, jaký nejmenší teplotní rozdíl dokáže termokamera zaznamenat. Tento parametr se udává ve stupních Celsia nebo v Kelvinech. Tato hodnota bývá u kamer s tepelnými senzory typicky kolem 30 mK a více, kdežto u kamer s fotonovým detektorem se dostaneme i pod 20 mK. Teplotní citlivost velmi ovlivňuje kvalitu pořízeného termogramu. Jeli teplotní citlivost příliš malá, čili hodnota NETD je velká, tak je výsledný termogram zašuměný a může docházet k chybám při měření. Je tedy potřeba předem definovat co bude termokamerou snímáno a jaké detaily chceme pozorovat. Na následujícím obrázku můžeme vidět, jak se liší stejná scéna nasnímaná kamerami s různou teplotní citlivostí.



Obrázek 10: Srovnání termogramu pořízeného kamerami s rozdílnou teplotní citlivostí. [17]

V praxi se šum kamery přičte k nezkraslenému obrazu. Čím větší tedy bude šum, tím horší obraz dostaneme. Následující obrázek ukazuje, jak se získá výsledný obraz s přičtením šumu.



Obrázek 11: Výsledný termogram. [12]

2.5.4 Rozlišení

Každý senzor je složen z mnoha samostatných detektorů tzv. pixelů. Počet těchto pixelů nám udává rozlišení termokamery, tedy výslednou velikost pořízeného termogramu. Lze říci, že čím více bude mít senzor pixelů, tím více detailů můžeme pozorovat. Typické rozlišení současných termokamer bývá 160 x 120, 320 x 240, 640 x 480 pixelů. Nejvyšší řady termokamer mohou mít i 1024 x 768 pixelů.

2.5.5 Přesnost měření

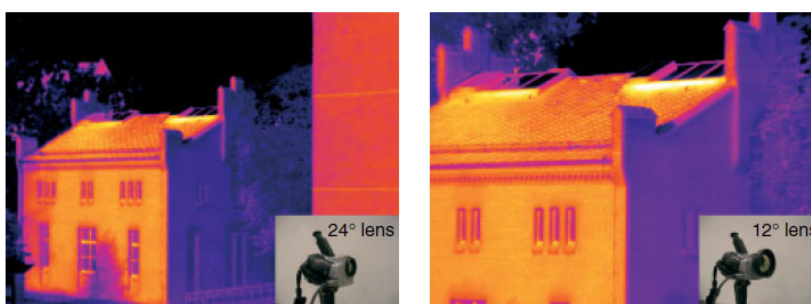
Přesnost měření se typicky udává v procentech nebo ve stupních Celsia, podle toho, která hodnota vychází hůř. U současných kamer se přesnost stanovení teploty pohybuje obvykle mezi $\pm 2^\circ\text{C}$ nebo $\pm 2\%$ ze změřeného údaje .

2.5.6 Obrazová frekvence

Obrazová frekvence udává, s jakou frekvencí se obnovuje obraz. Podle tohoto parametru můžeme danou kameru používat na různé aplikace. Pokud například chceme snímat velmi rychlé děje, je třeba, aby kamera měla vysokou obrazovou frekvenci. Typická hodnota u běžných termokamer bývá 30 nebo 60 Hz.

2.5.7 Zorné pole

Stejně jako u klasických fotoaparátů či kamer i u termokamer je velmi důležitý parametr zorné pole, které dokáže termokamera zaznamenat. Zorné pole též označované jako FOV (Field of view) udává, jak velkou část prostoru dokáže kamera zachytit. Zorné pole je závislé na velikosti senzoru a na ohniskové vzdálenosti objektivu. Platí však, že čím je ohnisková vzdálenost větší, tím je zorný úhel objektivu menší a tím je i zorné pole menší, což znamená, že kamera zaznamená menší část prostoru. Naopak malá ohnisková vzdálenost odpovídá velkému zornému poli a tím pádem kamera zaznamená větší část snímané scény. Zvolíme-li však příliš velké zorné pole, při nedostatečném rozlišení senzoru může dojít k chybě měření. Na následujícím obrázku je vidět rozdíl při použití rozdílných objektivů.



Obrázek 12: Zorné pole kamery při použití objektivů s rozdílnou ohniskovou vzdáleností. [25]

Obrázek níže znázorňuje katalogový list s parametry pro stacionární termokameru FLIR A655sc.



Označení	FLIR A655sc
IR detektor	Nechlazený mikrobolometr
Spektrální rozsah	7.5 – 14.0 μm
Rozlišení	640 x 480
Teplotní citlivost (NETD)	<30 mK
Obrazová frekvence (plné rozlišení)	50 Hz
Standardní teplotní rozsah	-40°C to 150°C 100°C to 650°C
Nejistota měření	$\pm 2^\circ\text{C}$ nebo $\pm 2\%$ z údaje (platí horší z obou hodnot)

Obrázek 13: Katalogové parametry stacionární termokamery FLIR A655sc. [23]

3 Kalibrace a korekce vad

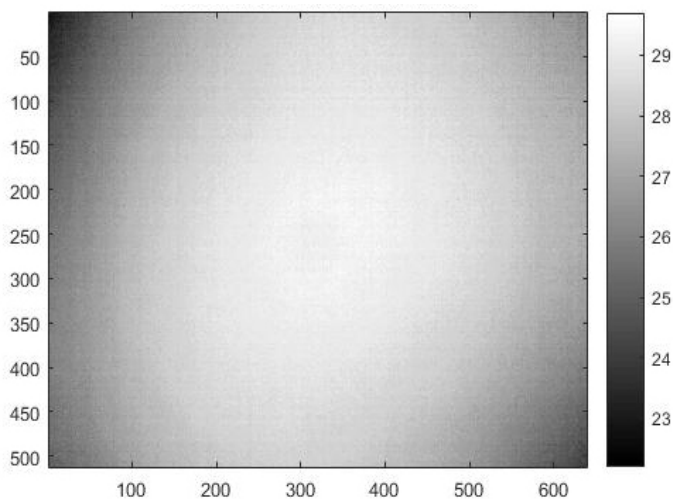
Tato kapitola má za úkol definovat, jaké vady v obraze mohou nastat a jak se obvykle tyto vady korigují v průběhu kalibračního cyklu, či při standardním používání zařízení [16, 6, 11].

3.1 Kalibrační postup termokamery

Každá termokamera vlivem výrobních nedokonalostí, šumu, provozní teploty a dalších vlivů může měřit s odchylkou od skutečné hodnoty. Jelikož je však žádoucí, aby každá termokamera měřila teploty co možná nejpřesněji s definovanou odchylkou, je zapotřebí každou termokameru nejprve zkalibrovat. Kalibrace se většinou provádí na tzv. kalibračních tělesech infračerveného záření, které se též nazývají černá tělesa. Tato kalibrační černá tělesa se považují za homogenní zářiče. Za definovaných podmínek se provede měření dané termokamery na kalibračním černém tělese a získá se tak závislost naměřené hodnoty kamerou vůči nastavené teplotě na černém tělese. Získáme tak křivku, podle které lze korigovat výchylinky měřené teploty od skutečné.

3.2 Vady v IR obraze a jejich korekce

Na správné měření teploty mají však vliv i další aspekty, které mohou zkreslit termogram. Tyto vady či zkreslení můžeme rozdělit do dvou skupin, multiplikativní zkreslení a aditivní zkreslení. Mezi multiplikativní zkreslení patří například vinětace objektivu, která zhoršuje propustnost IR záření od středu ke kraji objektivu. Nejvíce se tedy vinětace projeví v rozích pořízeného termogramu. To lze pozorovat na obrázku níže. Na přiložené stupnici teplot je vidět, že se snižující se propustností IR záření v rozích se mění i měřená teplota. Proto je nutné vinětaci korigovat.



Obrázek 14: Vinětace při snímání termokamerou.

Vinětace se obvykle koriguje aplikací flat field snímku na zkreslený snímek. Flat field snímek má za úkol simulovat vlastnosti optické soustavy. Lze ho získat expozicí homogenního IR zářiče. Obvykle se pořídí i několik flat field snímků, které se zprůměrují a získá se tak průměrný flat field. Takto získaný snímek eliminuje náhodné výkyvy hodnot pixelů ve snímku. Tímto flat field snímkem se posléze koriguje vinětace. To se většinou provádí tak, že se flat field snímkem vydělí nekorigovaný obraz a to celé se vynásobí konstantou, která odpovídá průměrné hodnotě flat field snímku. Za další vlivy multiplikativního zkreslení můžeme považovat například nerovnoměrné ozáření snímače a jiné.

Mezi aditivní zkreslení pak můžeme zahrnout šum senzoru a elektroniky, který se může zhoršit se zvyšující se provozní teplotou. Toto zkreslení se obvykle dá eliminovat odečtením tzv. temného snímku od zkresleného snímku. Temný snímek lze získat při expozici se zamezením průchodu veškerého záření na snímač. Získáme tak defakto šum snímací soustavy. Mění-li se však provozní teplota a podmínky kamery, mění se tím i aditivní zkreslení. Z tohoto důvodu se provádí tzv. NUC (Non-Uniformity Correction) korekce. Ta má za úkol pomocí mechanické záklopky či clonky (anglicky shutter) nasimulovat homogenní zářič s velkou emisivitou a podle něj poté nastavit převodní charakteristiky jednotlivých mikrobolometrů na stejnou hodnotu. Tato NUC korekce se obvykle provádí po uplynutí určité doby (v řádu minut) nebo na příkaz uživatele. Ve chvíli, kdy se poté provede po určité době provozu NUC korekce, může dojít k teplotnímu skoku ve scéně. Tato práce se bude zabývat odstraněním zejména multiplikativního a aditivního zkreslení.

3.3 Non-uniformity Correction

Jak bylo zmíněno výše, rozlišujeme dva základní typy detektorů a to tepelné a fotonové. V této práci se budeme zabývat kamerami zejména s tepelnými detektory na bázi mikrobolometrů pracující v oblasti LWIR. Tyto detektory jsou vyrobeny jako pole jednotlivých mikrobolometrů, též nazývané FPA (focal plane array). To má za následek, že každý jednotlivý detektor má jinou odezvu na stejný podmět a to proto, že každý detektor má rozdílný zisk a offset. K těmto parametrům lze ještě uvažovat aditivní šum elektroniky. Je tedy nutné provést tzv. non-uniformity correction neboli NUC [16, 6, 11, 14, 18, 28]., který má za úkol zkorigovat převodní charakteristiky jednotlivých mikrobolometrů na stejnou hodnotu, aby celý snímač jako celek měl stejnou odezvu na homogenní podmět ve všech bodech. Odezvu mikrobolometrů můžeme definovat podle [11] jako:

$$Y_{i,j}(n) = A_{i,j}(n) * X_{i,j}(n) + B_{i,j}(n) + u_{i,j}(n) \quad (5)$$

kde $X_{i,j}(n)$ reprezentuje záření dopadající na snímač, respektive vstupní signál, $Y_{i,j}(n)$ je odezva detektoru na pozici i,j v čase n , $A_{i,j}(n)$ je koeficient zisku snímače na pozici i,j , $B_{i,j}(n)$ je offset detektoru na pozici i,j , $u_{i,j}(n)$ je aditivní šum i,j ,

NUC korekce má za úkol nalézt takové kompenzační koeficienty pro každý element na senzoru, aby všechny pixely měly stejný zisk a offset. Jinak řečeno, aby všechny pixely měly stejnou odezvu na stejný signál. V současné době je mnoho metod jak provádět NUC. Tyto metody lze rozdělit na dvě skupiny.

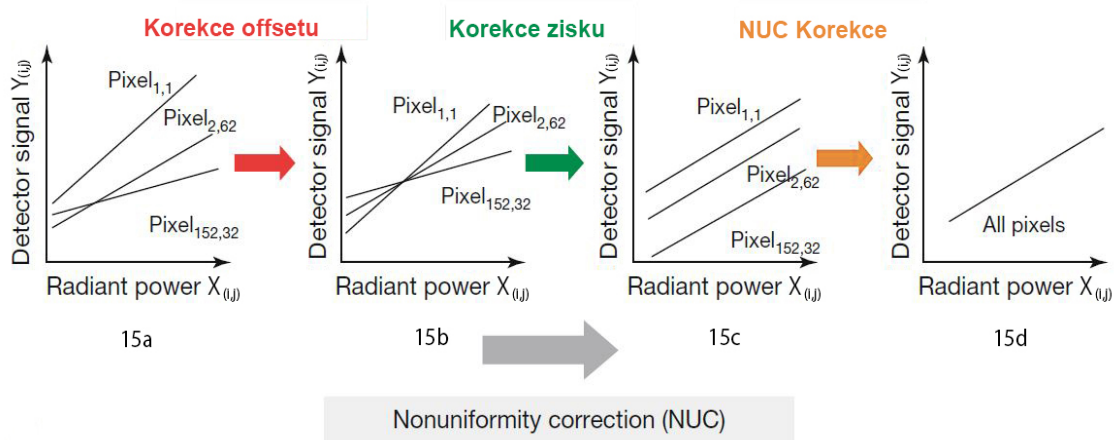
3.3.1 Reference-based NUC

První skupinou jsou metody, které jsou založeny na pořízení referenčních snímků homogenního zářiče. Tyto metody se též nazývají jako Calibration-based nebo také Reference-based [16, 11, 18, 28]. Typicky používané algoritmy založené na této metodě jsou například jednobodová, dvoubodová, vícebodová nebo polynomiální kalibrace. K této metodě je však zapotřebí kalibrované homogenní černé těleso s proměnnou teplotou. Podobně jako u teplotní kalibrace se nasnímá homogenní plocha IR zářiče při různých teplotách a dle zvolené metody se poté dopočítají kompenzační koeficienty. Kompenzační koeficienty se pak uloží do paměti kamery a lze s nimi korigovat obraz. Takto provedená korekce však nezohledňuje to, že offset a šum jednotlivých elementů jsou proměnné v čase a je tedy třeba kompenzační koeficienty přepočítávat podle aktuálních podmínek. Je tedy nutné provádět aktualizaci těchto koeficientů potažmo korekce. Proto se u moderních infračervených kamer používá vnitřní clona (shutter), která leží mezi objektivem a senzorem a má za úkol simulovat homogenní zářič o velké emisivitě. Takto získaný snímek nebo lépe série snímků této clonky slouží pro přepočet kompenzačních koeficientů podle aktuálních podmínek v kameře. Asi nejrozšířenější metodou je takzvaná dvoubodová korekce, kdy se za referenčních podmínek pořídí snímky homogenního zářiče na dvou různých teplotách a zkorigují se převodní charakteristiky všech mikrobolometrů v matici. Poté se v průběhu chodu kamery po uplynutí definované doby nebo na příkaz uživatele vloží před snímač clonka, která simuluje homogenní zářič a je možné tak v průběhu chodu kamery aktualizovat kompenzační koeficienty podle aktuálních podmínek.

3.3.2 Scene-based NUC

Druhou skupinou metod jsou metody, které nepotřebují k výpočtu kompenzačních koeficientů ani interní shutter ani černá tělesa. Tyto metody se v literatuře nazývají jako Scene-based nebo shutter-less metody [16, 11, 18, 28]. Využívají zejména zpracování signálu ze senzoru, kdy se adaptivně dopočítávají kompenzační koeficienty podle aktuálních podmínek. Tyto metody jsou velmi sofistikované a jsou založeny na statistickém zpracování dat. Z tohoto důvodu mají poměrně velkou výpočetní náročnost. Pro výpočet aktuálních koeficientů se používá například LMS algoritmus [1].

Na obrázku níže je znázorněná dvoubodová korekce nehomogenit graficky. Sklon křivky reprezentuje zisk detektoru a pozice na ose Y pak reprezentuje offset daného detektoru.



Obrázek 15: NUC korekce znázorněná pomocí převodních charakteristik. (Převzato a upraveno z [16])

Obecně lze postup korekce popsat následovně [11]:

- Kameru umístíme před homogenní černé těleso o teplotě X_1 .
- Dále stanovíme kompenzační koeficienty pro offset tak, aby výstupní signály všech snímacích elementů byly shodné. To lze vidět na obrázku 15b.
- Na homogenním černém tělese nastavíme teplotu X_2 přičemž $X_1 < X_2$.
- Určíme kompenzační koeficienty zisků tak, aby se pro všechny elementy detektoru shodovaly.
- Tyto kompenzační koeficienty se uloží do paměti kamer.

4 Přístrojové vybavení

Tato kapitola má podat stručný přehled o vybavení, které bylo použito pro snímání testovacích dat.

4.1 Termokamera

Pro nasnímání testovacích dat byl použit termokamerový modul, též nazývaný termokamerové jádro TAU 2 od firmy FLIR s vyhodnocovací elektronikou a vhodným softwarem, který dokáže dopadající IR záření na detektor reprezentovat jako teplotu ve °C. V následující tabulce lze shrnout základní parametry použitého kamerového modulu.

Parametry použitého TAU 2 modulu	
Typ detektoru	Mikrobolometr
Rozlišení senzoru	640 x 512 px
Velikost pixelu	17 μm
Spektrální rozsah	7,5 - 13,5 μm
Rychlost snímání	9 Hz
Nízký teplotní rozsah	-40 °C až +160°C
Vysoký teplotní rozsah	-40 °C až 550°C

Tabulka 3: Základní parametry použitého kamerového modulu od firmy FLIR[24]

Kamerový modul lze vidět na obrázku č.16. Modul má možnost výměnného objektivu dle požadavků uživatele na zorný úhel. Pro testování byl vybrán objektiv o ohniskové vzdálenosti 13 mm a clonovém čísle f1,25. Tento objektiv, v závislosti na velikosti senzoru kamerového modulu, poskytuje zorný úhel 45° v horizontální rovině a 37° ve vertikální rovině.



Obrázek 16: Kamerový modul TAU 2 [24]

4.2 Kalibrační černá tělesa

Jako homogenní IR zářič byla použita celkem tři kalibrační černá tělesa, která měla nastavitelnou teplotu. Nejvíce využívané černé těleso bylo kalibrační infračervené těleso od firmy FLUKE model 4181. Toto těleso mělo největší průměr vyzařovací plochy a to cca 152 mm.



Obrázek 17: Kalibrační černé těleso FLUKE 4148 [5]

V následující tabulce jsou shrnuty základní parametry černého tělesa FLUKE 4181.

Základní parametry černého tělesa FLUKE 4181	
Teplotní rozsah	+35 °C až +500°C
Emisivita povrchu tělesa	0,95
Průměr vyzařované plochy	152 mm

Tabulka 4: Základní parametry kalibračního černého tělesa FLUKE 4181 [5]

Dále bylo využito kalibrační černé těleso FLUKE 9133. Toto těleso nabízí oproti předchozímu tělesu rychlejší stabilizaci na požadovanou teplotu a to zejména co se týče chlazení na nižší teploty. Z druhého nabízí možnost záporných hodnot. V tabulce jsou opět shrnuty základní parametry tohoto černého tělesa.



Obrázek 18: Kalibrační černé těleso FLUKE 9133 [4]

Základní parametry černého tělesa FLUKE 9133	
Teplotní rozsah	-40 °C až +160°C
Emisivita povrchu tělesa	0,95
Průměr vyzařované plochy	57 mm

Tabulka 5: Základní parametry kalibračního černého tělesa FLUKE 9133[4]

Posledním použitým kalibračním černým tělesem bylo malé černé těleso od firmy FLIR. Toto těleso je určeno pro uživatele, kteří potřebují levné kalibrační těleso pro provádění SFFC (Supplemental Flat Field Correction). I tento typ černého tělesa má nastavitelnou teplotu, avšak nikoliv přes čelní ovládací panel jako tomu bylo u dvou předchozích, nýbrž regulací napětí a proudu, kterým se zahřívá homogenní plocha, která se nachází v tělese. Toto se může jevit jako nevýhoda tělesa, jelikož uživatel nezná přesnou teplotu, kterou těleso vyzařuje. K dispozici je pouze přibližná tabulka, která uvádí teplotu homogenní plochy při daném proudu a napětí na vstupních svorkách. Teplota tělesa je však velmi závislá na okolní teplotě. Druhou nevýhodou je poměrně dlouhá doba zahřátí a následného vychladnutí. Těleso neobsahuje žádné chlazení, chladí se samovolně.



Obrázek 19: Kalibrační černé těleso od firmy FLIR [3]

V následující tabulce jsou shrnuty jeho parametry.

Základní parametry černého tělesa od firmy FLIR	
Teplotní rozsah	cca +23 °C až +115°C
Emisivita povrchu tělesa	0,95
Průměr vyzařované plochy	102 mm

Tabulka 6: Základní parametry kalibračního černého tělesa od firmy FLIR[3]

5 Popis vybraných metod korekce nehomogenit

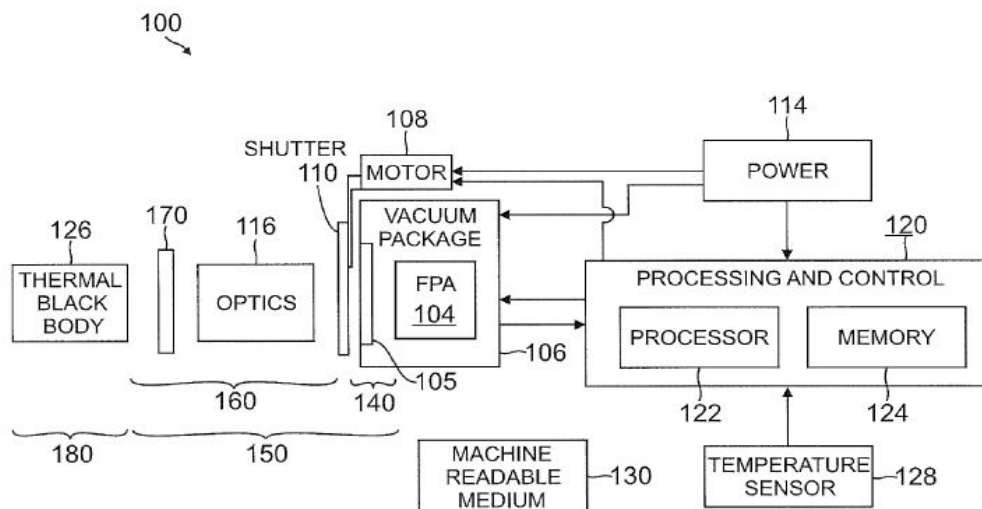
Jak již bylo zmíněno v úvodní kapitole, tato práce si klade za cíl eliminovat vliv výše popsaných vad a zkorigovat tak nehomogenity v pořízeném obraze.

Po studiu nejčastěji používaných metod korekce vinětace a nehomogenit z mikrobolometrických senzorů byly vybrány dva různé algoritmy korigující vinětaci. Tyto algoritmy byly implementovány v prostředí Matlab a následně byly otestovány na testovacích datech pořízených termokamerou společnosti WORKSWELL s implementovaným kamerovým modulem TAU 2 od firmy FLIR. Jeden z těchto algoritmů zohledňuje i nehomogenitu senzoru a provádí tak NUC založený na principu Reference-based. Algoritmy byly otestovány a porovnány s korekcí, která je využívána v kamerových modulech TAU 2. V další kapitole pak bude navržena modifikace těchto algoritmů a bude též porovnána s korekčním postupem využívaným v kamerových modulech TAU 2. Jako první byl implementován algoritmus navržený a patentovaný firmou FLIR, který by měl korigovat vinětaci objektivu pro dané pracovní podmínky [26, 8]. Výsledný korekční snímek je pak nazývaný Supplemental flat field correction. Druhým algoritmem, který byl implementován, byl algoritmus navržený ve vědecké publikaci zabývající se korekcí nehomogenit s odhadem offsetu jednotlivých pixelů v obraze z mikrobolometrických senzorů. Tato publikace by měla zohledňovat jak nehomogenitu senzoru, tak vinětaci způsobenou objektivem [18].

5.1 Supplemental flat field correction

Jak již bylo zmíněno výše, tak algoritmus na jejímž výstupu je korekční snímek Supplemental flat field correction, který by měl korigovat vinětaci objektivu, je navržený a patentovaný firmou FLIR. Měl by pospíšovat korekční postup, který se v současnosti používá v kamerových modulech TAU 2 a dalších kamerách od firmy FLIR. Jelikož se však jedná o firemní tajemství a informace o dále popsaném algoritmu jsou získané z veřejně dostupného patentu [26, 8], nejsou ani zde uvedeny žádné detailní a konkrétní specifikace, které se v daných kamerových modulech používají. Patent popisuje pouze obecný postup algoritmu a jeho možné varianty. V práci provedená implementace ve vývojovém prostředí Matlab je tedy do jisté míry unikátní řešení, které však zachovává jednotlivé na sebe navazující kroky popsané již ve zmíněném patentu. Jako referenci pro porovnání se stávajícím algoritmem tak neposlouží tato implementace, nýbrž korigovaná data přímo z kamery.

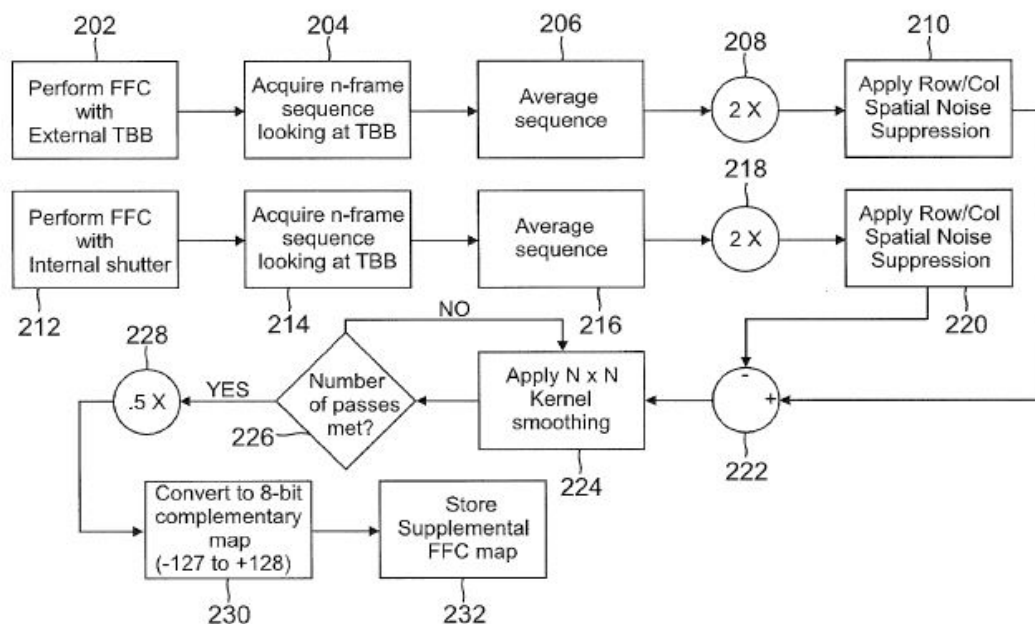
Korekční postup popsáný v patentu [26] je založen na vytvoření takzvané korekční mapy, která je v patentu nazvaná jako Supplemental flat field correction map (dále jen SFFC mapa), a následné aplikaci této mapy na nekorigovaný snímek. SFFC mapa by měla obsahovat kompenzační koeficienty pro daný objektiv, konkrétní konfiguraci a provozní podmínky kamery, pro které je SFFC mapa prováděna. Obvykle se SFFC mapa vytváří v laboratorních podmínkách u výrobce kamery, avšak v některých případech si ji může uživatel vytvořit sám. To, co je zapotřebí z hlediska hardwarového vybavení k naměření vhodných dat a výpočtu SFFC mapy, je znázorněno na obrázku č. 20.



Obrázek 20: Schéma IR kamery dle patentu FLIR [26]

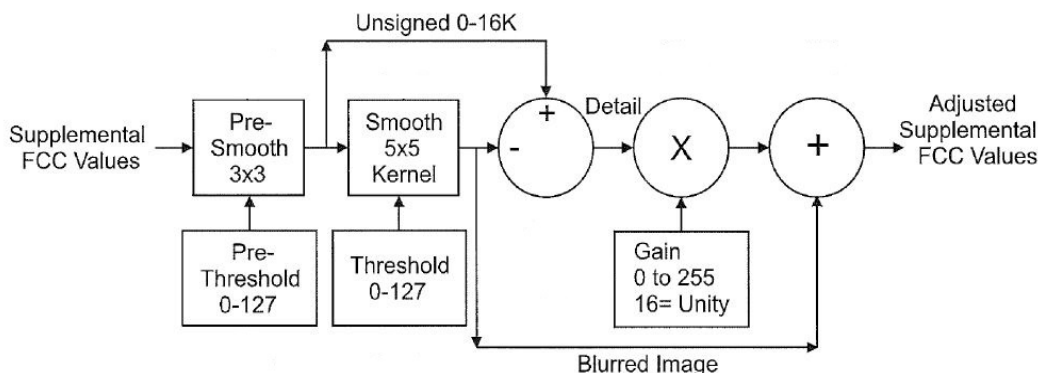
Dané číslo v obrázku pak odpovídá následující komponentně v IR kameře. 100 - IR kamera, 104 - FPA (Focal Plane Array) - pole detektorů, 105 - ochranné sklíčko, 106 - senzor ve vakuovém pouzdře, 108 - motor pohybující s interním shutterem, 110 - interní shutter, 114 - napájení, 116 - objektiv, 120 - řídicí a výpočetní jednotka, 122 - procesor, 124 - paměť, 126 - černé těleso, 128 - teplotní senzor, 130 - paměťové médium, 140 - optická trasa, 150 - optická trasa, 160 - optická trasa, 180 - snímaná scéna.

Obrázek výše znázorňuje IR kameru s objektivem, černým kalibračním tělesem a dalšími komponentami, z kterých se celý snímací systém skládá. Samotný algoritmus výpočtu SFFC mapy je pak znázorněn na obrázku č.21. Tento algoritmus je založený na modifikaci standardní flat field korekce. Celý algoritmus by se dal shrnout následovně. V bodě 202 kamera, která míří na homogenní černé těleso zabírající celé zorné pole kamery, začne snímat. V bodě 204 kamera nasnímá N po sobě jdoucích snímků černého tělesa. V následujícím kroku 206 je provedeno průměrování přes těchto N snímků. Výsledný snímek je tedy průměr z N snímků. Může se však stát, že v některém ze snímků budou u některých pixelů skokové výchylky hodnot. Tyto hodnoty by velmi ovlivnily výpočet průměru a tak řídicí a výpočetní jednotka 120 může vybrat jeden či více pixelů z jednoho či více snímků, které se výrazně liší od ostatních a ty posléze vyřadí z výpočtu. Dále následuje volitelný krok 208, který vynásobí získané hodnoty průměrného snímku homogenního zářiče hodnotou 2. Ve volitelném bodě 210 je aplikována prostorová filtrace na řádky a sloupce snímku získaného v předchozím bodě z důvodů potlačení prostorového šumu. Pomocí bodů 202 až 210 jsme získali flat field korekční snímek odpovídající optické trase 150. Tento snímek by měl reflektovat všechny nehomogenity ve snímku způsobené touto optickou trasou. Krok 212 pak charakterizuje začátek snímání interního shutteru, kdy řídicí a výpočetní jednotka 120 dá příkaz motoru, aby do optické trasy 150 vložil interní shutter, který je považován za homogenní černé těleso. V následujících krocích 214 - 220 se provedou stejné operace jako byly popsány v bodech 204 - 210. Získáme tak flat field korekční snímek, který by měl zohledňovat nehomogenity v obraze způsobené v optické trase 140. Tento snímek tak reflektuje nehomogenity na senzoru. Standardně se nazývá dark frame.



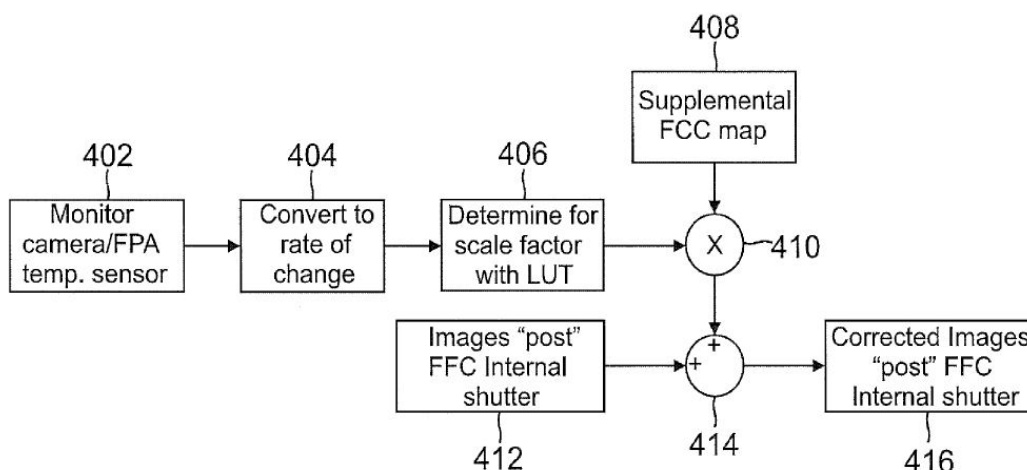
Obrázek 21: Schéma algoritmu pro výpočet SFFC mapy dle patentu FLIR [26]

V kroku 222 řídicí a výpočetní jednotka 120 odečte flat field snímek získaný v bodech 212 - 220 reflektující optickou dráhu 140 od flat field snímku získaného v bodech 202 - 210, který je pořízený pro optickou dráhu 150. Po odečtení těchto dvou snímků získáme snímek, který FLIR nazývá jako Supplemental flat field korekční snímek, který by měl reflektovat nehomogenity v obraze způsobené pouze optickou trasou 160. Reflektuje tedy pouze vady objektivu. Takto získaný korekční snímek dále podléhá dalším úpravám, které se provádí v bodech 224 - 230. Blok 224 má za úkol vyhladit SFFC mapu a odstranit vysokofrekvenční složky šumu. K tomu lze použít filtraci založenou na konvoluci s konvolučním jádrem (též nazývané jako kernel). Konvoluční maska může být libovolně zvolena. Patent neposkytuje detailní informace říkající přesný postup a přesné parametry tohoto filtru, naopak říká, že mohou být použity i jiné filtrační metody, které by potlačily vysokofrekvenční šum. V patentu je navržena jedna z možných variant, jak by filtr mohl vypadat. To je znázorněno na obrázku č.22. Bod 226 určuje, kolikrát se má zopakovat filtrování bodem 224. Po tomto filtrování se ve volitelném kroku 228 vydělí SFFC mapa hodnotou 2, pokud byly provedeny kroky 208 a 218. V bodě 230 jsou hodnoty SFFC mapy, které byly získány výpočtem z hodnot ze senzoru, komprimovány na 8 bitová čísla. Tento krok jsem v implementaci vynechal, jelikož hodnoty získané z kamery nejsou surová data ze senzoru, nýbrž hodnoty přepočtené přímo kamerovým modulem na hodnoty lineárně závislé k teplotě. Byly tedy využity přímo vypočtené teploty. Více o formátu získaných dat je v 6.1.2. Takto získaný SFFC snímek se následně uloží do paměti kamery a lze s ním již korigovat obraz pořízený termokamerou. Ještě před samotnou aplikací SFFC mapy na příchozí snímky z kamery se tato mapa mírně modifikuje podle aktuálních podmínek.



Obrázek 22: Schéma možné konvoluční filtrace SFFC mapy dle patentu FLIR [26]

To, jakým způsobem je SFFC mapa aplikovaná na snímky z kamery, je znázorněno na obrázku č.23. Než se samotná SFFC mapa aplikuje na nekorigované snímky z termokamery, tak se musí SFFC mapa vynásobit koeficientem, který je empiricky určen a je závislý na rychlosti změny teploty kamery. Stejně jako každé elektronické zařízení, tak i kamery mají svoji provozní teplotu, na kterou se zařízení vyhřeje za určitou dobu provozu. U senzorů a kamer je teplota zařízení velmi důležitá, jelikož s rostoucí teplotou roste tepelný šum struktury a šum součástek. Proto je v kameře umístěn teplotní senzor 128, který snímá teplotu kamery. Data z tohoto senzoru jsou snímána po určitý časový úsek a v kroku 404 jsou pomocí řídicí a výpočetní jednotky převedena na rychlost změny teploty.



Obrázek 23: Aplikace SFFC mapy na nekorigované snímky dle patentu FLIR [26]

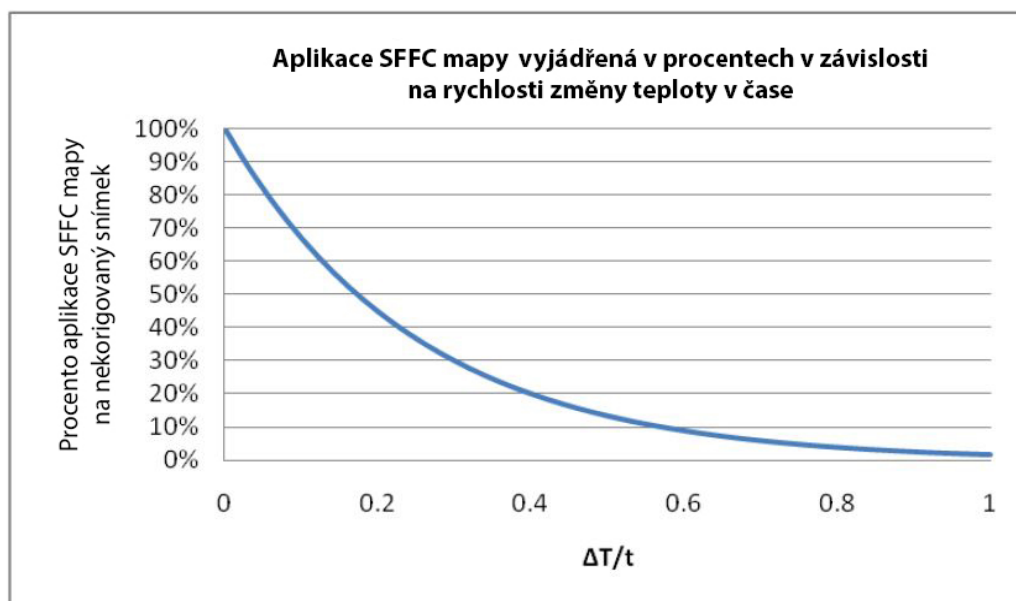
Podle rychlosti změny teploty v kameře je možné zjistit, zdali je již kamera dostatečně teplotně stabilizovaná na provozní teplotu, což, jak je již zmíněno výše, je velmi důležité kvůli tepelnému šumu. Tato rychlost změny teploty se v kroku 406 převede na škálovací faktor, kterým se v následujícím kroku 410 vynásobí SFFC mapa, která se tím poupraví dle aktuální

teplotní stability kamery. Než se však tento škálovací faktor použije na SFFC mapu, tak je v kroku 408 načtena vhodná SFFC mapa z paměti. Jelikož do paměti lze uložit několik SFFC snímků podle různé konfigurace kamery a podle typu použitého objektivu, je nutné, aby byl při korekci vybrán a načten správný SFFC snímek z paměti pro danou konfiguraci a objektiv. To zařídí blok 408. V následující tabulce je znázorněno, jaký škálovací faktor náleží dané rychlosti změny teploty kamery. Tato tabulka je pouze orientační a je převzata z patentu.

Škálovací faktor	rychlost změny teploty v °C za 5 sekund
0	$29 < \text{rychlost změny teploty}$
0,25	$23 < \text{rychlost změny teploty} \leq 29$
0,5	$15 < \text{rychlost změny teploty} \leq 23$
0,75	$5 < \text{rychlost změny teploty} \leq 15$
1	$\text{rychlost změny teploty} \leq 5$

Tabulka 7: Škálovací faktor k dané rychlosti změny teploty kamery[26]

Tabulku výše lze též vyjádřit graficky, jako tomu je v [8]. Na následujícím obrázku č.24 je znázorněno škálování SFFC mapy při různé rychlosti změny teploty v čase. Podle rychlosti změny teploty se posléze aplikuje SFFC mapa na nekorigovaný snímek s určitým škálovacím faktorem.



Obrázek 24: Škálování SFFC mapy v závislosti na rychlosti změny teploty [8]

Po vynásobení správné SFFC mapy škálovacím faktorem lze tento korekční snímek již aplikovat na nekorigovaná data z kamery. To, jakým způsobem algoritmus SFFC mapu aplikuje na nekorigovaná data z kamery, patent bohužel neříká, nicméně v kroku 412 jsou nejprve tyto nekorigované snímky korigovány flat field snímkem, který je získán postupem 212 - 220. Tato korekce se obvykle nazývá korekce dark frame, poté již následuje aplikace SFFC mapy v kroku 414. Získáme tak korigované snímky.

5.2 Algoritmus s odhadem offsetu detektoru

Druhým studovaným a implementovaným algoritmem byl algoritmus z vědecké publikace, zabývající se korekcí nehomogenit s odhadem offsetu jednotlivých pixelů v obraze [18]. Tento algoritmus, korigující jak vinětaci, tak driftující offset, je založen na výše zmíněné dvoubodové korekci (anglicky two point calibration). Než bude detailně popsána modifikace a vylepšení tohoto algoritmu oproti dvoubodové korekci, bude shrnut postup a matematické operace základní dvoubodové korekce. Jak popisuje literatura [7, 18], je dvoubodová korekce definovaná následujícím vztahem:

$$y_{i,j}(T) = [x_{i,j}(T) - x_{i,j}(T_1)]g_{i,j} + \overline{x(T_1)}, \quad (6)$$

- kde $y_{i,j}(T)$ je korigovaná odezva pixelu na pozici i,j v matici pixelů při vyzáření teplotě tělesa T ,
- $x_{i,j}(T)$ je nekorigovaná odezva pixelu na pozici i,j v matici pixelů při vyzáření teplotě tělesa T ,
- $x_{i,j}(T_1)$ je odezva pixelu na pozici i,j v matici pixelů při definované teplotě tělesa T_1 ,
- $\overline{x(T_1)}$ je průměrná odezva pixelů přes celý snímek při definované teplotě tělesa T_1 ,
- $g_{i,j}$ je korekční koeficient zisku na pozici i,j v matici pixelů.

V této základní úpravě dvoubodové korekce se offset koriguje odečtením $x_{i,j}(T_1)$ od $x_{i,j}(T)$. Člen $x_{i,j}(T_1)$ je tedy brán jako korekční koeficient offsetu na pozici i, j v matici pixelů. Poslední člen v rovnici č. 6 $\overline{x(T_1)}$ pak určuje globální offset pixelů v matici. Korekční koeficient zisku na pozici i,j je definován jako:

$$g_{i,j}(T) = \frac{\Delta \overline{x(T)}}{\Delta x_{i,j}(T)} = \frac{\overline{x(T_2)} - \overline{x(T_1)}}{x_{i,j}(T_2) - x_{i,j}(T_1)}, \quad (7)$$

kde čitatel představuje změnu průměrné odezvy pixelů při pořízení snímku homogenního zářiče o teplotě T_1 a T_2 . Jmenovatel reprezentuje změnu odezvy pixelu na pozici i,j mezi snímky, které jsou zprůměrované přes N po sobě následujících snímcích v čase, pořízených za pomoci homogenního zářiče při teplotách T_1 a T_2 .

Časové průměrování napomáhá eliminovat vliv náhodného šumu. Takto je definována dvoubodová kalibrace podle [7, 18]. Korekce provedená tímto postupem však neaktualizuje své korekční koeficienty offsetu podle aktuálních podmínek. K tomu se běžně využívá interní shutter, který má simulovat homogenní IR zářič. Nasnímá se tedy několik snímků tohoto shutteru a ty se posléze zprůměrují přes čas. Takto získaný snímek lze považovat za nové korekční koeficienty offsetu $x_{i,j}(T_1)$ dle rovnice č.6. Jelikož se na aktualizaci korekčních koeficientů offsetu využívá výhradně interní shutter, dochází k nepřesnostem, protože snímek z interního shutteru nezohledňuje optickou trasu skrz objektiv a ve výsledku tak dochází k vinětaci. Proto byla tato metoda modifikována tak, aby kromě aktualizace korekčních koeficientů offsetu zohledňovala a následně korigovala vinětaci.

Dvoubodová korekce byla modifikována následujícím způsobem. Změna offsetu pixelů způsobená driftem v čase se získá pomocí následujícího rozdílu dvou snímků interního shutteru, které jsou opět získány zprůměrováním N po sobě následujících snímků pořízených během aktuálních $s_{i,j}(T)$ a referenčních $s_{i,j}(T_R)$ podmínek.

$$\Delta s_{i,j}(T) = s_{i,j}(T) - s_{i,j}(T_R) \quad (8)$$

Jak již bylo řečeno, rovnice č. 8 reprezentuje offset, který se mění v čase. Proto se tento parametr zahrne do původní rovnice č. 6 definující dvoubodovou korekci. Získáme tak modifikovanou rovnici pro dvoubodovou korekci:

$$y_{i,j}(T) = [x_{i,j}(T) - x_{i,j}(T_1) - \Delta s_{i,j}(T)]g_{i,j} + \overline{x(T_1)} + [\overline{s(T)} - \overline{s(T_R)}], \quad (9)$$

kde $\overline{s(T)}$ a $\overline{s(T_R)}$ reprezentuje průměrnou odezvu pixelů přes celé snímky za aktuálních a referenčních podmínek.

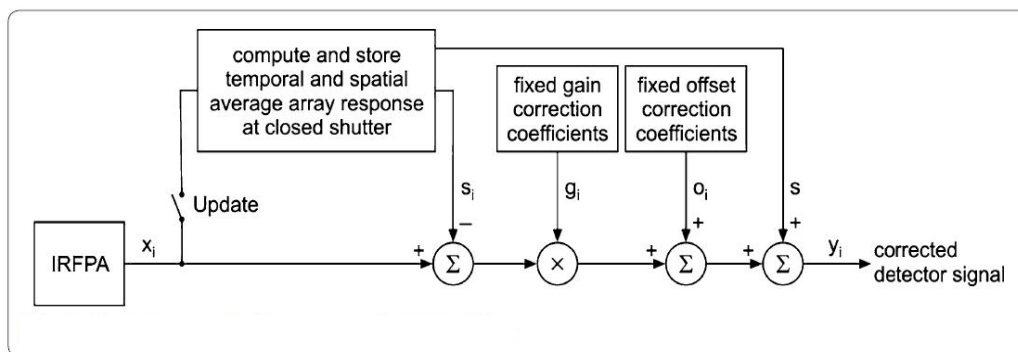
Po dosažení a upravení rovnice č. 8 do rovnice č. 9 získáme výslednou rovnici č. 10 pro navrhovaný algoritmus pro korekci nehomogenit s odhadem offsetu jednotlivých pixelů v obraze s ohledem na vinětací objektivu.

$$y_{i,j}(T) = [x_{i,j}(T) - s_{i,j}(T)]g_{i,j} + o_{i,j} + \overline{s(T)}. \quad (10)$$

kde $o_{i,j}$ vyjadřuje fixní korekční koeficienty offsetu, které lze získat následovně:

$$o_{i,j} = [s_{i,j}(T_R) - x_{i,j}(T_1)]g_{i,j} + \overline{x(T_1)} + \overline{s(T_R)}. \quad (11)$$

Fixní korekční koeficienty $g_{i,j}$ a $o_{i,j}$ jsou platné pro dané provozní podmínky a pro daný dynamický rozsah snímané teplotní scény. Tyto koeficienty jsou uloženy v paměti kamery, aby mohly být aplikovány na nekorigovaný vstupní signál. Chce-li uživatel kamery aktualizovat korekční koeficienty pro offset, musí nasnímat N snímků interního shutteru v aktuálních podmínkách. Tento krok se obvykle nazývá NUC (non-uniformity correction). Kamera posléze dopočítá časový průměr $s_{i,j}(T)$ a průměrnou hodnotu ve snímku $\overline{s(T)}$. Tyto hodnoty jsou následně dosazeny do rovnice č. 10, aby mohly být využity pro korekci vstupních dat. Na následující obrázku je jednoduchý blokový diagram funkce celého algoritmu, včetně aktualizace korekčních koeficientů offsetu. Z diagramu je zřejmé, že pro aktualizaci korekce driftu offsetu je nutné nasnímat N snímků interního shutteru. V mnoha případech je N rovno desítkám snímků, které se zprůměrují a napomáhají redukovat drift offsetu v čase.



Obrázek 25: Blokový diagram algoritmu korigující vinětaci a offset termokamery [18].

6 Implementace vybraných korekčních metod

Výše popsané korekční metody, které byly nastudovány z veřejně dostupných zdrojů, byly následně implementovány ve vývojovém prostředí Matlab a následně porovnány vůči korekční metodě, kterou využívá kamerový modul TAU 2. Jelikož některé informace nebyly v dostupných zdrojích popsány konkrétně, nýbrž jen jako obecný postup, bylo během implementace vyzkoušeno několik variant a následně byla vybrána ta, která měla nejlepší výsledky. S obecným postupem korekčního algoritmu se lze setkat zejména v patentu firmy FLIR popisujícím korekční metodu Supplemental flat field correction [26, 8]. Tento korekční postup by měl odpovídat postupu, který používá kamerový modul TAU 2. V této kapitole bude popsáno, jakým způsobem byla provedena implementace vybraných algoritmů. Než bude popsána implementace samotných algoritmů, je nutné definovat, jakým způsobem byla nasnímana data, která se využila v algoritmu pro výpočet korekčního snímku a také jak byly pořízeny testovací snímky.

6.1 Pořízení kalibračních a testovacích dat

Aby bylo možno korigovat vinětaci, je nutné nasnímat data, která simulují průchod záření optickou soustavou neboli pořídit flat field snímek. To, jakým způsobem jsou data nasnímaná, má velký vliv na výslednou korekci. Proto zde bude popsáno, jakým způsobem byla data nasnímaná.

6.1.1 Získání flat field a testovacích snímků

Flat field snímek lze získat tak, že kameru s daným objektivem nasměrujeme na homogenní IR zářič, který by měl mít homogenní vyzařování v celé své ploše s určitou emisivitou. Kamera s objektivem musí být nasměrována na toto černé těleso tak, aby v celém zorném poli kamery byla tato homogenní plocha. Kamera by měla být zaostřena na vzdálenost, na kterou se bude následně používat. V případě, že tomu tak nebude, může klesat účinnost korekce. Poté již těleso nastavíme na definovanou teplotu a lze nasnímat data. Aby bylo možné následně získat korekční snímek, který bude přesně korigovat zkreslení způsobené objektivem, je nutné nasnímat i interní shutter, který kamera na příkaz vsune mezi objektiv a senzor. Tento interní shutter by měl simulovat homogenní zářič a měl by do jisté míry reflektovat šum způsobený teplotou kamery. Snímek interního shutteru můžeme též nazývat jako dark frame. Kalibrační a testovací data byla pořízena tak, že kamera, která byla teplotně stabilizovaná do pracovní teploty, byla postavena s kamerovým modulem TAU 2 před jedno z černých těles, které jsou na obrázcích č.17, 18, 19 a bylo zapnuto kontinuální snímání. Těleso přitom mělo definovanou teplotu. Během tohoto nahrávání se na příkaz po určité době vložil mezi objektiv a senzor shutter. Data se snímala po určitou dobu, obvykle cca 20-30 sekund. Takto se nasníkala data externího zářiče o teplotách 25°C, 45°C, 75°C a 100°C. K těmto teplotám se vždy nasnímal i interní shutter v dané situaci za aktuálních podmínek. Celé měření se poté opakovalo po cca 20 minutách, což mělo simulovat změnu offset senzoru v čase. Celé měření probíhalo za pokojové teploty 24°C. Ke všem pořízeným datům byla též pořízena korigovaná data kamerou, která by měla využívat algoritmus dle patentu firmy FLIR a budou považována za referenční korekci.

A to proto, že v patentu nejsou uvedeny konkrétní operace a nastavení algoritmu. Algoritmus byl tedy implementován v určité konfiguraci.

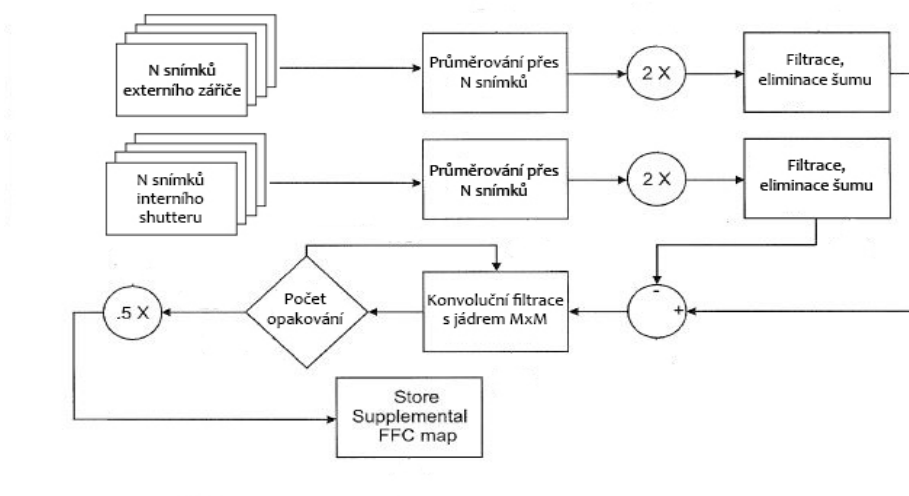
6.1.2 Formát dat

Pořízené sekvence byly následně v počítači rozděleny na jednotlivé snímky a ty byly uloženy ve formátu csv. Standardně podává senzor informaci o množství náboje, který je úměrný dopadajícímu záření. My jsme však neměli přístup přímo k datům ze senzoru, jelikož již samotný kamerový modul obsahuje zpracovávající elektroniku. Data, která byla získána z kamery, odpovídají radiometrickým datům, která za definovaných parametrů, jako je emisivita tělesa, odražená zdánlivá teplota a data parametrů atmosféry, jsou přepočítána na teploty. Tyto teploty jsou lineárně závislé na těchto radiometrických datech. Takto získaná data byla již použita do jednotlivých algoritmů.

6.2 Implementace Supplemental flat field correction

Jako první bude popsána implementace algoritmu dle patentu firmy FLIR popisující korekční algoritmus Supplemental flat field correction. Výše již bylo popsáno, jakým způsobem by měl algoritmus pracovat. Nicméně v patentu se neuvádějí některé konkrétní detaily, jako například typ použitých filtrů, parametry filtrů. Dále nebyly popsány některé konkrétní detaily, jak se SFFC mapa aplikuje na nekorigovaný snímek a jiné. Proto bude v této části popsáno, jakým způsobem byl algoritmus implementován, jak bylo nalezeno optimální nastavení a jaké měl výsledky.

Algoritmus byl implementován podle obecného schématu, který byl prezentován v patentu [26] a je znázorněn na obrázku č.21. Na následujícím upraveném schématu lze vidět jednotlivé kroky, které byly implementovány.



Obrázek 26: Schéma algoritmu pro výpočet SFFC mapy dle patentu FLIR

Nejprve bylo do prostředí Matlab načteno N snímků externího IR zářiče, čili kalibračního černého tělesa s definovanou teplotou. Následně bylo načteno N snímků interního shutteru. K načtení těchto snímků ve formátu csv byla implementována funkce `upload_frame`, která má tři vstupní parametry. Prvním parametrem je N vyjadřující požadovaný počet snímků, který se má načíst do Matlabu. Druhý parametr je cesta ke kořenovému adresáři, kde se nachází data, která chceme načíst. Tento parametr je formátu string. Třetím parametrem je jméno souboru, též ve formátu string. N bylo zvoleno empiricky po provedeném testování, kde se zjistilo, jak moc se liší výsledná korekce v závislosti na počtu průměrovaných snímků a hlavně po testování výpočetní náročnosti při velkém N . Jako optimální volba bylo zvoleno $N=16$. Jelikož se kamera vyhřeje na provozní teplotu, má i interní shutter relativně vysokou teplotu odpovídající teplotě kamery. Z těchto důvodů bylo zvoleno, že teplota externího zářiče by měla být větší než teplota, kterou má interní shutter. Dále byly načtené snímky zprůměrovány v čase (tedy přes N snímků) do jednoho výsledného snímku. Jelikož patent uvádí, že algoritmus při průměrování N snímků vyřadí hodnoty pixelů, které se vymykají ostatním hodnotám na stejné pozici v ostatních snímcích, byla implementována funkce `t_Average_cube`. Tato funkce si načte zmíněných N snímků a ty zprůměruje tak, že pomocí hodnoty `treshhold`, kterou musí uživatel zadat, vyhodí při průměrování všechny hodnoty, které se liší od ostatních pixelů na stejné pozici v ostatních snímcích o daný `treshhold`. Takto byly získány průměrné snímky externího a interního homogenního zářiče. V dalším kroku jsme dle doporučení v patentu použili volitelný krok a vynásobili tyto průměrné snímky dvěma. Následovala filtrace obou zprůměrovaných snímků za účelem eliminovat prostorový šum. I tento krok je dle zmíněného patentu volitelný. V implementaci byl využit filtr pracující na bázi konvoluce s vhodnou filtrační maskou. Byly otestovány celkem tři různé masky, a to průměrující maska, mediánový filtr a maska s gaussovským profilem. Dále bylo testováno, jaká je optimální velikost této masky. Vyhodnocení je popsáno v 6.2.1. Jako neoptimálnější se ukázal být filtr s maskou gaussovského rozložení též zvaný jako Gaussian s velikostí masky 5×5 pixelů. Pro tuto filtraci byla též vytvořena samostatná funkce, která se jmenuje `t_gaussian_filter`. Tato funkce má celkem čtyři vstupní parametry. První je pochopitelně obraz, který chce uživatel filtrovat. Druhý parametr Q je parametr, který definuje, kolikrát se filtr aplikuje na vstupní obraz. Pro tento typ filtrace byl použit parametr $Q = 1$. Třetím parametrem této funkce je `sigma`, která u gaussovského filtru definuje strmost Gaussova profilu v masce. Tento parametr jsme dopočítali inverzní operací, kterou je ve standardním nastavení gaussovské filtrace pomocí funkce `imgaussfilt` implementované v Matlabu dopočítaná velikost masky. Což je čtvrtý parametr, který je nutné vložit do naší funkce. Velikost masky se standardně počítá s ohledem na velikost sigmy dle vztahu $velikost_masky = 2 * ceil(2 * sigma) + 1$. Kde `ceil` vyjadřuje zaokrouhlení k následující vyšší hodnotě. Aby bylo ve výsledném hodnocení méně proměnných ovlivňujících korekci, dopočítali jsme `sigma` pro zvolenou velikost masky inverzní operací. Jak již bylo řečeno, dle patentu je tento krok také volitelný a lze ho nahradit jinými metodami eliminujícími prostorový šum. Takto filtrované snímky se posléze navzájem odečtou a to tak, že z průměrného snímku získaného z externího zářiče se odečte průměrný snímek získaný z interního shutteru. V tomto kroku vzniká korekční snímek, z kterého je již odstraněn vliv kamery a je v něm zahrnut pouze vliv objektivu. Tento snímek se však musí ještě podrobit drobným úpravám. Nejprve se opět použije konvoluční filtr s gaussovskou maskou, který pracuje jako dolní propust a má za úkol odstranit ze snímku vysokofrekvenční složky. Opět byla použita funkce `t_gaussian_filter`. Toto filtrování se opakuje třikrát po sobě pro větší eliminaci šumu, proto byl parametr Q nastaven na hodnotu tři. Výsledný filtrovaný korekční snímek se vydělí dvěma kvůli volitelnému kroku v předchozí části, kde jsme snímek dvěma

vynásobili. Poté se získaný snímek již pouze normuje k jedničce a to proto, aby příliš neovlivnil dynamiku při korekci testovacího snímku. Tento korekční snímek se podle patentu ještě váhuje podle teplotní stability kamery a až posléze se aplikuje na testovaná data, jak uvádí obrázek č.23. Měření však bylo prováděno s kamerou, která byla zahřáta na provozní teplotu a její teplota byla stabilizovaná a proto již tento korekční snímek nebyl ničím váhován. Standardně se korekční snímek pořídí v laboratorních podmínkách a následně se uloží do paměti kamery. Z paměti je poté načten a použit jako korekční snímek na všechny data ze senzoru, aby korigoval vinětači.

6.2.1 Vyhodnocení algoritmu SFFC

Na grafu č. 27 je znázorněno, jak bylo vyhodnoceno neoptimálnější nastavení algoritmu, pro tři výše zmíněné typy filtrů. Nastavení algoritmu mělo v zásadě tři proměnné. Typ filtru, počet snímků, ze kterých se počítaly průměrné snímky (tedy parametr N), a poslední byla velikost masky filtru. Vyhodnocení se provádělo tak, že pro všechny varianty nastavení algoritmu v závislosti na proměnných parametrech se vypočítal korigovaný snímek na stejný vstupní testovací snímek. Dle počtu možných variant, které jsou uvedeny v následující tabulce, vzniklo 60 korigovaných snímků. Vždy 20 pro daný filtr.

Typ proměnné	varianty
Typ filtru	Gaussian, Median, Average
Velikost masky	[3x3], [5x5], [9x9], [25x25]
Počet snímků na průměrování	2,4,8,16,32

Tabulka 8: Proměnné parametry v algoritmu SFFC

Z těchto snímků se následně vypočítala chyba vůči střední hodnotě ve snímku a ta se vynesla do grafu v závislosti na měnících se parametrech. Chyba vůči střední hodnotě byla spočítána dle rovnice č. 12.

$$RMSE = \frac{1}{MN} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (a_{i,j} - \bar{a})^2}, \quad (12)$$

kde M a N jsou rozměry snímku, $a_{i,j}$ představuje pixel na pozici i, j ve snímku a \bar{a} je střední hodnota přes všechny pixely ve snímku. Kdyby se zde nepoužila odmocnina, tak by vzorec vyjadřoval jen MSE, které je zmíněno dále.

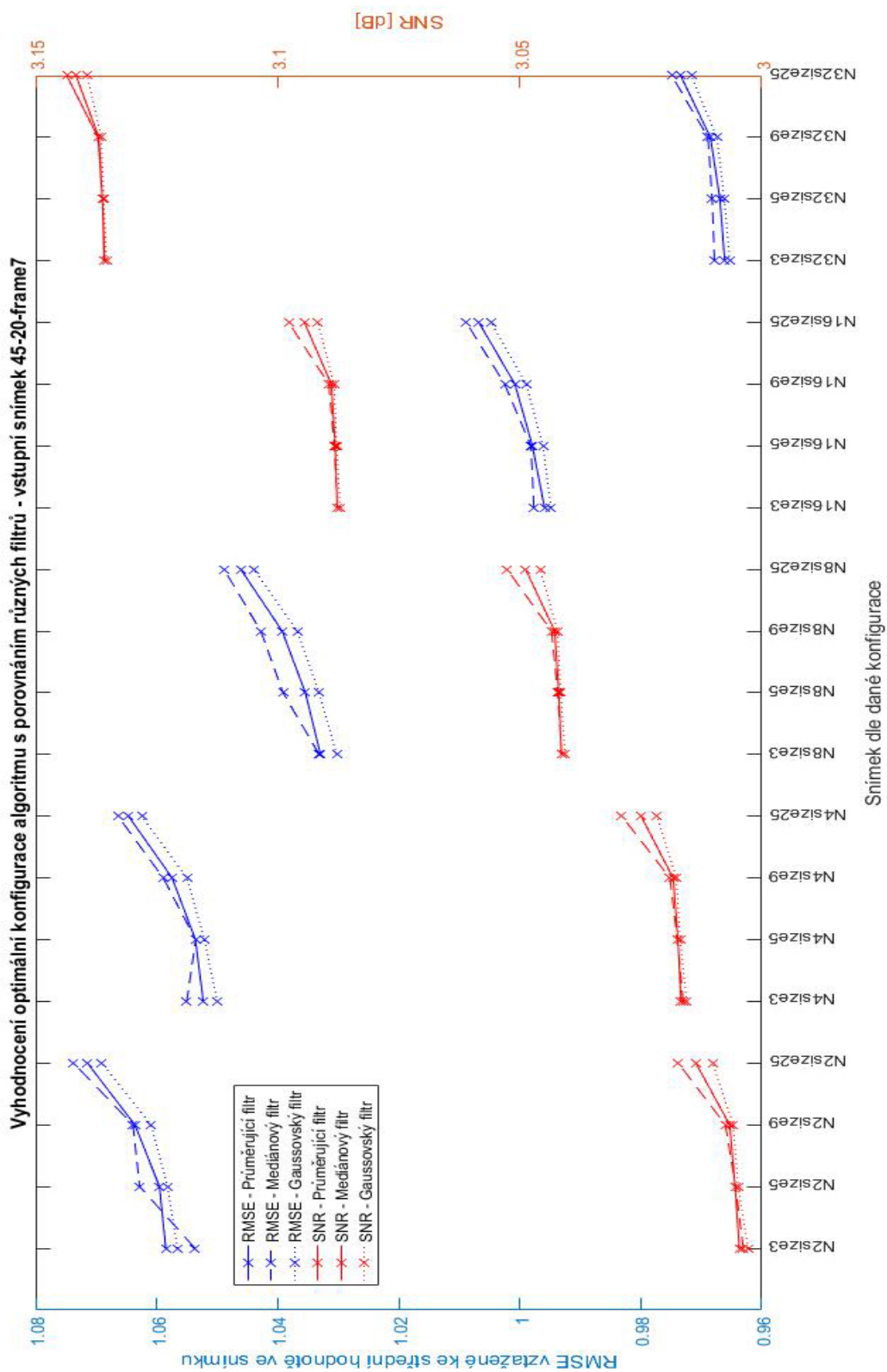
Do grafu byla též vynesena hodnota SNR udávající odstup signálu od šumu, reprezentující množství šumu ve snímku. SNR je uvedeno v decibelech a bylo vypočítáno z následujícího vztahu.

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_{i,j}^2}{MSE} \right) \quad (13)$$

MSE je z angličtiny mean square error, neboli střední kvadratická chyba. M a N jsou rozměry snímku a $a_{i,j}$ představuje pixel na pozici i, j ve snímku. MSE vypočítáme jako:

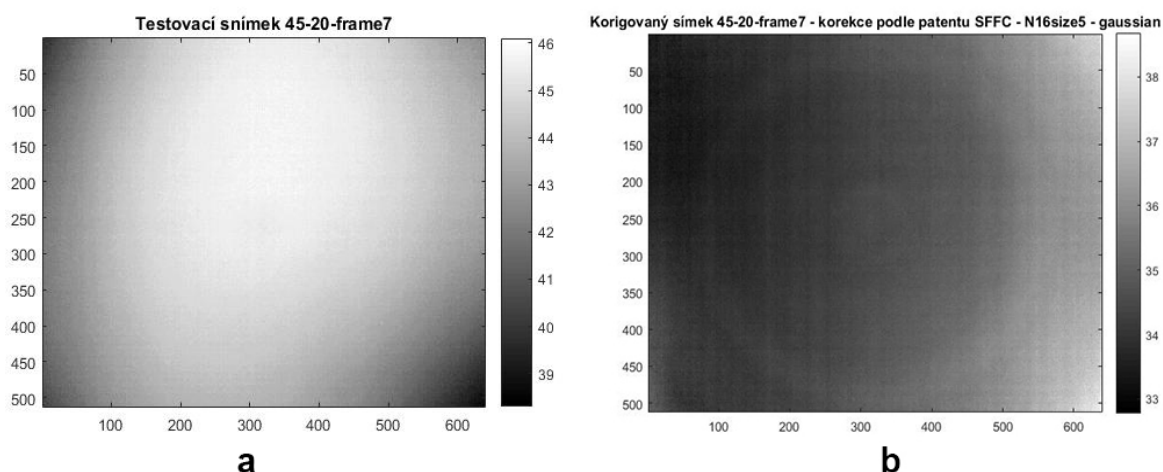
$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (a_{i,j} - \bar{a})^2. \quad (14)$$

Z grafu jsou zřejmá následující fakta. Se zvyšujícím se N klesá chyba vůči střední hodnotě ve snímku. Kde N představuje počet snímků, z kterých se počítá průměr. To má mimo jiné za následek i růst SNR, čili zvýšení odstup signálu od šumu. Z grafu je také patrné, že se zvyšující se velikostí masky filtru se zvyšuje chyba v korigovaném snímku. To je pravděpodobně způsobené tím, že čím větší je maska filtru, tím větší je oblast pixelů, které se započítávají do filtrace. To má za následek větší rozmazání textury korekčního snímku a tím pádem klesá účinnost korekce a v korigovaném snímku tak stoupá chyba. Filtr se však používá pro eliminaci šumu. To lze pro změnu pozorovat v závislosti SNR na velikosti masky. Lze vidět, že se zvětšující se maskou nepatrně roste i SNR. Takovéto testování bylo provedeno pro 3 vstupní testovací snímky, a bylo vybráno optimální nastavení algoritmu, aby zohledňovalo co nejnižší chybu, co nejvyšší SNR a také časovou náročnost výpočtu, která roste se zvyšujícím se počtem průměrovaných snímků. Parametry byly zvoleny následovně. Typ filtru byl vybrán Gaussian, velikost masky 5x5 pixelů a počet snímků k průměrování 16.



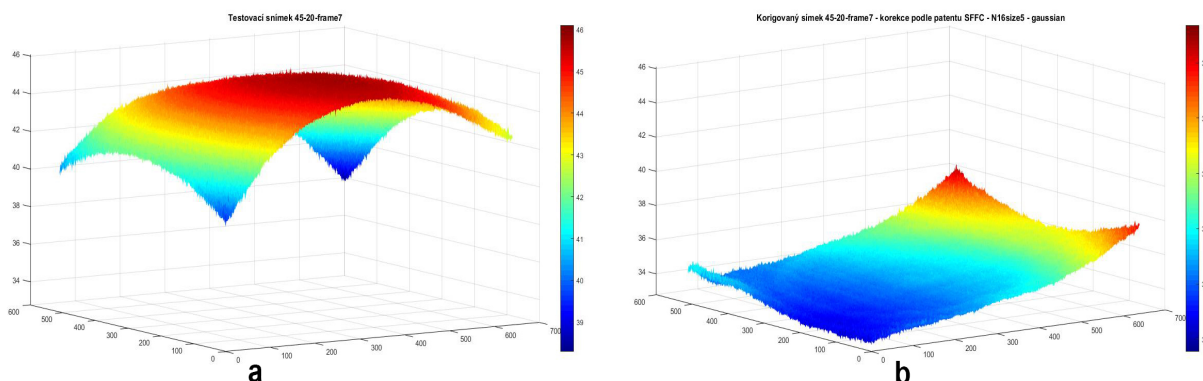
Obrázek 27: Porovnání vlastností algoritmu SFFC v závislosti na zadáných parametrech pro testovací snímek pořízený při teplotě 45 °C

S tímto zvoleným nastavením byly pomocí algoritmu korigovány tři různé testovací snímky homogenního zářiče a následně i nehomogenní scény. Na následujících obrázcích lze vidět testovací snímek zobrazující homogenní zářič o teplotě 45°C č. 28 (a) a korigovaný snímek č. 28 (b). Jelikož tento algoritmus koriguje pouze vinětaci a nikoliv offset senzoru, může dojít k posunutí teplot ve výsledném korigovaném snímku. Z tohoto důvodu nejsou obrázky zobrazeny ve stejném rozsahu hodnot, jelikož výsledný rozsah by byl příliš velký na to, aby vhodně zobrazil snímek. Nebylo by z něj patrné, zda je obraz homogenní či nikoliv.



Obrázek 28: Obrázek (a) zobrazuje testovací nekorigovaný snímek, obrázek (b) zobrazuje korigovaný snímek

Pro lepší reprezentaci dat byla data z těchto snímků vynesena do 3D modelu. Na následujícím obrázku lze opět vidět testovací nekorigovaný snímek č. 29 (a) a korigovaný snímek 29 (b). V tomto 3D zobrazení již zachovávají data stejný rozsah hodnot a je tedy vidět, jak algoritmus SFFC posunul všechny teploty níže. To by následně napravila teplotní kalibrace kamery, která však není předmětem této práce.



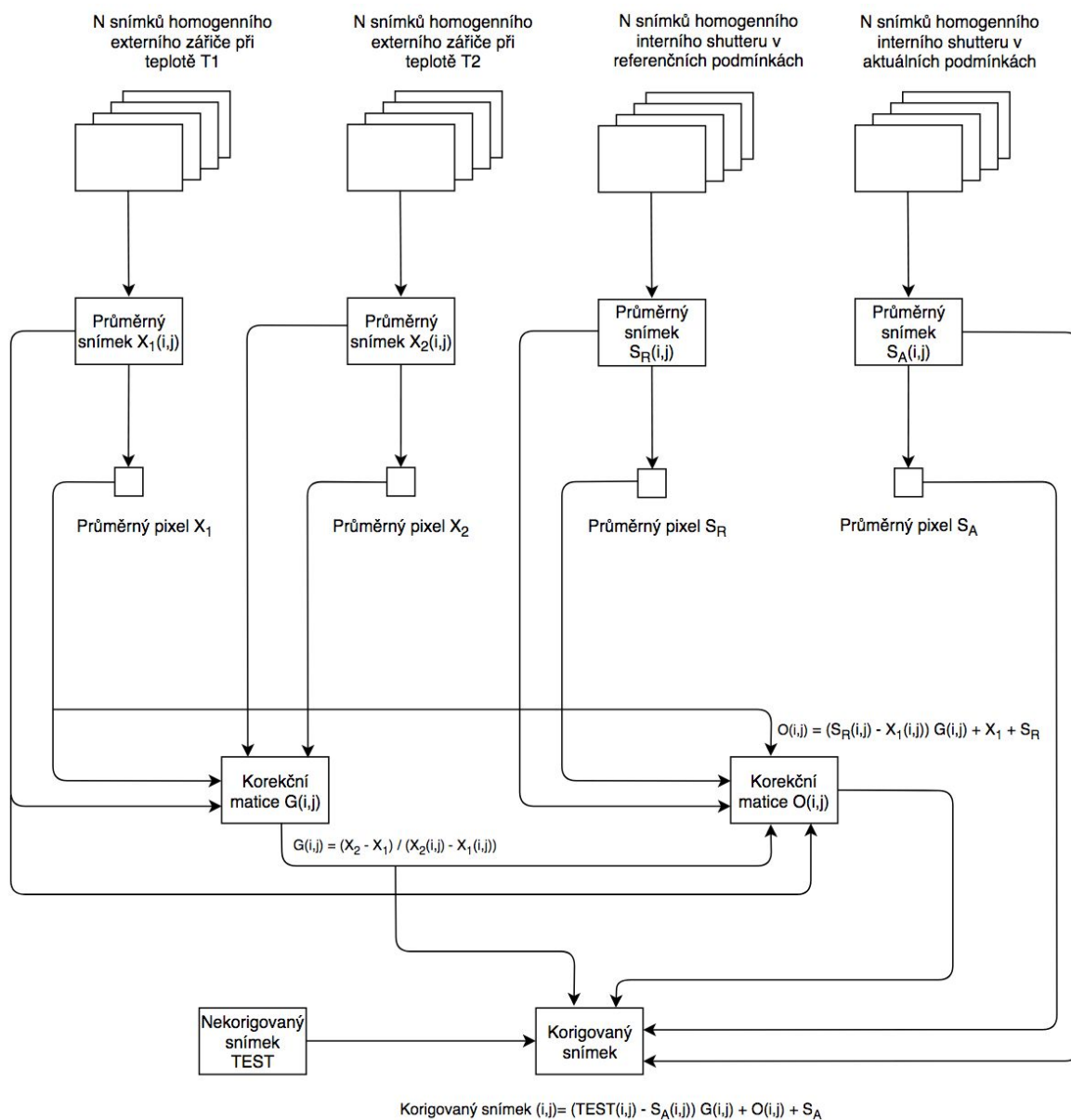
Obrázek 29: Obrázek (a) zobrazuje 3D model testovaného nekorigovaného snímku, obrázek (b) zobrazuje korigovaný snímek

Ze snímků lze vidět, že implementace a účinnost tohoto algoritmu není optimální. Hodnoty ve snímku se sice relativně vyrovnaly, nicméně stále snímek vykazuje nehomogenitu. To může být způsobeno několika aspekty. Algoritmus nemusí být optimálně implementován, zejména proto, že mohou být použity jiné filtrační metody nebo jiná nastavení použité filtrační metody, popřípadě je možno průměrovat vstupní data přes více snímků a podobně. Výsledná korekce může být též ovlivněna charakterem snímků, které se použily pro výpočet korekční SFFC mapy.

6.3 Implementace algoritmu s odhadem offsetu detektoru - MTPC

Celý matematický aparát, který se skrývá v tomto algoritmu, byl popsán v kapitole 5.2, proto zde bude popsáno pouze to, jak byly tyto matematické operace implementovány v prostředí Matlab. Implementovaný algoritmus by se dal pospat dle schématu č. 30.

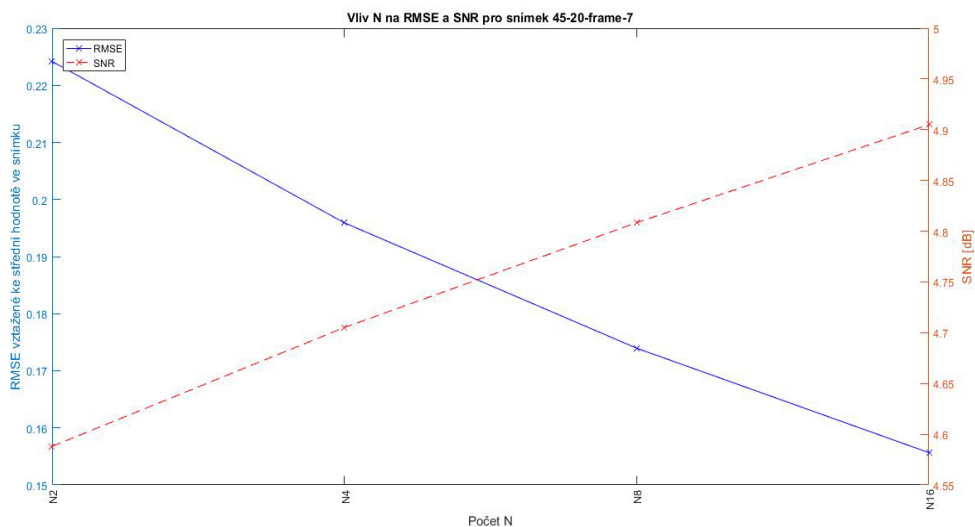
Nejprve se načte N snímků externího homogenního zářiče o definované teplotě T_1 a T_2 přičemž platí, že $T_1 < T_2$. Následně se načte N snímků interního shutteru v referenčních a aktuálních podmínkách. Všechny tyto snímky byly pořízeny způsobem popsaným v 6.1.1. K načítání dat byla opět využita funkce `upload_frame`. Tyto sety po N snímcích byly zprůměrovány, aby se co nejvíce potlačil vliv šumu. V diagramu jsou tyto zprůměrované snímky označeny jako $X_1(i, j)$ respektive $X_2(i, j)$ pro externí homogenní zářič o teplotě T_1 respektive T_2 . Průměrné snímky pro interní shutter byly označeny jako $S_R(i, j)$ pro referenční podmínky a $S_A(i, j)$ pro aktuální podmínky, při kterých kamera pracuje. Následně byly vypočteny střední hodnoty pixelů v daných průměrných snímcích, které se používají dále ve výpočtu. Tyto průměrné hodnoty pixelů byly označeny jako X_1, X_2, S_R a S_A . Z takto získaných dat již lze vypočítat matici korekčních koeficientů zisku označenou v diagramu jako $G(i, j)$ a korekční matici offsetu $O(i, j)$. Tyto matice obsahují korekční koeficienty pro každý z pixelů v nekorigovaném snímku. Korekční matice zisku se vypočítá dle rovnice č.7. Korekční matice offsetu byla vypočtena dle rovnice č. 11. Následně jsou tyto korekční matice společně s průměrným snímkem interního shutteru v aktuálních podmínkách $S_A(i, j)$ využity na korekci vstupního nekorigovaného snímku. Korekce je implementována dle vztahu č. 10.



Obrázek 30: Diagram implementovaného algoritmu

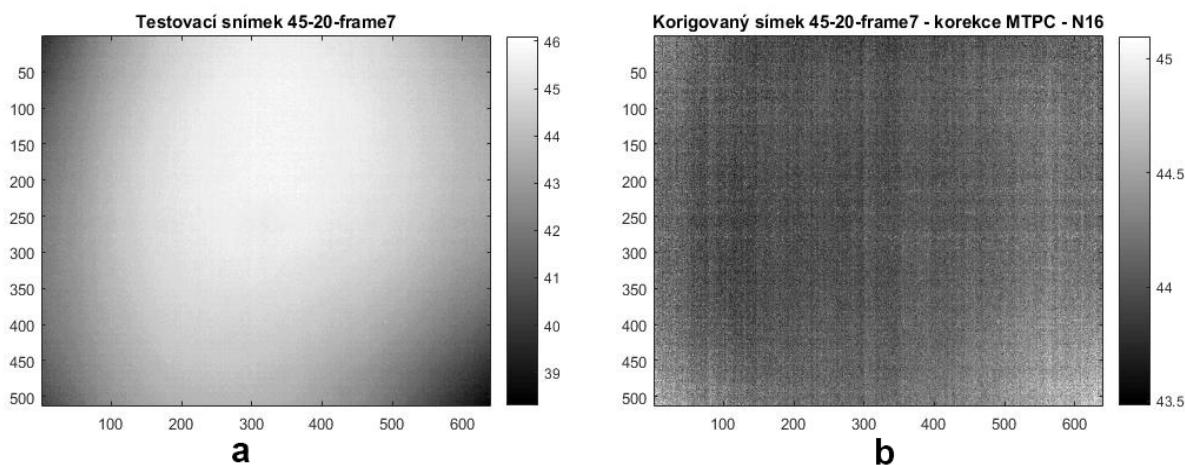
6.3.1 Vyhodnocení algoritmu MTPC

U této implementace nebylo nutné hledat optimální nastavení, jelikož v odborné publikaci [18] bylo vše detailně popsáno. Jediný parametr, který bylo nutno určit, byl parametr N . Tedy přes kolik snímků se mají počítat průměrné snímky. To je dle mého názoru do jisté míry subjektivní, kolik snímků je optimální počet. Také to záleží na aplikaci, jelikož s rostoucím počtem snímků k průměrování roste časová náročnost výpočtu. Nicméně s větším počtem snímků klesá RMSE ve snímku vypočteno vůči střední hodnotě a naopak roste SNR neboli odstup signálu od šumu. To lze vidět na následujícím grafu. N bylo zvoleno rovno 16.



Obrázek 31: Vliv zvyšujícího se počtu snímků k průměrování na RMSE a SNR v korigovaném snímku

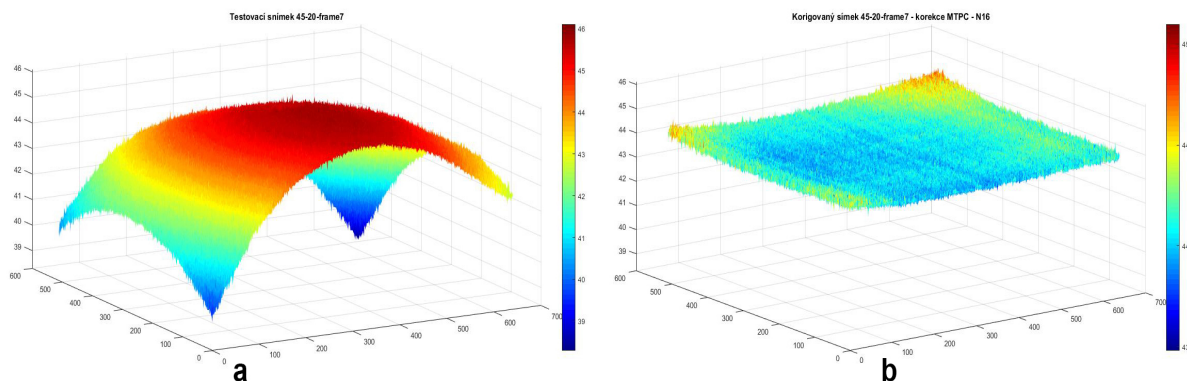
Na následujících obrázcích lze vidět stejný testovací snímek při teplotě 45°C, který byl použit u předchozího algoritmu a korigovaný snímek získaný pomocí právě popsaného algoritmu. I přesto, že snímky opět nemají stejný rozsah hodnot, je na první pohled patrné, že korigovaný snímek je mnohem více homogenní než testovací snímek a snímek korigovaný pomocí SFFC algoritmu. To je způsobeno zejména využitím dvoubodové korekce s aktualizací korekčních koeficientů offsetu, která koriguje jak multiplikativní, tak aditivní zkreslení, což v praxi znamená potlačení vinětace a zároveň korekci zisku a offsetu snímače.



Obrázek 32: Obrázek (a) zobrazuje testovací nekorigovaný snímek, obrázek (b) zobrazuje korigovaný snímek

Stejně jako v předchozím případě i zde byly hodnoty ze snímků vyneseny do 3D modelu pro lepší reprezentaci dat. V tomto 3D modelu je již zachované stejné měřítko teplot pro oba

snímky. To umožní lepší zobrazení dat. Na těchto modelech tak lze pozorovat vliv korekce pomocí MTPC algoritmu. Nekorigovaný testovací snímek lze vidět na obrázku č. 33 (a). Korigovaný snímek je zobrazen na obrázku č. 33 (b).

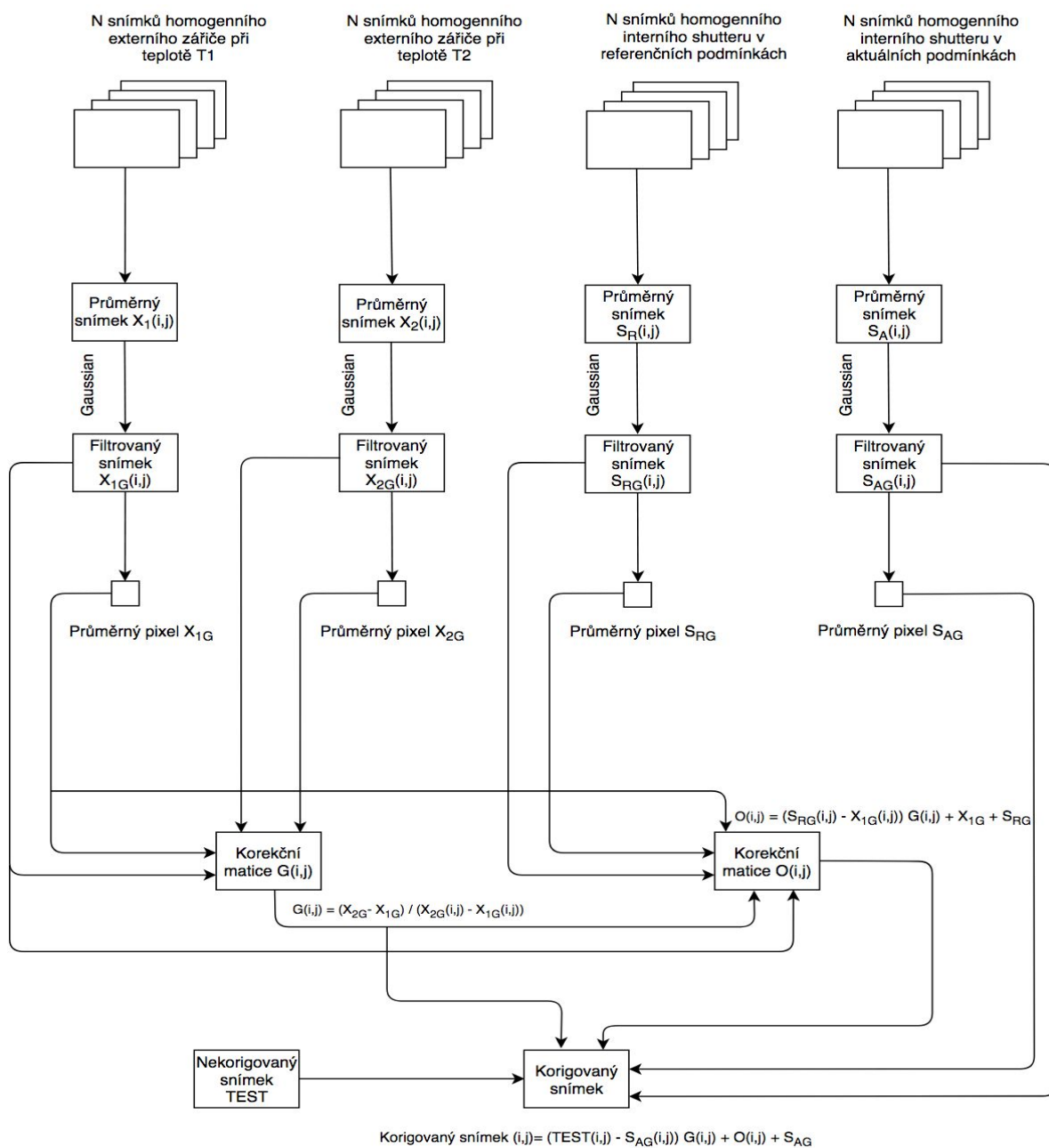


Obrázek 33: Obrázek (a) zobrazuje 3D model testovaného nekorigovaného snímku, obrázek (b) zobrazuje korigovaný snímek

Z obrázků č.32 (a) a (b) a 3D modelů zobrazených na obrázku č. 33 (a) a (b) lze vidět, že MTPC algoritmus využívající dvoubodovou korekci, je mnohem účinnější než implementovaný SFFC algoritmus. Oproti SFFC algoritmu též neposouvá hodnoty teplot v korigovaném snímku.

6.4 Implementace modifikovaného algoritmu s odhadem offsetu detektoru

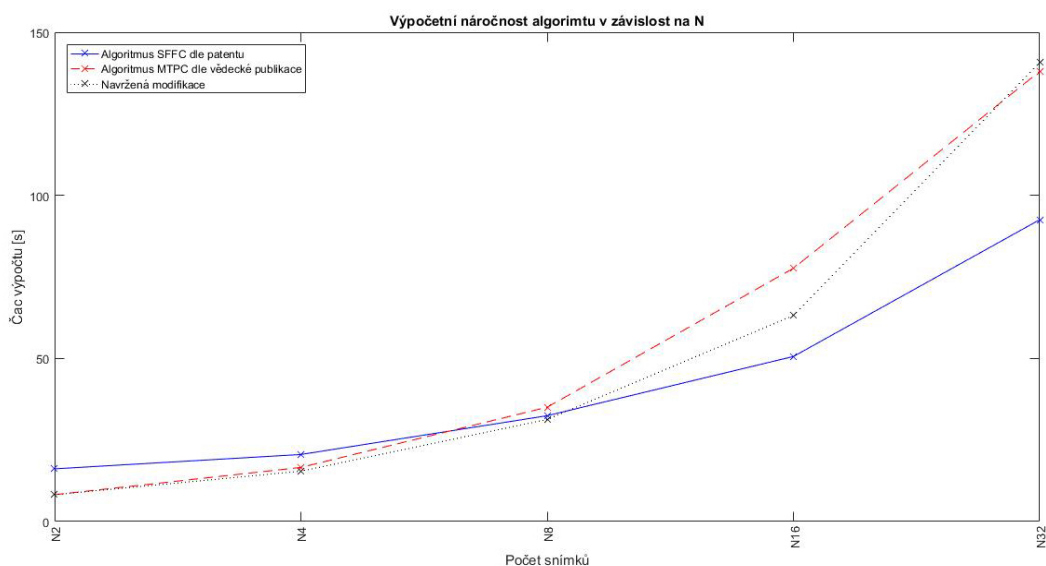
V této kapitole bude navržena a implementována modifikace výše popsaného MTPC algoritmu, který vykazoval velmi pozitivní výsledky při korekci vinětace. Modifikace algoritmu spočívala v prostorové filtraci průměrných snímků externího homogenního IR zářiče na teplotách T1 respektive T2. Dále se také filtrují průměrné snímky interního shutteru v referenčních a aktuálních podmínkách. Modifikované schéma navrženého algoritmu lze vidět na obrázku č. 34. Oproti MTPC algoritmu se navržený algoritmus liší pouze přidáním prostorové filtrace průměrných snímků. Tato filtrace má za úkol vyfiltrovat vysokofrekvenční složky a eliminovat tak šum v průměrných snímcích. Stejně jako při implementaci SFFC algoritmu, i zde bylo nejprve provedeno testování, jaké je neoptimálnější nastavení algoritmu. N bylo tentokrát vzhledem k testování a časové náročnosti výpočtu zvoleno na 8 snímků. Dále byly otestovány celkem tři různé filtry s různou velikostí masky. Stejně jako u SFFC algoritmu byl testován průměrný, mediánový a gaussovský filtr. Toto vyhodnocení vhodného typu a velikosti filtru je popsáno v 6.4.1. Jako nejvhodnější se zdál být gaussovský filtr s velikostí masky 5x5 pixelů. V samotné implementaci byly opět využity již dříve implementované funkce `upload_frame` a `t_gaussian_filter`. Jako tomu bylo v algoritmu SFFC i zde je nutné u funkce `t_gaussian_filter` nastavit parametr Q, který definuje počet opakování filtrace na daný snímek. Parametr Q byl nastaven na hodnotu 1. Dále si tato funkce vyžaduje parametr sigma, který udává strmost gaussovského filtru. Tento parametr byl vypočten stejným způsobem jako v algoritmu SFFC.



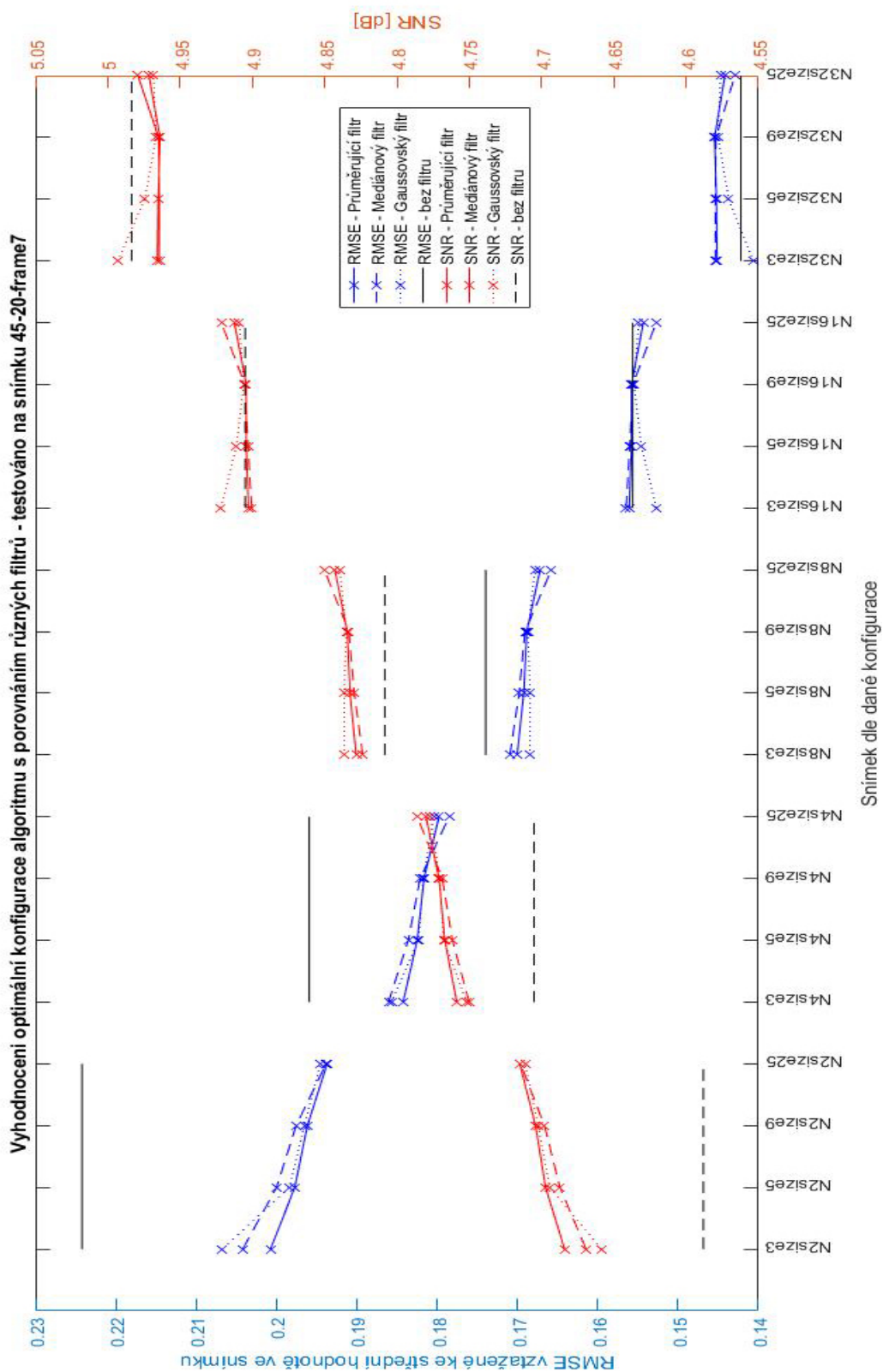
Obrázek 34: Diagram modifikovaného algoritmu

6.4.1 Vyhodnocení navrženého algoritmu

Jak bylo řečeno v předchozí části, algoritmus byl testován se třemi různými filtry a různou velikostí masky. Vyhodnocení neoptimálnějšího nastavení bylo provedeno stejným způsobem, jako tomu bylo u algoritmu SFFC. Nejprve se pomocí algoritmu vypočetly korigované snímky pro všechny varianty nastavení algoritmu a následně se vypočetlo RMSE vztažené ke střední hodnotě ve snímku dle vzorce č.12 a SNR dle vzorce č. 13 pro každý korigovaný snímek. Tyto hodnoty byly následně vyneseny do grafu č. 36 v závislosti na různé konfiguraci proměnných parametrů, kterými byly typ filtru, velikost masky filtru a počet snímků k průměrování, jak uvádí tabulka č. 8. Do grafu byly též vyneseny hodnoty chyby a SNR pro případ použití algoritmu bez filtrace, čili v případě využití MTPC algoritmu. Z grafu č. 36 lze vyčíst obecný trend, stejný jako v předešlých případech a sice, že se zvětšujícím se N klesá RMSE a zároveň roste SNR. Nicméně můžeme zde pozorovat opačný trend, než jaký se projevil u algoritmu SFFC, a to, že se zvětšující se velikostí masky filtru nepatrně klesá RMSE a roste SNR, což je žádoucí. Lze tedy konstatovat, že filtrace napomáhá snížit RMSE a eliminovat vliv šumu ve snímku, což potvrzuje i rostoucí SNR. Nicméně porovnáme-li tyto závislosti s hodnotou RMSE a SNR pro algoritmus MTPC, který nevyužívá prostorovou filtraci, tak zjistíme, že prostorová filtrace napomáhá snížit chybu RMSE a zároveň zvýšit SNR zejména pro pro menší počet průměrovaných snímků. Naopak pro větší počet průměrovaných snímků může již filtr začít škodit. Vliv filtru je do jisté míry závislý na testovaném snímku, kdy v některých případech při testování filtr snižoval chybu i pro $N=32$, jak je vidět na obdobných grafech pro jiné testovací snímky v příloze této práce. Dá se tedy říci, že vliv filtru je pozitivní a dovolí nám snížit N , aniž by chyba příliš vzrostla. Takovéto vyhodnocení bylo provedeno pro tři testovací snímky a následně bylo vybráno neoptimálnější nastavení algoritmu. Jako optimální nastavení bylo určeno $N=8$, typ filtru gaussian a velikost masky 5×5 pixelů. N bylo zvoleno na základě vlivu filtru na RMSE a SNR a také v závislosti na časové náročnosti výpočtu, která je pro všechny tři algoritmy vyobrazena na obrázku č.35.

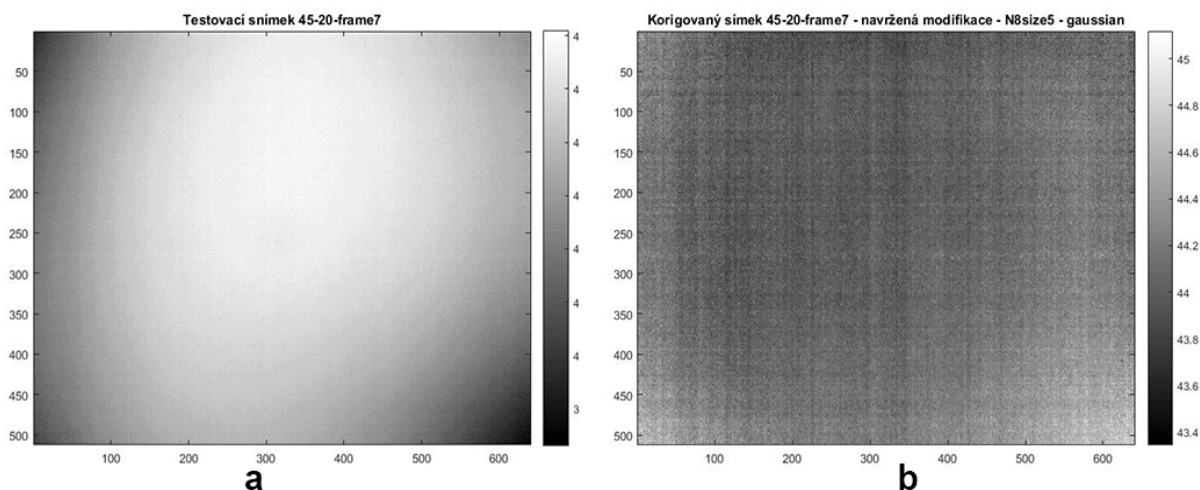


Obrázek 35: Porovnání časové náročnosti výpočtu jednotlivých algoritmusů



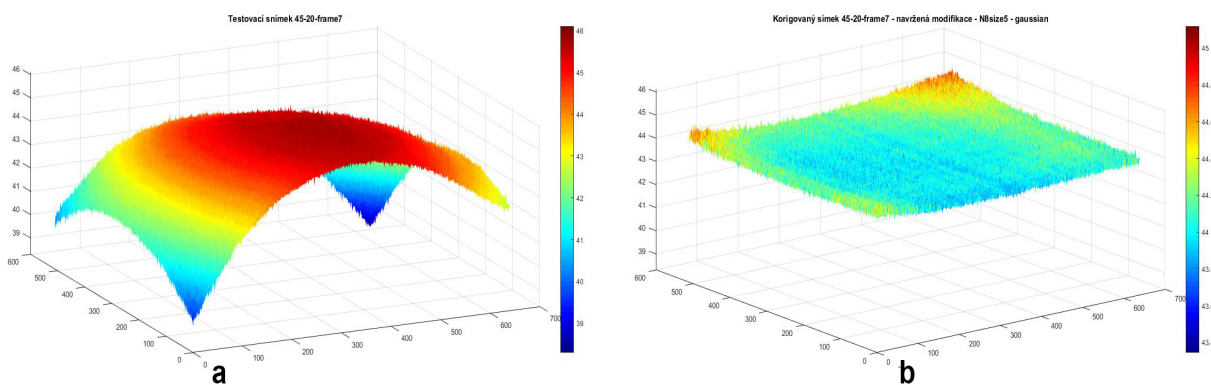
Obrázek 36: Porovnání vlastností navrženého algoritmu v závislosti na zadáných parametrech pro testovací snímek pořízený při teplotě 45 °C

Na následujících obrázcích lze vizuálně porovnat testovaný a korigovaný snímek, jako tomu bylo i u předchozích algoritmů. Opět byl použit stejný testovací snímek při teplotě 45°C . Na obrázku č. 37(a) lze vidět testovací nekorigovaný snímek, zatímco na obrázku č. 37 (b) lze vidět již korigovaný snímek.



Obrázek 37: Obrázek (a) zobrazuje testovací nekorigovaný snímek, obrázek (b) zobrazuje korigovaný snímek

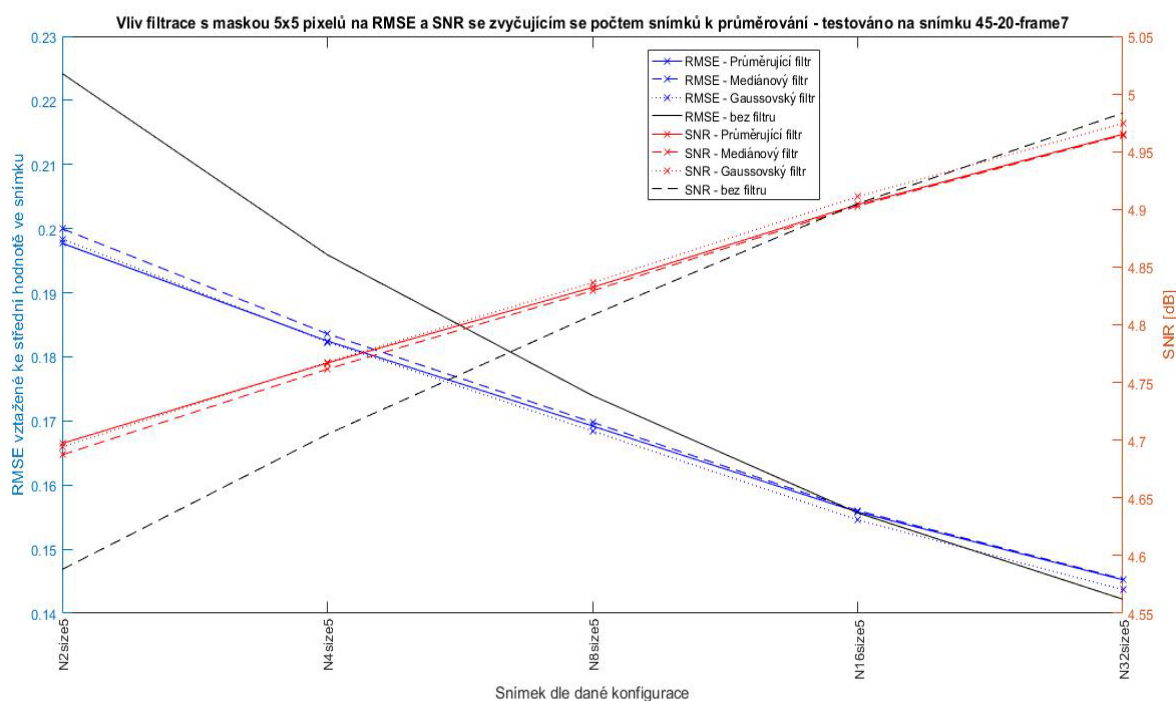
Opět byla data vynesena i do 3D modelu pro lepší představivost a také, aby byla reprezentována ve stejném měřítku, jako tomu je u 3D modelů předešlých algoritmů. Obrázek č. 38 (a) představuje 3D model testovaného snímku, obrázek 38 (b) pak 3D model korigovaného snímku.



Obrázek 38: Obrázek (a) zobrazuje 3D model testovaného nekorigovaného snímku, obrázek (b) zobrazuje korigovaný snímek

Z obrázků č. 37 a 38 je vidět, že korigovaný snímek vypadá velmi podobně, jako korigovaný snímek pomocí algoritmu MTPC. Nicméně dle vyhodnocení, které bylo provedeno, je ve výsledném korigovaném snímku dle navržené metody díky prostorové filtraci méně šumu. To lze vidět na grafu č. 39 porovnávajícím závislost RMSE na zvyšujícím se N pro všechny tři testované filtry s pevnou velikostí masky 5×5 pixelů. Tento graf demonstruje zlepšení

vlastností algoritmu MTPC po přidání filtrace. Toto zlepšení lze pozorovat v grafu, kam byla vynesena také křivka stejné závislosti pro MTPC algoritmus neobsahující filtraci. Křivka reprezentující MTPC algoritmus bez filtrace má větší chybu hodnot od střední hodnoty ve výsledném korigovaném snímku a zároveň menší SNR. Tedy obsahuje více šumu. Z tohoto grafu je patrný pozitivní dopad filtrace, kde je vidět, že zejména pro menší N filtr napomáhá snížit chybu v korigovaném obraze a potlačit šum. Výsledné chování křivky je do jisté míry závislé na vstupních testovacích datech



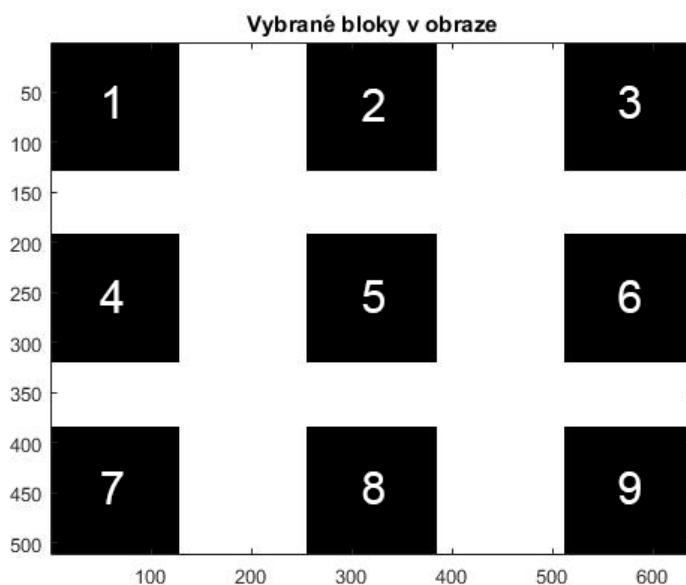
Obrázek 39: Vliv filtrace na RMSE a SNR v závislosti na N

7 Srovnání implementovaných korekčních metod

V této kapitole budou porovnány výše popsané a implementované korekční metody s referenční korekcí. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, jako referenční korekce byla vybrána korekce prováděná přímo kamerovým modulem TAU 2. Také zde bude vyhodnocena nejúčinnější metoda, která nejlépe odstraňuje nehomogenity z obrazu. Dále zde budou prezentovány výsledky jednotlivých algoritmů včetně otestování algoritmů na nehomogenních scénách.

7.1 Vyhodnocení účinnosti algoritmů

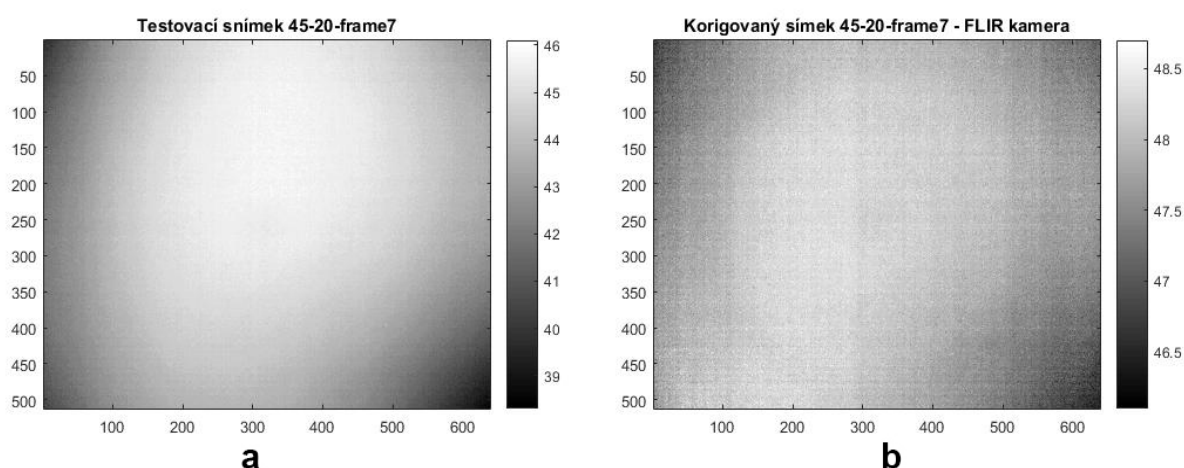
Aby bylo možné vyhodnotit, který z výše popsaných algoritmů podává nejlepší výsledky v korekci nehomogenit, je nutné nějakým způsobem vyhodnotit homogenitu v korigovaném obrazu. Vyhodnocení se provádělo na korigovaných snímcích z daných algoritmů s neoptimálnější nastavením pro daný algoritmus. Z každého z těchto korigovaných snímků se pořídilo celkem devět výřezů o velikosti 128 x 128 pixelů. Tyto výřezy byly vytvořeny v místech, které znázorňuje obrázek č. 40



Obrázek 40: Bloky pořizené v korigovaných snímcích

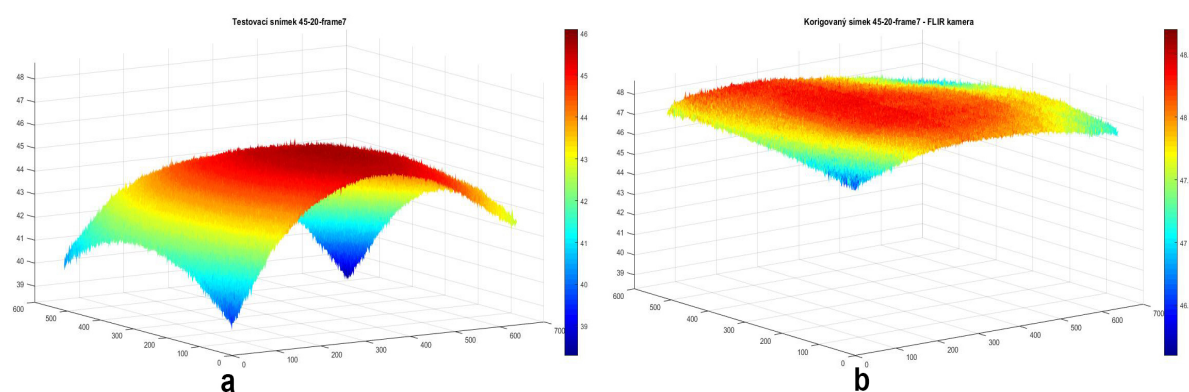
Dále byla vypočtena střední hodnota pixelů v každém z bloků pro všechny korigované snímky. Za nejvíce homogenní snímek nyní prohlásíme ten, který bude mít nejpodobnější střední hodnoty pro všechny bloky. Výpočet střední hodnoty přes tolik pixelů v sobě však může skrývat chybu a proto pro každý blok byla vypočtena i chyba vztážená právě k vypočtené střední hodnotě. Chyba, nebo-li RMSE, byla pro každý blok vypočtena dle vztahu 12. Tato chyba udává, jak moc můžeme vypočtené střední hodnotě věřit. Pro názorné porovnání homogenity jednotlivých korigovaných snímků byly do grafu č. 43 vyneseny střední hodnoty

všech bloků pro všechny korigované snímky pomocí výše popsáných algoritmů. A to včetně snímku korigovaného přímo v kameře, který je považován za referenční korekci, a testovaného nekorigovaného snímku. Ke každé střední hodnotě bloku byla vynesena její chyba, která v grafu reprezentuje věrohodnost vypočtené střední hodnoty. Pro vizuální představitivost snímku korigovaného kamerou, považovaného za referenční, jsou na obrázku č. 41 zobrazeny (a) testovaný nekorigovaný snímek a za (b) korigovaný snímek pomocí kamerového modulu TAU 2. Testovací snímek byl opět použit jako v předchozích případech o teplotě 45°C.



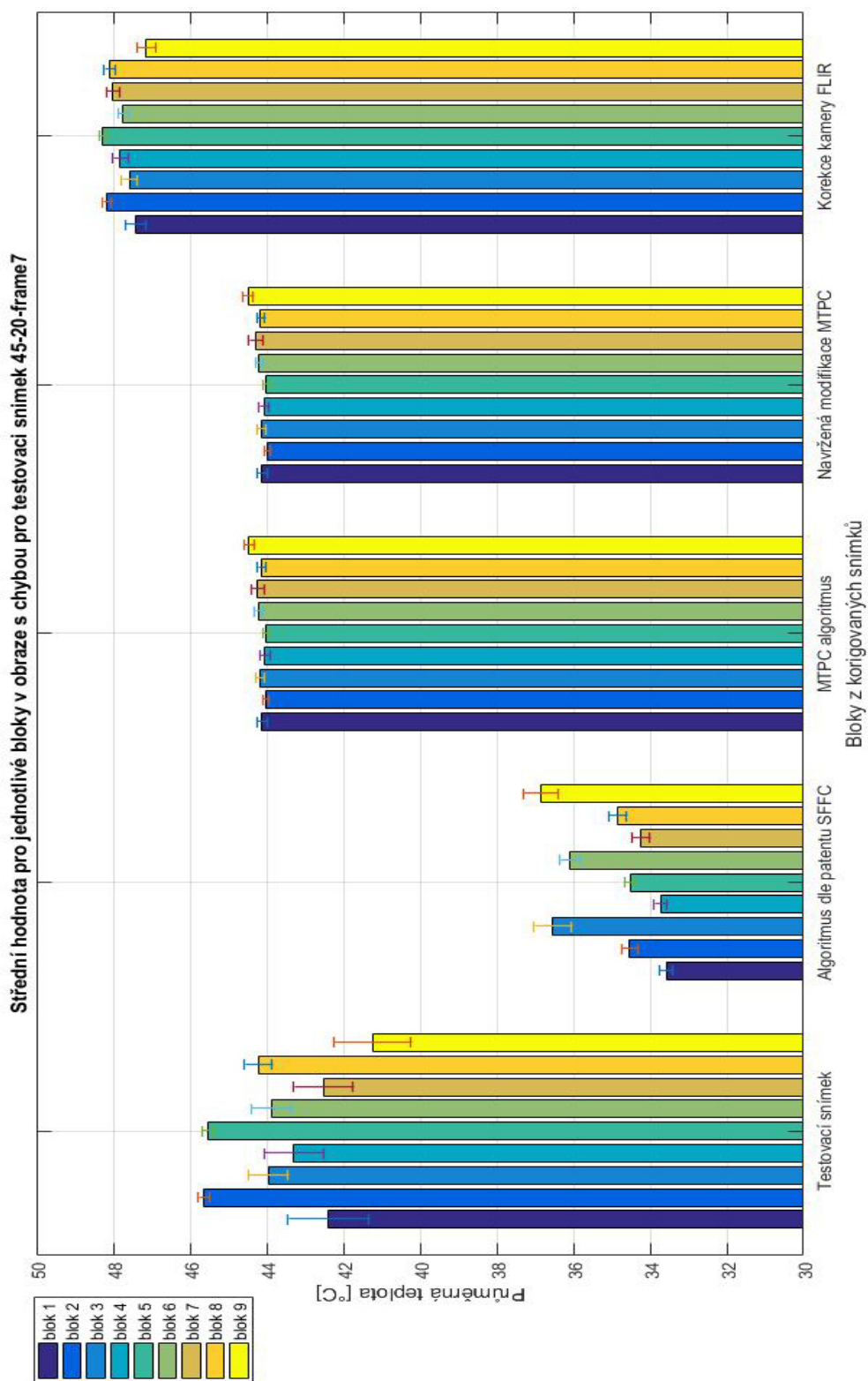
Obrázek 41: Obrázek (a) zobrazuje testovací nekorigovaný snímek, obrázek (b) zobrazuje korigovaný snímek

Stejně jako u všech předešlých algoritmů i zde byla vynesena data do 3D modelů ukazující vyrovnání hodnot v korigovaném snímku. Tento model opět zachovává rozsah teplot v obou snímcích jako v předešlých případech.



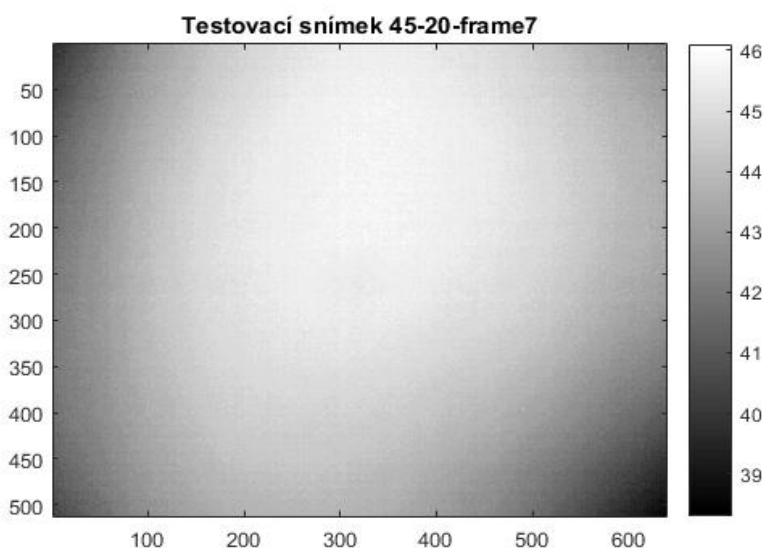
Obrázek 42: Obrázek (a) zobrazuje 3D model testovaného nekorigovaného snímku, obrázek (b) zobrazuje korigovaný snímek

Z těchto porovnání je zřetelně vidět, že kamera neposkytuje nejoptimálnější korekci vinětace, proto také byla zadána tato diplomová práce.

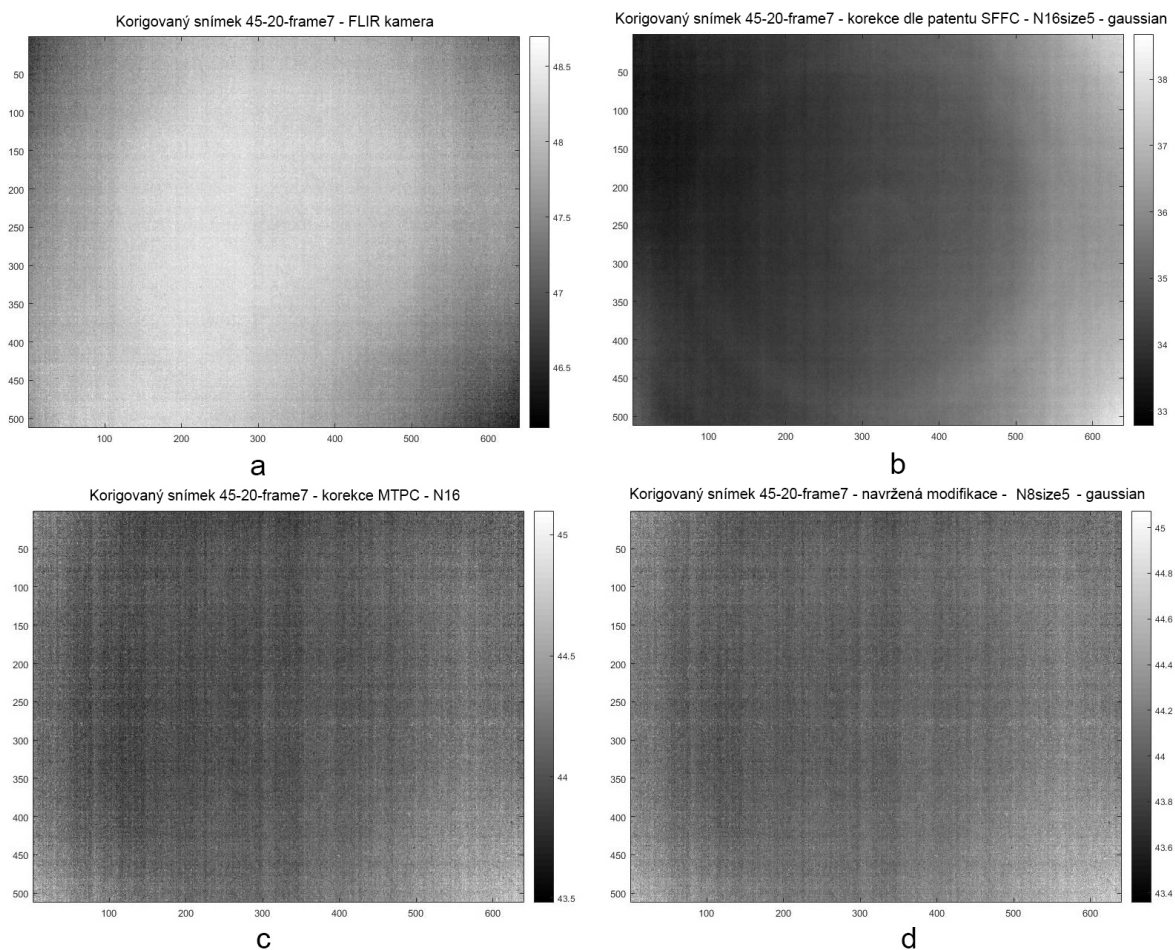


Obrázek 43: Porovnání homogenity v korigovaných a nekorigovaném snímku pořízeného na homogenní ploše o teplotě 45 °C

Z obrázku č. 43 je jasně vidět, že nejvíce homogenní snímky jsou snímky po průchodu MTPC algoritmem a navržené modifikaci tohoto algoritmu, jelikož mají nejpodobnější střední hodnoty ve všech blocích. Pro srovnání byl do grafu přidán i testovací snímek, u kterého lze pozorovat trend viněťace, kde bloky 2, 5 a 8 mají větší hodnotu než ostatní bloky, což poukazuje na pokles intenzity prošlého záření přes objektiv směrem ke kraji snímku. Vynesená chyba pro každý blok udává, jak moc můžeme vypočtené střední hodnotě důvěřovat, a dává představu o rozptylu hodnot v daném bloku. Za nejlépe korigované snímky lze považovat snímek korigovaný pomocí MTPC algoritmem a snímek korigovaný navrženou modifikací tohoto algoritmu. Navržený algoritmus vykazuje o něco lepší eliminaci šumu, což bylo popsáno výše. V příloze k této práci se nacházejí obdobné grafy vytvořené pro jiné testovací snímky. Pro vizuální porovnání korigovaných snímků vůči sobě a vůči testovacímu snímku bez korekce byly vytvořeny následující obrázky a to obrázek č. 44 a č. 45. Stejně jako v předchozí případech nezachovávají jednotlivé snímky stejný rozsah hodnot, jak by se mohlo jevit logické. Nicméně tím, že zejména SFFC algoritmus posouvá hodnoty korigovaného snímku o něco níž, byl by společný rozsah hodnot tak velký, že by v něm byly špatně viditelné zbylé nehomogenity. Proto má každý snímek svůj rozsah teplot od minimální po maximální hodnotu ve snímku. Případné posunutí hodnot, jako tomu je u korekce pomocí SFFC algoritmu, řeší teplotní kalibrace. Teplotní kalibrace je též nezbytnou součástí před použitím termokamery k přesnému měření. Na obrázku č. 44 je tedy vidět testovací nekorigovaný snímek a na obrázku č. 45 jsou pak vidět korigované snímky pomocí jednotlivých algoritmů.



Obrázek 44: Testovací nekorigovaný snímek 45-20-frame7 pořízený za teploty 45°C



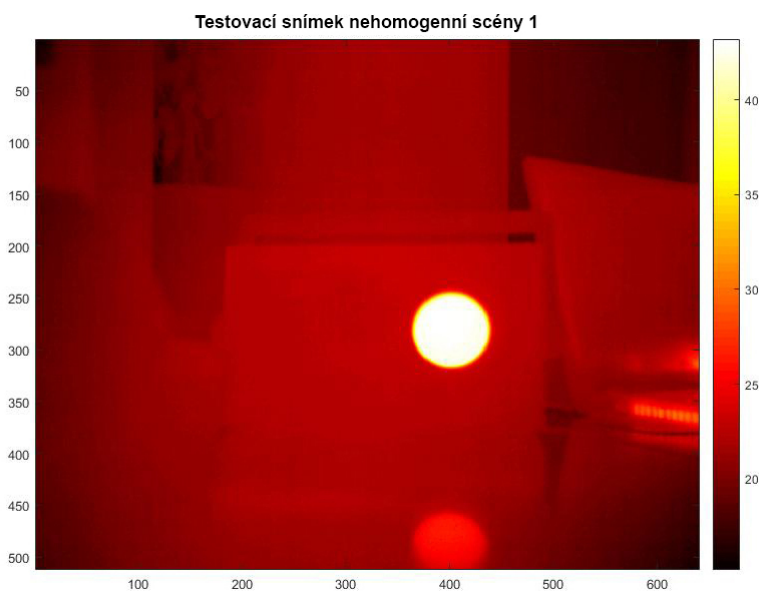
Obrázek 45: Korigované snímky dle jednotlivých algoritmů (a) korekce z kamery FLIR, (b) korekce SFFC algoritmem, (c) korekce MTPC algoritmem, (d) korekce navrženou modifikací MTPC algoritmu

Z obrázku č. 45 je vidět, že nejlepší výsledky opravdu vykazuje algoritmus MTPC a navržená modifikace. Ačkoliv jednotlivé korigované snímky nemají stejný rozsah hodnot, tak i přesto je na první pohled vidět uniformita obrazu v obrázcích č. 45 (c) a (d). Zlepšení korigovaných snímků oproti testovanému lze též pozorovat právě na rozsahu hodnot jednotlivých snímků. Po korekci mají všechny snímky menší rozsah teplot než nehomogenní testovaný snímek.

7.2 Testování algoritmů na nehomogenní scéně

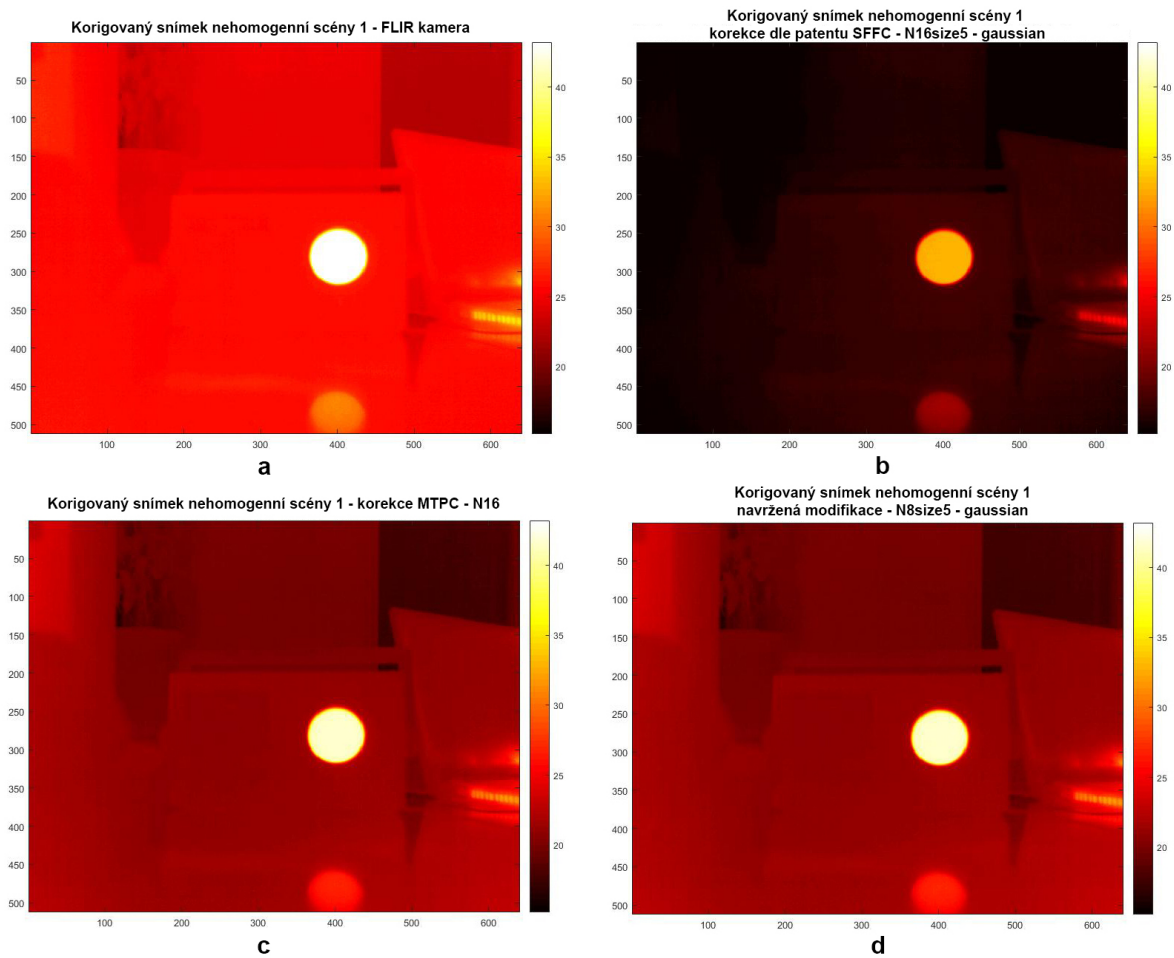
Jedním z úkolů této práce bylo otestovat navržený algoritmus na reálných snímcích nehomogenní scény za účelem eliminovat vinětaci ve snímku. Tyto nehomogenní data měla být pořízena z bezpilotního prostředku na velké plochy. Takovéto datasety se bohužel pro účely diplomové práce nepodařilo sehnat a tudíž byly algoritmy otestovány na jiných snímcích nehomogenní scény. Na následujícím obrázku č. 46 lze vidět nekorigovaný testovací snímek

nehomogenní scény, na následujícím obrázku č. 47 jsou následně porovnány jednotlivé korigované snímky jednotlivými algoritmy.



Obrázek 46: Testovací nekorigovaný snímek nehomogenní scény

Na testovacím snímku č. 46 je v rozích patrná vinětace, kterou by měly algoritmy eliminovat či úplně odstranit. Vinětace je na nehomogenní scéně hůře viditelná, proto byla zvolena jiná barevná reprezentace dat. Jelikož má testovaný snímek poměrně velký rozsah hodnot, proto mohl být zachován rozsah hodnot pro všechny korigované snímky. Na obrázku č. 47 lze vidět, jak algoritmus SFFC posunul hodnoty teplot o něco níž a naopak korekce přímo z kamery je posunula o něco výš. Jak již bylo zmíněno výše, posun hodnot teploty vyřeší následná teplotní kalibrace. Na korigovaných snímcích lze vidět jisté zlepšení oproti původnímu nekorigovanému snímku. To, který snímek je nejlépe korigován, je velmi těžké posoudit pouhým okem. Nicméně analýza snímků ukazuje, že nejhorší výsledek má implementovaný algoritmus SFFC, který je vyobrazen na obrázku č.47 (b). V příloze k této práci je přiloženo ještě jedno porovnání korigovaných snímků s nekorigovaným na jiné nehomogenní scéně. I na snímcích v příloze je zachovaný rozsah hodnot pro všechny snímky odpovídající rozsahu testovaného snímku. Na korigovaných snímcích lze též vidět zlepšení oproti nekorigovanému snímku.



Obrázek 47: Korigované snímky dle jednotlivých algoritmů (a) korekce z kamery FLIR, (b) korekce SFFC algoritmem, (c) korekce MTPC algoritmem, (d) korekce navrženou modifikací MTPC algoritmu

8 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá popisem stávajících metod používaných pro korekci vinětace a nehomogenit v obraze z mikrobolometrických senzorů a následným návrhem modifikace stávajícího algoritmu.

V první části této práce byla obecně popsána infračervená technika a její využití se zaměřením na termální kamery. Byly vysvětleny základní zákonitosti termokamer a popsány základní typy senzorů využívaných v termokamerách. Dále pak byly popsány nejčastější vady v obraze z mikrobolometrických senzorů, které mohou nastat, a jak se tyto vady obvykle korigují. Práce se zaměřuje zejména na odstranění vinětace a nehomogenit z obrazu a proto byly vybrány a popsány dvě stávající metody korekce vinětace u termokamer pracujících na bázi mikrobolometrů. Jedna z vybraných metod využívala prosté aplikace flat field snímku, který však byl jistým způsobem vylepšen. Tento algoritmus, nazvaný jako SFFC, pochází z patentu o korekci pomocí flat field snímku od firmy FLIR. Druhý vybraný algoritmus využívá dvoubodovou korekci za využití nasnímání homogenního IR zářiče o dvou různých teplotách. Tento algoritmus nazývám v práci jako MTPC algoritmus.

V druhé části práce byly obě vybrané metody implementovány v prostředí Matlab. Pro dosažení nejlepších výsledků těchto algoritmů bylo provedeno testování na snímcích zachycujících IR zářič s homogenní plochou, aby se našlo neoptimálnější nastavení algoritmů. Následoval návrh modifikace MTPC algoritmu, za účelem vylepšit jeho účinnost. Modifikace spočívala ve využití prostorové filtrace v korekčním snímku, která snížila vliv šumu ve výsledném korigovaném snímku. Pro získání nejlepších výsledků navržené modifikace bylo opět provedeno testování za účelem nalézt neoptimálnější nastavení algoritmu. Testovány byly celkem tři různé filtry s různou velikostí masky. Dalším parametrem, který byl zahrnut do testování, byl počet vstupních snímků, z kterých se vytvářel průměrný korekční snímek. Cílem bylo získat takový algoritmus, který by korigoval vinětaci a nehomogenity v obraze, čili zkorigovat stávající snímek tak, aby po korekci byl uniformní. Tedy aby měl co nejmenší rozptyl hodnot. Proto byla pro každý korigovaný snímek dle dané konfigurace vypočtena chyba RMSE ke střední hodnotě pixelů. Tato chyba reprezentovala rozptyl hodnot ve snímku. Též bylo pro každý korigovaný snímek dle dané konfigurace vypočteno SNR, které poskytlo informaci o množství šumu ve snímku. Závislost RMSE a SNR na všech zmíněných parametrech byla vynesena do grafu pro lepší vyhodnocení.

Navržená modifikace algoritmu vykazovala téměř totožnou účinnost co se týče odstranění vinětace, avšak díky prostorové filtraci korekčních snímků bylo dosaženo snížení vlivu šumu ve výsledném korigovaném snímku.

V poslední části této práce pak byly všechny implementované algoritmy otestovány na reálných datech z termokamery, a to jak na snímcích s homogenní scénou tak na snímcích s nehomogenní scénou. Výsledné korigované snímky pak byly porovnány mezi sebou a zhodnoceny. Jako referenční snímky byly zvoleny korigované snímky přímo z termokamery, kde přesný postup korekce není znám.

8.1 Diskuze možných vylepšení

Ačkoliv byly získané výsledky dle mého názoru velmi pozitivní i zde je určitě prostor na další vylepšení. Jako největší možný potenciál pro vylepšení algoritmu korigující vinětači a nehomogenity v obraze bych viděl ve využití vícebodové nebo polynomiální korekce. V MTPC algoritmu popsaném v této práci, pro který byla následně navržena modifikace pro zlepšení výsledků, byla využita dvoubodová korekce. Tato dvoubodová korekce poskytuje relativně dobré výsledky, nicméně počítá s lineární charakteristikou senzoru. Pro lepší a přesnější výsledky by tak jistě pomohla vícebodová či polynomiální korekce.

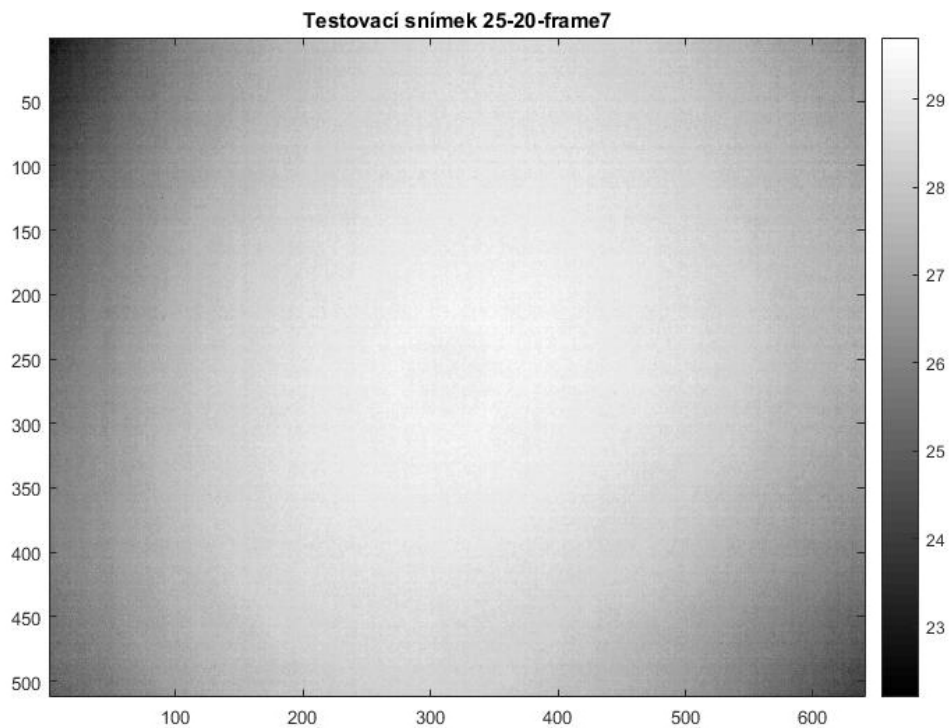
9 Literatura

- [1] M. Diani A. Rossi and G. Corsini. Temporal statistics de-ghosting for adaptive non-uniformity correction in infrared focal plane arrays. *ELECTRONICS LETTERS*, 46(5), mar 2010.
- [2] Automatizace.hw.cz. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/images/bolometry/microbolometer.jpg>.
- [3] Acal BFi. 4 inches differential blackbody source. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.acalbfi.com/be/Photonics/Uniform-sources-and-Camera-test-systems/Black-bodies/p/4-Inches-Differential-Blackbody-Source/0000008QUQ>.
- [4] Fluke Corporation. 9132 and 9133 portable infrared calibrators. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://en-us.fluke.com/products/temperature-calibrators/fluke-calibration-4180-4181-precision-ir-calibrators.html>.
- [5] Fluke Corporation. Fluke calibration 4180/4181 precision ir calibrators. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://en-us.fluke.com/products/temperature-calibrators/fluke-calibration-4180-4181-precision-ir-calibrators.html>.
- [6] Arnold Daniels. *Field Guide to Infrared Systems, Detectors, and FPAs, Second Edition*. SPIE PRESS BOOK, 2010.
- [7] Eustace L. Dereniak David L. Perry. Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors. *OPTICAL ENGINEERING*, 1993.
- [8] Inc. Flir Systems. Supplemental ffc - application note. online, 2014. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/flir_supplemental_ffc_app_note.pdf.
- [9] Katedra fyziky FEL ČVUT v Praze. Planckova konstanta. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/lab/planck/2_cteni_2.php.
- [10] Thorlabs Inc. Lens materials. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=8790.
- [11] P. Zahradník J. Pech. Mikrobolometrické obrazové snímače. online, apr 2003. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/03015/index.html>.
- [12] Centrum termografie J. Sova. Praktické aplikace termokamer. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/workswell/>.
- [13] J. Pokorná J. Sova. Bezdotykové měření teplotních polí – senzory. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2018_02_cam.php.
- [14] K. Kadlec. Teoretické základy bezdotykového měření teploty (část 2) [online], 2014. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52626.pdf.
- [15] Focus 2000 Infrared Ltd, 2018. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.focus2k.co.uk/cox13/>.

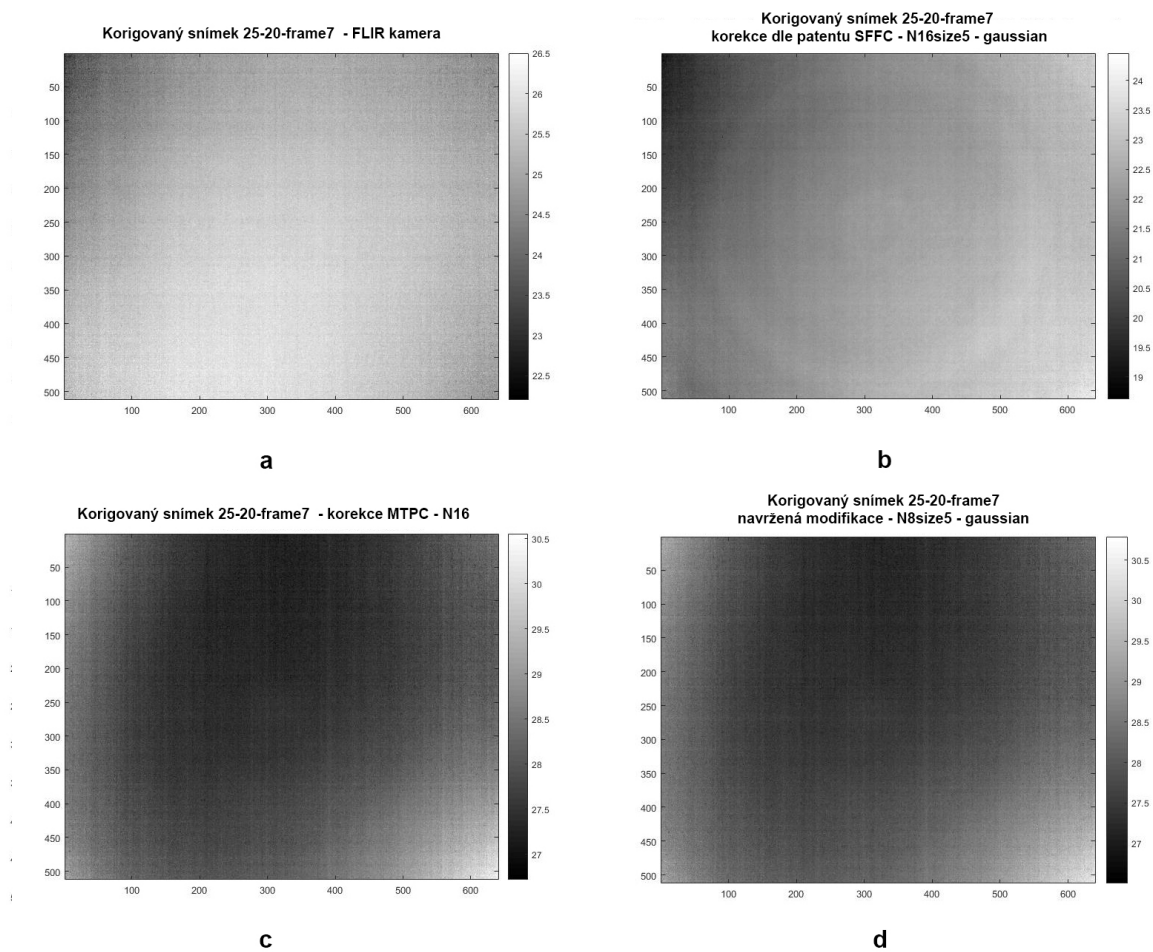
- [16] Klaus-Peter Möllmann Michael Vollmer. *Infrared Thermal Imaging Fundamentals, Research and Applications*. WILEY-VCH Verlag GmbH, second edition, 2018.
- [17] MoviTHERM. What is netd in a thermal camera? [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://movitherm.com/knowledgebase/netd-thermal-camera/>.
- [18] Tomasz Orzanowski. Nonuniformity correction algorithm with efficient pixel offset estimation for infrared focal plane arrays. online, 2016. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/309323436_Nonuniformity_correction_algorithm_with_efficient_pixel_offset_estimation_for_infrared_focal_plane_arrays.
- [19] Melanie Saayman. Materials for infrared optics. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://wp.optics.arizona.edu/optomech/wp-content/uploads/sites/53/2016/10/Saayman-521-Tutorial.pdf>.
- [20] J. Sova. Bezdotykové měření teplotních polí i. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017_18_ter.php.
- [21] J. Sova. Termokamery a pyrometry – princip měření, vlastnosti a využití [online], 2014. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/termokamery_1.pdf.
- [22] J. Sova. Bezdotykové měření teplotních polí ii, 2017. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017_19_erm.php.
- [23] Workswell s.r.o. Lwir termokamera flir a655sc. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.termokamery-flir.cz/termokamera-pro-vedu-a-vyzkum-flir-a655sc/>.
- [24] Workswell s.r.o. Termokamera flir tau2. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/termokamera-flir-tau2/>.
- [25] Termokamera.cz. Termokamery principy a funkce [online]. [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/>.
- [26] Inc. Vu L. Nguyen Flir Systems. United states patent - flat field correction for infrared cameras. online, 2013. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US8373757>.
- [27] Andrew Wilson. The infrared choice, 2011. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.vision-systems.com/articles/print/volume-16/issue-4/features/the-infrared-choice.html>.
- [28] Yao Zhao Xiyan Huang, Xiubao Sui. An efficient shutter-less non-uniformity correction method for infrared focal plane arrays. *Proc. SPIE*, 10250, 2017.

A Obrazové přílohy

Porovnání nekorigovaného snímku s korigovanými. Homogenní scéna při teplotě 25 °C.

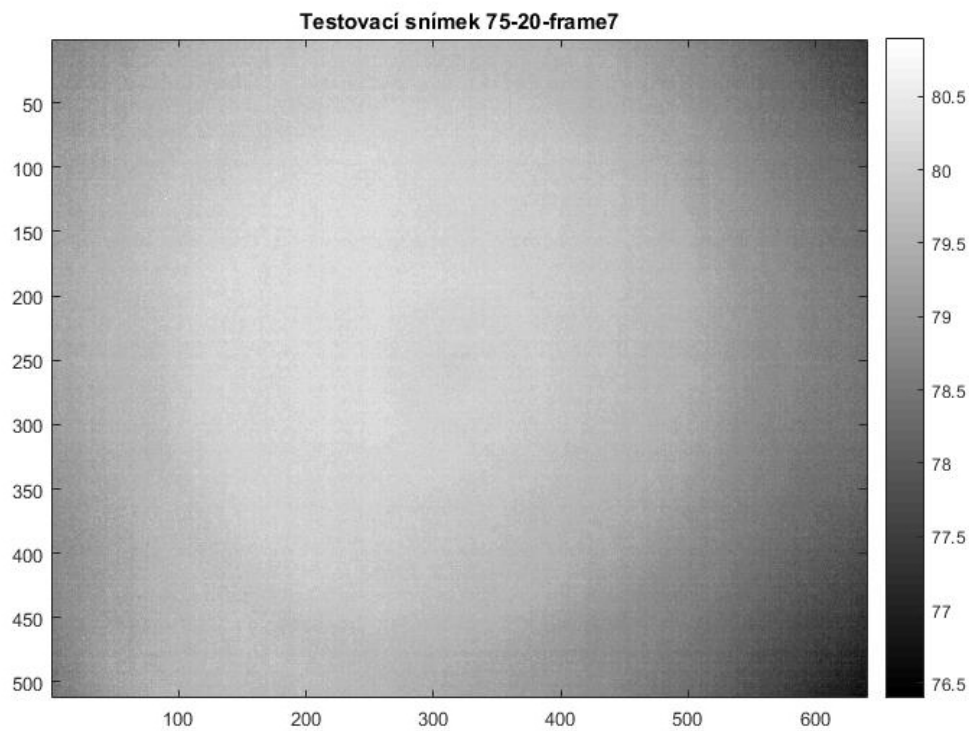


Obrázek 48: Testovací nekorigovaný snímek 25-20-frame7 pořízený za teploty 25°C

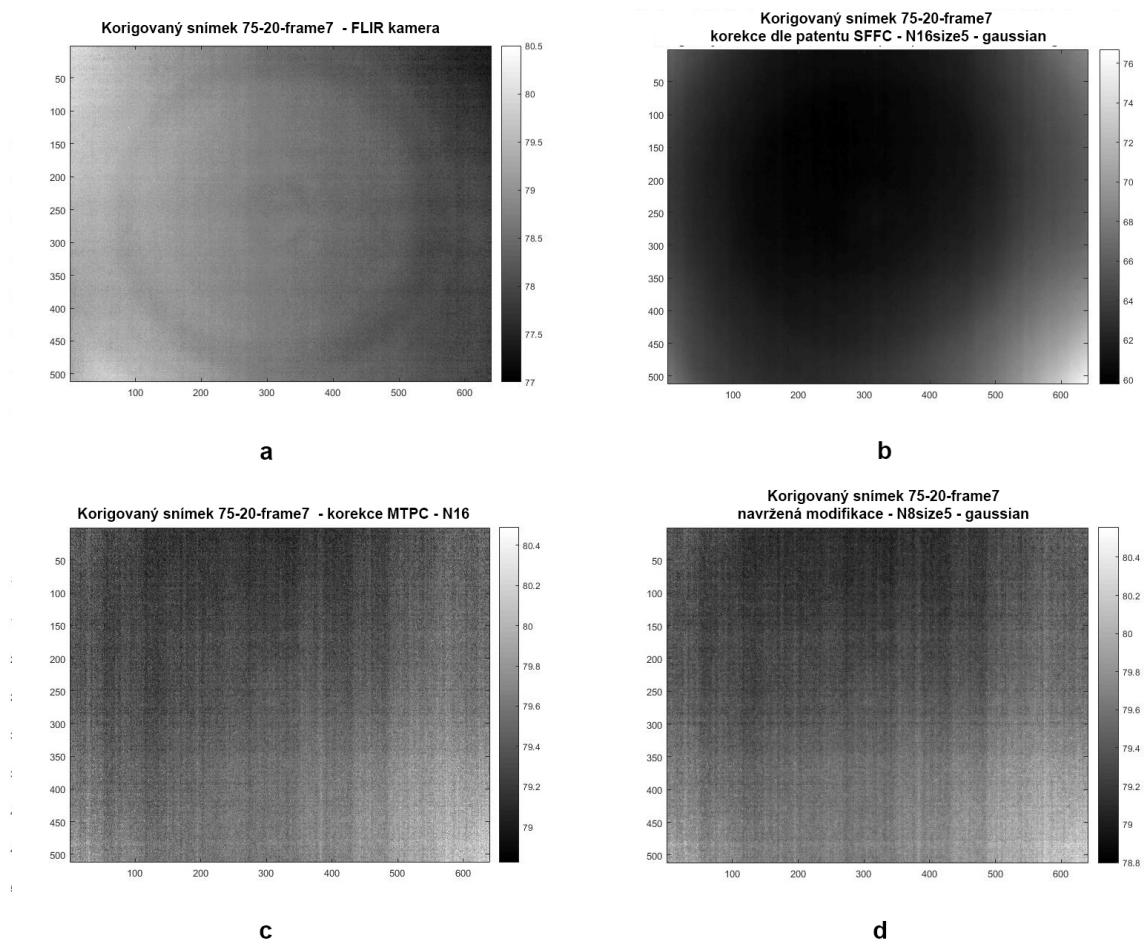


Obrázek 49: Korigované snímky dle jednotlivých algoritmů (a) korekce z kamery FLIR, (b) korekce SFFC algoritmem, (c) korekce MTPC algoritmem, (d) korekce navrženou modifikací MTPC algoritmu

Porovnání nekorigovaného snímku s korigovanými. Homogenní scéna při teplotě 75 °C.



Obrázek 50: Testovací nekorigovaný snímek 75-20-frame7 pořízený za teploty 75°C

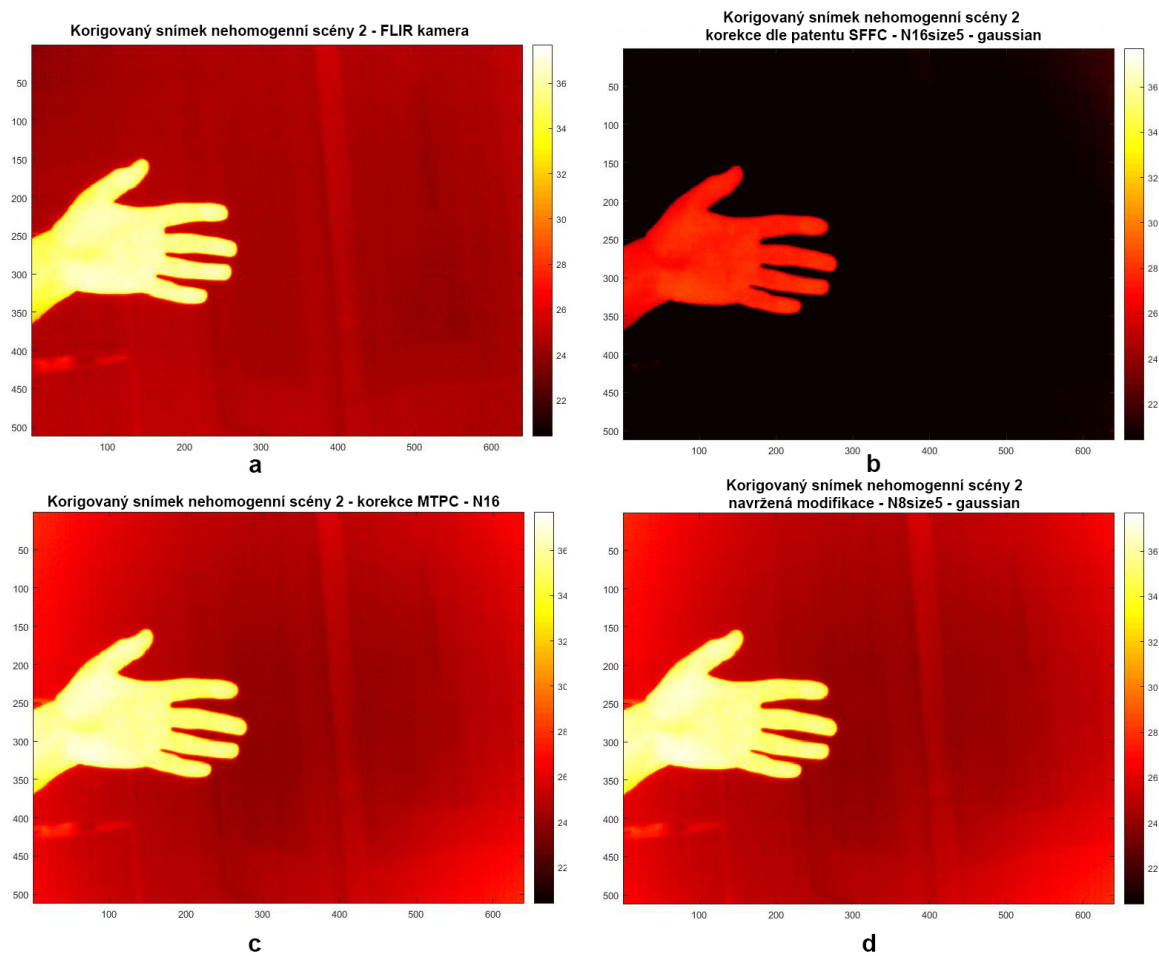


Obrázek 51: Korigované snímky dle jednotlivých algoritmů (a) korekce z kamery FLIR, (b) korekce SFFC algoritmem, (c) korekce MTPC algoritmem, (d) korekce navrženou modifikací MTPC algoritmu

Nehomogenní scéna 2.



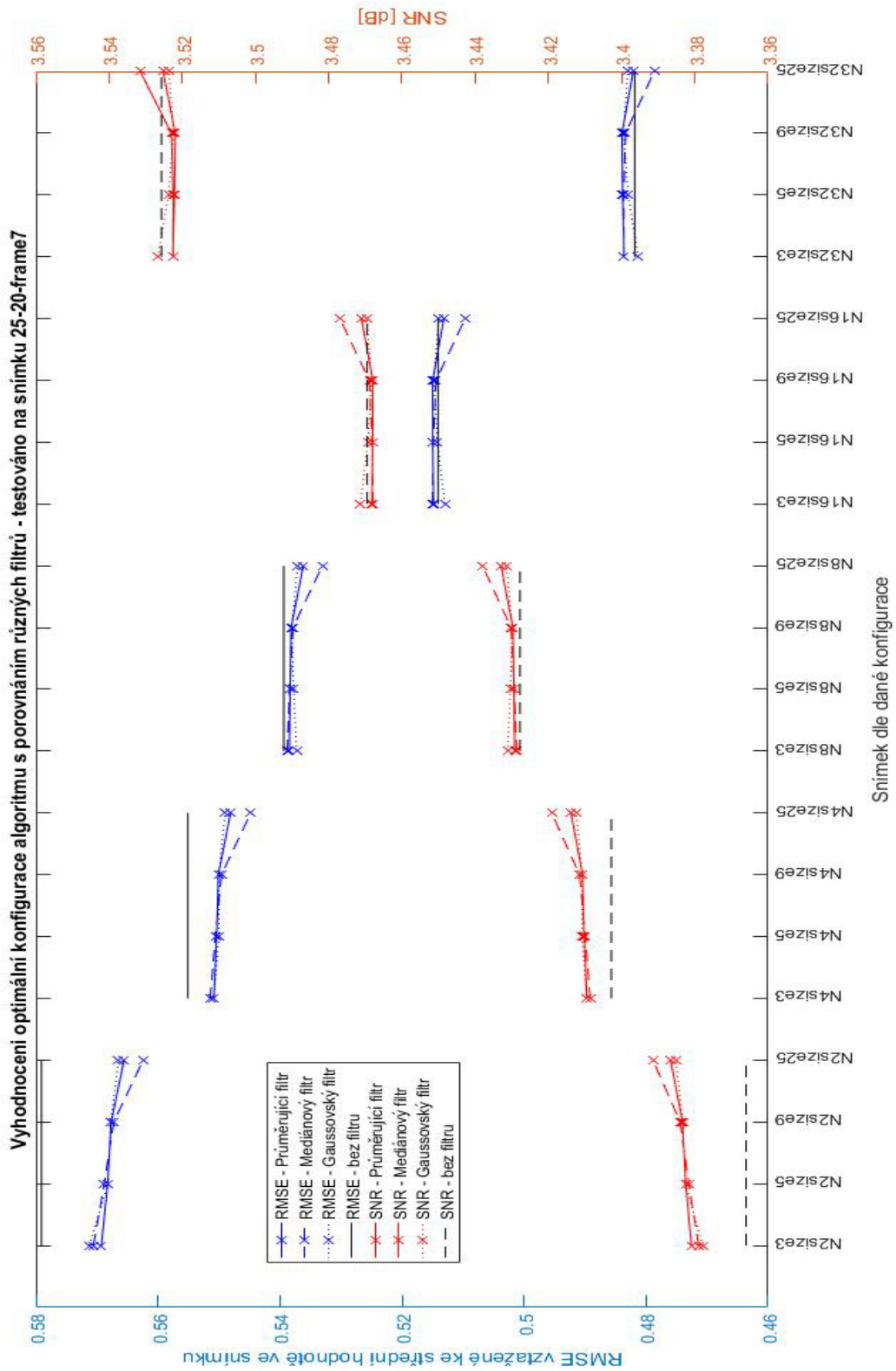
Obrázek 52: Testovací nekorigovaný snímek nehomogenní scény



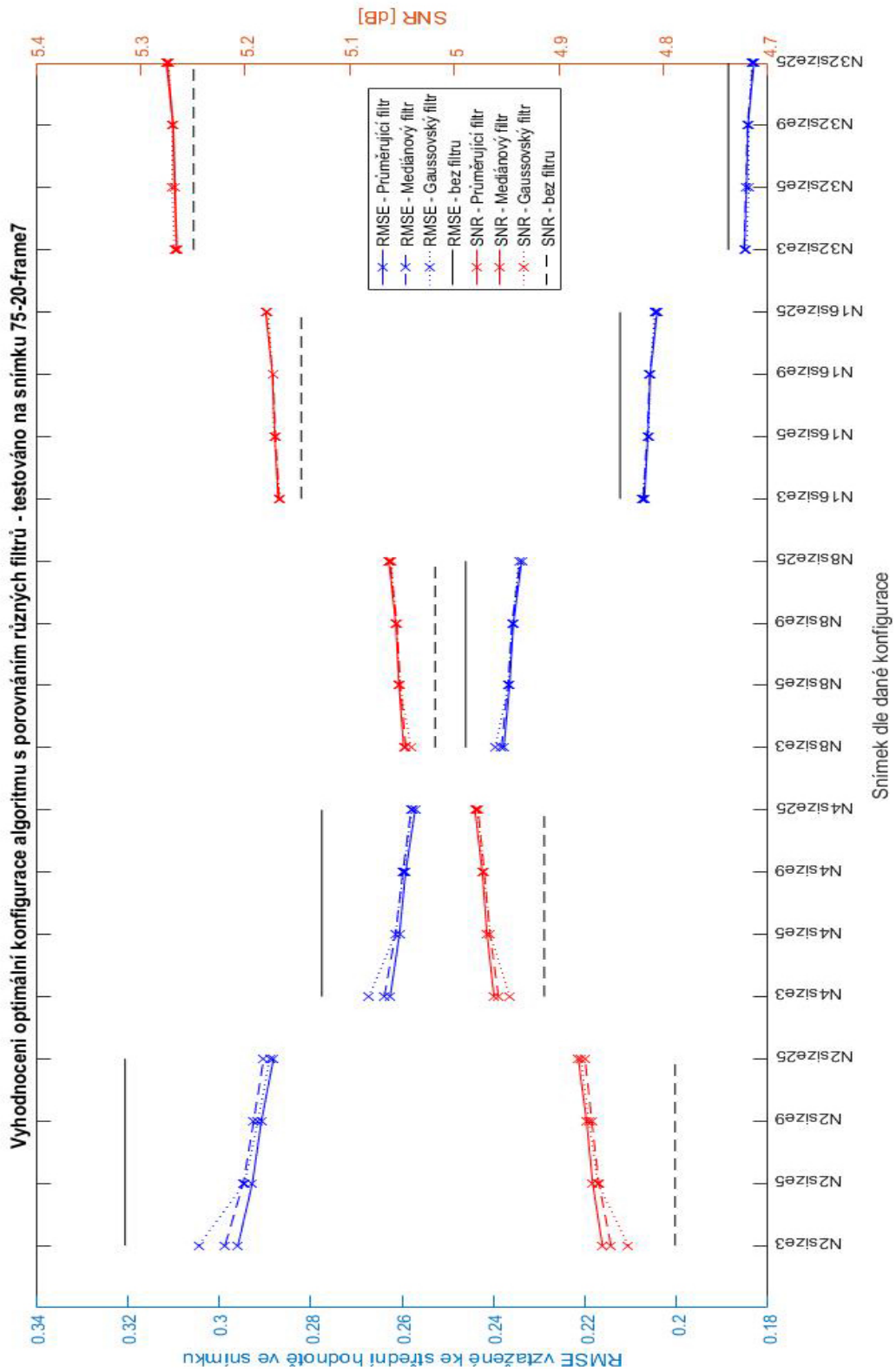
Obrázek 53: Korigované snímky dle jednotlivých algoritmů (a) korekce z kamery FLIR, (b) korekce SFFC algoritmem, (c) korekce MTPC algoritmem, (d) korekce navrženou modifikací MTPC algoritmu

B Grafy

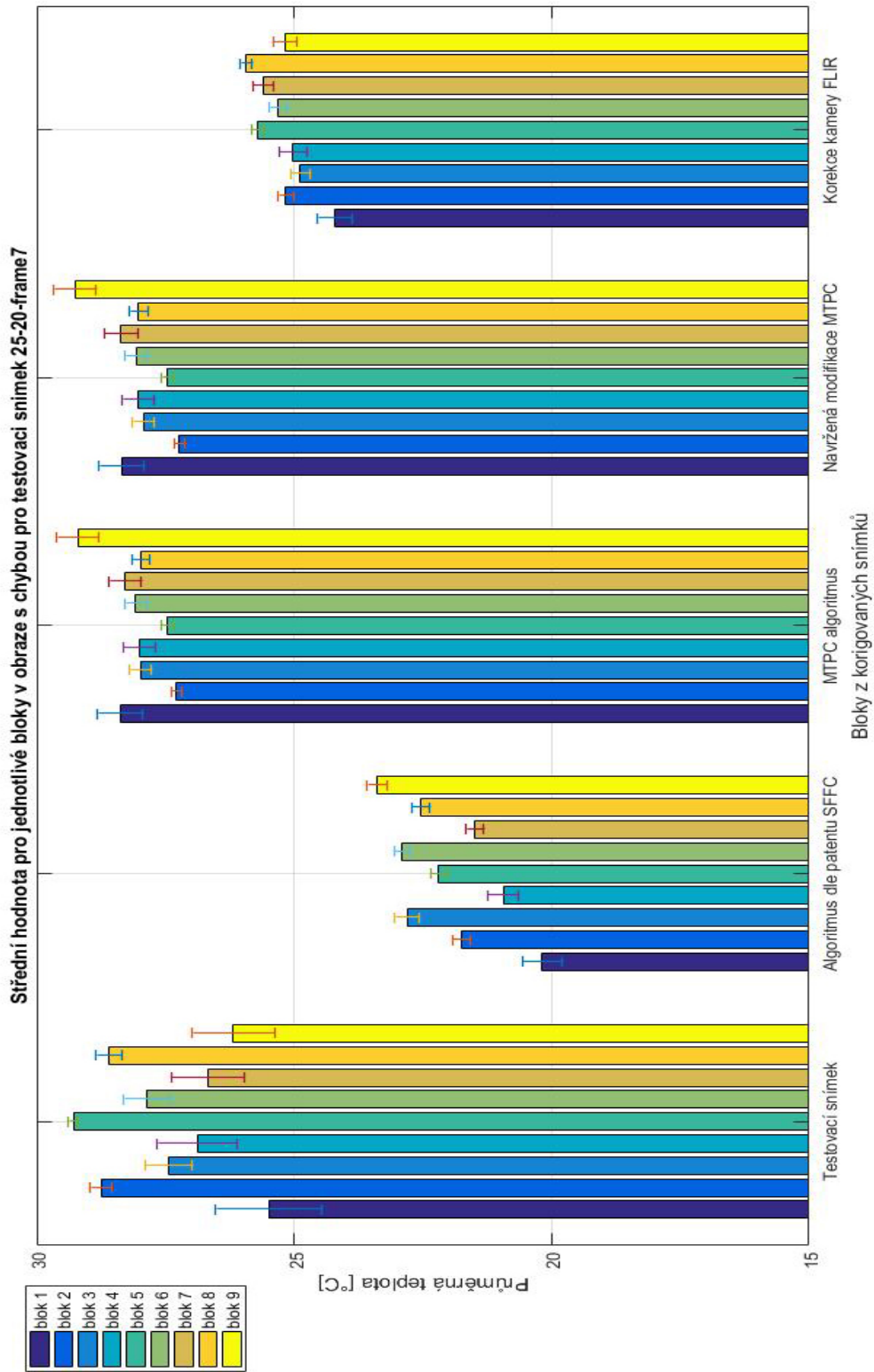
V této příloze se nacházejí další grafy porovnávající vlastnosti navrženého algoritmu v závislosti na zadaných parametrech pro další dva testovací snímky pořízené na homogenním IR zářiči. Pro stejné dva testovací snímky jsou zde další dva grafy porovnávající všechny algoritmy s referenční korekcí z kamery. Testovací snímky byly pořízeny na homogenní IR zářiči o teplotě 25 a 75°C.



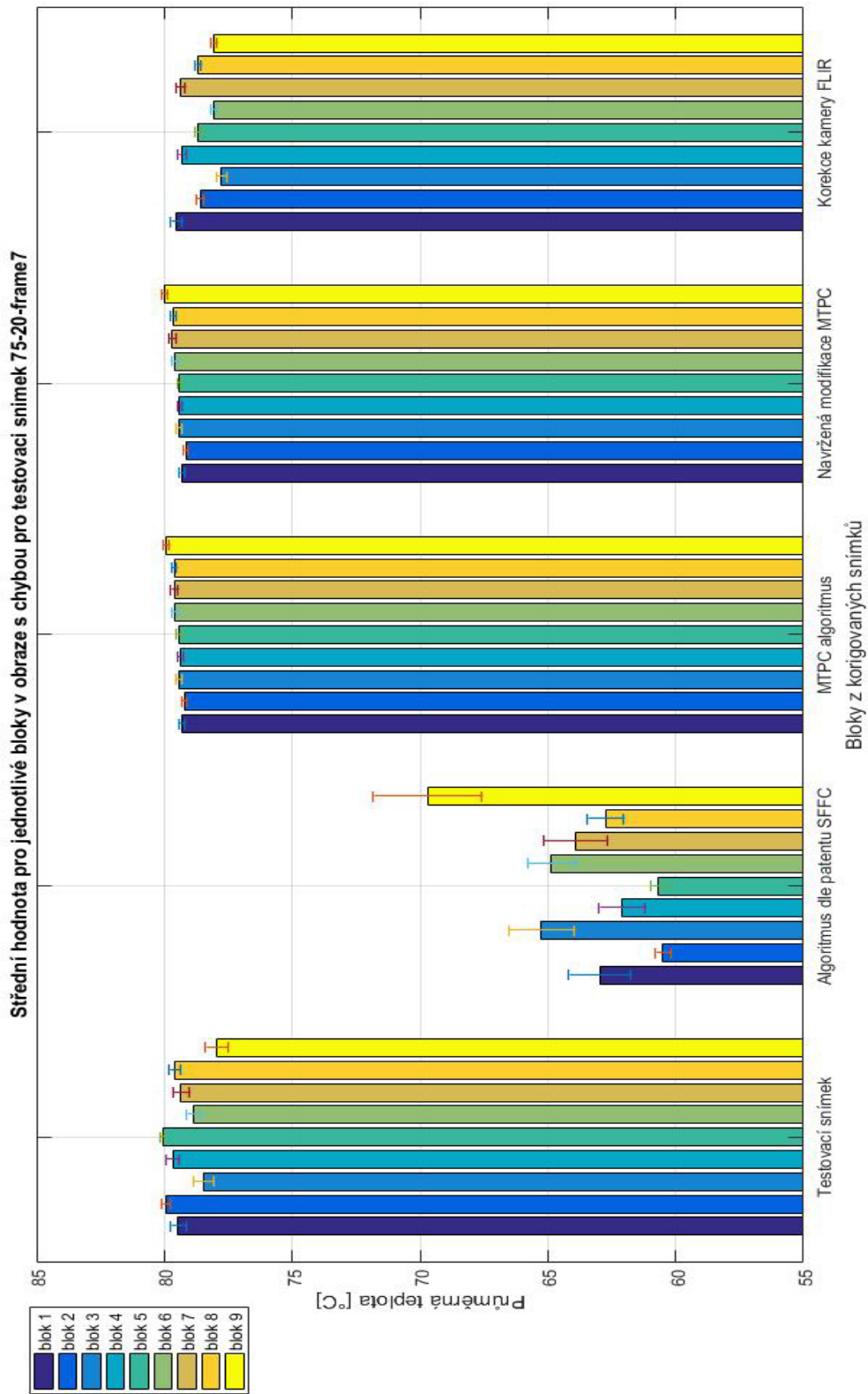
Obrázek 54: Porovnání vlastností navrženého algoritmu v závislosti na zadáných parametrech pro testovací snímek pořízený při teplotě 25 °C



Obrázek 55: Porovnání vlastností navrženého algoritmu v závislosti na zadáních parametrech pro testovací snímek pořízený při teplotě 75 °C



Obrázek 56: Porovnání homogenity v korigovaných a nekorigovaném snímku pořízeného na homogenní ploše o teplotě 25 °C



Obrázek 57: Porovnání homogenity v korigovaných a nekorigovaném snímku pořízeného na homogenní ploše o teplotě 75 °C

C Dvd disk

V tabulce č. 9 jsou zaznamenány všechna jména složek na přiloženém DVD disku.

Jméno složky	Popis
Datasety	Testovací a kalibrační snímky.
Kódy	Zdrojové kódy vytvořené během práce
Výsledky	Výsledné grafy a korigované snímky

Tabulka 9: Obsah disku