



FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA INFORMATIKY
A VÝPOČETNÍ TECHNIKY



Bakalářská práce

Algoritmy pro korekci termografického obrazu

Bohdan Teplý



PLZEŇ

2023



FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA INFORMATIKY
A VÝPOČETNÍ TECHNIKY

Bakalářská práce

Algoritmy pro korekci termografického obrazu

Bohdan Teplý

Vedoucí práce

Ing. Pavel Mautner, Ph.D.

© Bohdan Teplý, 2023.

Všechna práva vyhrazena. Žádná část tohoto dokumentu nesmí být reprodukována ani rozšiřována jakoukoli formou, elektronicky či mechanicky, fotokopírováním, nahráváním nebo jiným způsobem, nebo uložena v systému pro ukládání a vyhledávání informací bez písemného souhlasu držitelů autorských práv.

Citace v seznamu literatury:

TEPLÝ, Bohdan. *Algoritmy pro korekci termografického obrazu*. Plzeň, 2023. Bachelářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra informatiky a výpočetní techniky. Vedoucí práce Ing. Pavel Mautner, Ph.D.

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta aplikovaných věd

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bohdan TEPLÝ**
Osobní číslo: **A20B0253P**
Studijní program: **B0613A140015 Informatika a výpočetní technika**
Specializace: **Informatika**
Téma práce: **Algoritmy pro korekci termografického obrazu**
Zadávající katedra: **Katedra informatiky a výpočetní techniky**

Zásady pro vypracování

1. Seznamte se se specifickými vlastnostmi termografických obrázků dodaných zadavatelem práce.
2. Prostudujte existující algoritmy zpracování běžných obrazů pro kompenzaci nerovnoměrné expozice scény.
3. Vybrané algoritmy implementujte s úpravami pro použití na termografických datech.
4. Implementaci otestujte alespoň na 20 obrázcích, či sekvencích. Testovací data dodá zadavatel práce.
5. Zdokumentujte postup řešení, popište a zhodnoťte vytvořené výsledky.

Rozsah bakalářské práce: **doporuč. 30 s. původního textu**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Dodá vedoucí bakalářské práce

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Mautner, Ph.D.**
Katedra informatiky a výpočetní techniky

Datum zadání bakalářské práce: **3. října 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **4. května 2023**

L.S.

Doc. Ing. Miloš Železný, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Přemysl Brada, MSc., Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 25. října 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Západočeská univerzita v Plzni má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V Plzni dne 24. března 2023

.....

Bohdan Teplý

V textu jsou použity názvy produktů, technologií, služeb, aplikací, společností apod., které mohou být ochrannými známkami nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků.

Abstrakt

Termografické snímky získané snímáním objektu IR kamerou mohou trpět nerovnoměrnou expozicí či obsahovat rušivou mřížku. Tyto nedokonalosti ztěžují nalezení indikací nebo mohou vést k nesprávnému určení defektů. Práce zhodnocuje dostupné algoritmy a metody, jak eliminovat nerovnoměrné expozice a jak odstranit rušivou mřížku. Následně je uveden popis a princip implementovaných filtrů, které se zabývají kompenzací nerovnoměrné expozice a odstraňují mřížku z termografického obrazu. Použitím těchto filtrů je výsledný snímek kvalitnější a pro operátora jsou indikace lépe viditelné. Funkčnost implementovaných algoritmů je zobrazena na sérii snímků.

Abstract

Thermographic images obtained by scanning an object with an IR camera may suffer from uneven exposure or contain a distorting grid. These imperfections make it difficult to find indications or may lead to incorrect identification of defects. This paper evaluates available algorithms and methods to eliminate uneven exposure and to remove the interference grid. Subsequently, a description and principle of implemented filters that deal with compensation of uneven exposure and grid pattern removal from thermographic images are provided. By using these filters, the resulting image quality is improved and the indications are more visible to the operator. The functionality of the implemented algorithms is shown in a series of images.

Klíčová slova

termogram • IRNDT • LabIR® • IR kamera • Fourierova transformace • zpracování termografického obrazu • filtrování termografického snímku • nerovnoměrná expozice

Poděkování

Tímto textem bych chtěl vyjádřit svůj vděk lidem, kteří mi pomáhali a vedli při tvorbě dané bakalářské práce. Především chci poděkovat panu Ing. Jiřímu Skálovi, Ph.D. za možnost pracovat na takto zajímavém tématu a za jeho chytré a trefné připomínky jak k textu bakalářské práce tak i k výslednému kódu. Také chci poděkovat panu Ing. Pavlu Mautnerovi, Ph.D. který danou práci vedl a podělil se o svoje zkušenosti z oblasti zpracování vizuální informace. Při psaní textu mi byl také oporou pan Mgr. Denys Moskal, Ph.D. který mě obohatil o zajímavé myšlenky. Samozřejmě chci také poděkovat svým rodičům, bez kterých by daný text z pochopitelných důvodů vzniknout ani nemohl. Vám všem velice děkuji.

Obsah

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1 | Úvod | 3 |
| 2 | Infračervený obraz | 7 |
| 3 | NDT | 11 |
| 4 | Problém nerovnoměrné expozice | 17 |
| 5 | Kompozitní materiály, problém s mřížkou v obrazu při měření | 21 |
| 6 | Cíl práce | 23 |
| 7 | Metody kompenzace expozice | 25 |
| 7.1 | Proložení a narovnání plochy | 25 |
| 7.2 | Referenční snímek | 30 |
| 8 | Filtrace mřížky z obrazu | 35 |
| 9 | Uživatelské rozhraní | 41 |
| 9.1 | Položka "Nerovnoměrná expozice" | 42 |
| 9.2 | Položka "Mřížka v obraze" | 43 |
| 10 | Závěr | 45 |
| A | První příloha | 47 |
| B | Druhá příloha | 51 |
| B.1 | Aplikace_a_Knihovny | 51 |
| B.2 | Text_prace | 51 |
| B.3 | Vstupni_data | 51 |
| B.4 | Vysledky | 51 |
| | Bibliografie | 53 |

| | |
|-----------------------|-----------|
| Seznam obrázků | 55 |
| Seznam výpisů | 57 |

Úvod

1

Termografické měření pomocí infračervené (IR) kamery je technika, která umožňuje snímat teploty objektů a prostředí bez nutnosti fyzického kontaktu s nimi. IR kamera detekuje záření v oblasti infračerveného spektra (s vlnovou délkou mezi 760 nm až 1 mm) a převádí ho na digitální obrazová data, která zobrazují teplotní rozložení objektů v prostředí. Tento proces umožňuje rychlé a efektivní monitorování teplot a také umožňuje identifikovat teplotní odchylky.

IR kamery se používají v mnoha odvětvích, jako například ve stavebnictví, elektronice, průmyslu, energetice, medicíně a výzkumu. Pomocí termografického měření lze například detekovat tepelné ztráty budov, závady na elektronických součástkách, nebo monitorovat teploty strojů, lidí a zařízení v průmyslu.

Při termografickém měření je důležité dodržovat několik základních pravidel. IR kamera musí být kalibrována, aby poskytovala přesné výsledky. Je nutné dbát také na to, aby se v měřeném prostoru nenacházely překážky, jako jsou například zrcadla nebo skla, které by zkreslily data získaná měřením.

Termografické měření IR kamerou může být velmi užitečný nástroj pro monitorování teplot a detekci problémů v různých odvětvích. Nicméně, je třeba mít na paměti, že interpretace výsledků měření vyžaduje zkušenosti a znalosti odborníka v dané oblasti.

Defektoskopie

IR kamera se také často používá v defektoskopii, což je technika pro detekci a identifikaci vnitřních vad nebo poruch v materiálech. Při defektoskopii pomocí IR kamery se využívá různých principů založených na tepelné detekci a analýze termálního chování materiálu. [Bal+16] Některé materiály absorbují nebo odrážejí tepelné záření více jiné zase méně.

Jedním z příkladů defektoskopie pomocí IR kamery je měření tepelných ztrát v budovách a průmyslových objektech. Ztráty tepla mohou být způsobeny špatnou izolací, prasklinami v konstrukci nebo jinými vadami, které lze detekovat pomocí měření teplotních rozdílů v materiálech a konstrukcích.

Dalším příkladem je kontrola a detekce poruch v elektronických součástkách, jako jsou například spoje, čipy nebo kondenzátory. Při defektoskopii se IR kamera používá k měření teploty jednotlivých komponent a detekci anomálií v termálním chování materiálu.

IR kamera se také často využívá pro detekci poruch v průmyslových procesech, jako je například kontrolování kvality svařování nebo detekce trhlin a vad v materiálech.

Při defektoskopii pomocí IR kamer mohou nastat některé problémy, které mohou ovlivnit přesnost výsledků měření a identifikaci vad nebo poruch v materiálech. Některé z těchto problémů jsou:

1. Ovlivnění teploty okolí: Pokud je okolní teplota výrazně odlišná od teploty měřeného materiálu, může to mít vliv na přesnost měření.
2. Odrázení od povrchu: Pokud je měřený materiál lesklý nebo má zrcadlový povrch, může docházet k odrazům infračerveného záření, což způsobí chybný výsledek měření.
3. Vliv atmosférických podmínek: Některé atmosférické podmínky, jako je například mlha nebo déšť, mohou ovlivnit výsledky měření tím, že absorbují nebo odrážejí infračervené záření.
4. Kvalita kamery: Kvalita IR kamery má vliv na přesnost měření. Pokud kamera nebyla dlouho kalibrována nebo má nízké rozlišení, mohou se vyskytnout chyby při detekci vad a poruch.
5. Měřený materiál: Kvalita výsledného snímku závisí i na typu měřeného materiálu. Například při měření některých kompozitních materiálů dochází k vytvoření pravidelné mřížky ve výsledném terfografickém snímku. Taková mřížka pak ztěžuje vizuální hledání defektu.

Je důležité mít na paměti tyto potenciální problémy při defektoskopii pomocí IR kamer a provádět měření s co nejvyšší pečlivostí a přesností. Je také vhodné mít k dispozici zkušeného odborníka, který bude schopen interpretovat výsledky měření

a identifikovat případné problémy.

Tato práce se specializuje na řešení problému nerovnoměrného osvětlení měřeného materiálu a také na odstranění mřížky při termografickém měření kompozitních materiálů.

Infračervený obraz

2

Infračervený obraz (IR obraz) je obraz, který je založen na infračerveném záření a zobrazuje tepelné rozdíly mezi různými objekty v obraze. Infračervené záření je elektromagnetické záření s vlnovou délkou delší než viditelné světlo, které vysílají všechny objekty s teplotou nad absolutní nulou ($-273,15^{\circ}\text{C}$). [Wol+85]

Infračervený obraz se často používá v mnoha oblastech, jako je například zdravotnictví, průmysl, bezpečnost a armáda. V medicíně se infračervený obraz používá k diagnostice různých onemocnění, například k detekci zánětů a nádorů. V průmyslu se infračervený obraz používá k diagnostice a kontrole stavu strojů, elektroniky, budov a infrastruktury. V oblasti bezpečnosti a armády se infračervený obraz využívá k detekci nepřátelských jednotek.

Infračervený obraz se získává pomocí IR kamery neboli termografické kamery. Tepelné záření je elektromagnetické záření s vlnovou délkou v rozsahu 0,8 až 14 mikrometrů, což odpovídá oblasti IR spektra. [Wol+85]

Infračervený obraz bývá jednokanálový, většinou 16 bitový. Software, ve kterém byla psána bakalářská práce (LabIR[®]), převáděl získané teploty na teploty v datovém typu float.

IR kamery mají senzory, které měří intenzitu tepelného záření a konvertují ji na elektrický signál. Tyto signály jsou poté zpracovány pomocí sofistikovaného softwaru a převedeny na obraz, který ukazuje rozdíly v teplotě různých částí snímaného objektu. Na základě těchto rozdílů v teplotě se vytváří obrazová mapa, kde teplejší objekty jsou zpravidla zobrazeny jako světlejší barvy a chladnější objekty jsou zobrazeny jako tmavší barvy. Termografické kamery vypočítávají teplotu měřeného tělesa pomocí Planckova vyzařovacího zákona. [Pla18]

IR kamera může zachytit IR obraz i při špatných světelných podmínkách, protože zdrojem tepelného záření není viditelné světlo, ale tepelné záření objektů.

Barevná paleta

Infračervené kamery vytvářejí obraz pomocí vlnění v oblasti infračerveného spektra, což znamená, že lidské oko nemůže vidět samotný obraz. Abychom mohli vidět infračervený obraz, musí být převeden do viditelného spektra. Po převodu vzniká digitální obraz, který se skládá z pixelů. V případě termografických snímků představuje každý jednotlivý pixel určitý teplotní bod. Těmto datovým bodům je na základě jejich teploty přiřazena jedinečná barva nebo odstín. Změna tepelné energie, kterou detekuje snímač, je pak vyjádřena úpravou barvy nebo odstínu pixelu. Barvy, které budou použity v termografickém snímku se definují pomocí barevné palety. Existuje několik standardních druhů palet, které se využívají při termografickém měření.

Barevná paleta IR obrazu určuje, jakým způsobem jsou zobrazovány různé teploty. Nejběžnější palety jsou:

1. Ironbow paleta: Jedná se o paletu, která zobrazuje shodné barvy s barvami, které jsou viditelné při zahřívání kovů. Horké objekty jsou zobrazeny ve světlejších, teplých barvách, zatímco chladnější objekty v tmavých, studených barvách.



Obrázek 2.1: Ironbow paleta

2. Rainbow paleta: Paleta je podobná k Ironbow paletě. Teplé barvy představují nejteplejší části obrazu a studené barvy nejchladnější části. Tato paleta přidává několik barev navíc oproti paletě Ironbow. Hodí se k přesnému určení objektů v prostředí s minimálními tepelnými rozdíly.



Obrázek 2.2: Rainbow paleta

3. Rainbow paleta s vysokým kontrastem: Paleta přidává do obrazu více kontrastu. Díky tomu lze vidět více detailů ve srovnání s jinými paletami.



Obrázek 2.3: Rainbow paleta s vysokým kontrastem

4. Grayscale paleta: Zobrazuje teplejší objekty bílou barvou a chladnější objekty černou barvou. Palety ve stupních šedi nabízejí jednoduchost pro scény s širokým teplotním rozpětím a generují snímky s realistickými detaily.



Obrázek 2.4: Grayscale paleta

Barevný IR obraz je přehlednější a snadněji čitelný, protože barvy přímo odpovídají teplotám. Většina programů na zpracování termografických snímků nabízí uživateli možnost zvolit si vhodnou barevnou paletu, která se uživateli hodí v dané aplikaci. Například v oblíbené barevné paletě "Rainbow" jsou vysoké teploty zobrazeny červenou a žlutou barvou, zatímco nižší teploty jsou zobrazeny modrou a fialovou barvou.

Při zobrazování IR obrazu mohou být také použity různé funkce zpracování obrazu, jako je například označení nejteplejších nebo nejchladnějších oblastí v obraze, nastavení kontrastu a jasu nebo měření teploty v konkrétních oblastech.

Barevná paleta IR obrazu může být přizpůsobena potřebám uživatele a také ji lze upravit pro zobrazení určitých teplot nebo pro zvýraznění určitých oblastí. Správná volba barevné palety může pomoci uživatelům rychle identifikovat tepelné anomálie a další problémy v infračerveném obraze.

Jedná se o techniku nedestruktivního testování (Non-Destructive Testing), která dokáže odhalit vady ve snímaném objektu aniž by došlo k jeho poškození nebo zničení.

Byla vyvinuta řada metod NDT. Materiál může být testován na přítomnost defektů pomocí IR kamery, ultrazvuku, rentgenu a také jinými způsoby. [Bal+16] Zvolený druh testování může záviset na aplikaci. Před sledováním tepelné změny v měřeném materiálu je nutné daný materiál tepelně vybudit. Nejčastěji se snažíme materiál zahřát, po tepelném vybudení následně sledujeme, jak se teplo v materiálu šíří. NDT metody využívají různé zdroje buzení, postupy měření a metody vyhodnocování. Nejčastěji používanými zdroji buzení jsou zábleskové lampy, halogenové lampy a ultrazvukové budiče nebo lasery. Základními metodami buzení jsou pulzní, periodické nebo krokové (někdy nazývané "dlouhé pulzy") buzení. Postupy zpracování a vyhodnocování dat se neustále vyvíjejí a zdokonalují. Často používanými vyhodnocovacími postupy jsou vyhodnocování teplotních rozdílů, termografie hlavních komponent, derivace termografického signálu - časová derivace termografického signálu (TDTS), Fourierova transformace (pulzní fázová termografie) a lock-in termografie. [MŠM20]

Existuje několik obecných scénářů NDT měření.

- **pasivní** - měřený materiál má přirozeně jinou (vyšší nebo nižší) teplotu než okolí, například lidské tělo má oproti okolí vyšší teplotu, díky čemuž ho lze snadno detekovat IR kamerou bez dalšího podnětu
- **aktivní** - k vytvoření kontrastu na povrchu měřeného objektu je nutno využít vnější podnět, předmět obsahující vnitřní defekty nebo trhliny bude vyžadovat využití vnějšího buzení tak, aby se mezi defektem a okolím vytvořily výrazné tepelné rozdíly, které lze detekovat pomocí IR kamery

Měření dále může být statické nebo dynamické. Při statickém měření jsou kamera, měřený objekt a zdroj buzení stabilně umístěny na stejné pozici v průběhu

měření. Při dynamickém měření dochází k pohybu u jednoho ze tří výše zmíněných předmětů.

Existuje také několik možností, jak je energie přenášena na měřený objekt a jak je tento objekt následně snímán.

- **odrazem** - energie je dodávána vzorku ze stejné strany, ze které jsou data snímány kamerou
- **přenosem** - energie je dodávána na jednu stranu vzorku, zatímco kamera vzorek pozoruje z druhé strany
- **vnitřní** - energie se generuje zevnitř, zatímco kamera snímá vzorek z obou stran

Kromě toho existuje i několik možností buzení.

- **bodové** - dochází v daném okamžiku pouze k zahřátí jednoho bodu na povrchu objektu, celý povrch je pak dynamicky skenován (bod po bodu) laserem
- **linií** - na objekt se promítá svislá nebo vodorovná linie
- **povrchové** - zahřívá se celá plocha objektu najednou, například pomocí halogenových lamp

Energie může být dodána na snímáný objekt různými způsoby. Lze použít horkou či studenou tekutinu nebo i mikrovlnový ohřev. Přednost se dává zdroji tepla před zdrojem chladu, protože se snadněji kontroluje. Dále jsou uvedeny různé zdroje tepla, které lze použít.

- **optické** - fotografické blesky, halogenové lampy nebo infračervené lampy
- **mechanické** - zvukové nebo ultrazvukové excitace
- **jiné** - topné deky, horkovzdušné pistole

Zdroje energie dodávají energii s využitím různých vlnových délek.

- **modulované** - tepelné vlny modulované na dané frekvenci
- **pulzní** - krátký pulz o délce několika milisekund
- **čtvercový pulz** - dlouhý pulz trvající několik sekund nebo minut s krokovým kontinuálním ohřevem trvajícím také několik sekund

IRNDT

IRNDT (Infra-Red Non-Destructive Testing) je metoda neinvazivního testování, která využívá infračervené záření k detekci skrytých vad nebo anomálií v různých materiálech a konstrukcích. Tato metoda se často používá v průmyslové inspekci, například v letectví, výrobě automobilů, energetice, stavebnictví a dalších oblastech. [Avd+04]

Bylo navrženo několik termografických technik využívajících specifické scénáře přizpůsobené konkrétní aplikaci. Scénáře jsou uvedeny níže.

- **lock-in termografie (LT)** - periodické zahřívání se stanovenou frekvencí je využito k měření amplitudy nebo fázového posunu teplotní odezvy
- **pulse termografie (PT)** - k zahřátí objektu se využívá krátký (několik milisekund) energický puls, následně se sleduje povrchová teplota, kde vadná místa se zahřívají (ochlazují) jinou rychlostí než oblasti bez poškození
- **square pulse termografie (SPT)** - je podobná technice PT s tím rozdílem, že pulzní měření je delší (od několika sekund až po minuty)
- **step heated termografie (SHT)** - stejný princip jako u SPT, zde se pouze zkoumá fáze ohřevu
- **bodová nebo liniová termografie** - používá se bodový (laserový) nebo liniový ohřev. Lampa se pohybuje podél povrchu měřeného objektu. IR kamera pak sleduje teplotu ze stejné vzdálenosti a se stejnou frekvencí.

Proces IRNDT se obvykle provádí pomocí termografické kamery, která snímá infračervené záření vysílané objektem. Tepelné záření se konvertuje na elektrický signál, který se zpracovává a převádí na obraz, který ukazuje rozdíly v teplotě v různých částech snímaného objektu. Na základě těchto rozdílů v teplotě lze detekovat skryté anomálie, jako jsou trhliny, vadné spoje nebo závady v materiálu.

Metoda IRNDT umožňuje zkoumat materiál na přítomnost defektu aniž by se zkoumaný materiál musel poškodit. Jedná se o neinvazivní metodu, která nezpůsobuje ztrátu materiálu při testování, což je výhodou oproti destruktivním metodám testování. Tato metoda je také rychlá a efektivní, což znamená, že se často používá pro průmyslovou kontrolu kvality, údržbu a diagnostiku poruch.

Postup vyhodnocení IRNDT se může v závislosti na aplikaci měnit, ale obecně platí tyto kroky.

1. Příprava: Nejprve se musí zvolit vhodná termografická kamera s dostatečným rozlišením a citlivostí pro danou aplikaci. Testovaný materiál musí být čistý a suchý, aby neovlivňoval tepelné záření.
2. Získání IR obrazu: Kamera se umístí do vhodné vzdálenosti od testovaného materiálu a začne snímat infračervené záření emitované materiálem. Obvykle se získává sada snímků z různých úhlů a v různých podmínkách (například při různých teplotách nebo osvětlení), aby se získaly co nejpodrobnější informace o testovaném materiálu
3. Analýza obrazu: Po získání IR obrazu se použije speciální software k analýze obrazu a detekci anomálií (v dané práci se používal software LabIR[®]). Software může být naprogramován tak, aby vyhodnocoval různé parametry obrazu, jako jsou například teplotní rozdíly.
4. Interpretace výsledků: Výsledky analýzy se interpretují a vyhodnocují odborníkem na IRNDT. Mohou být nalezeny anomálie, které jsou potenciálně nebezpečné pro daný materiál, jako jsou trhliny, závady nebo nesprávné spoje.
5. Potvrzení výsledků: Výsledky IRNDT musí být potvrzeny dalšími metodami testování, aby se zjistilo, zda jsou detekované anomálie skutečné. To může zahrnovat vizuální inspekci, měření tloušťky materiálu, ultrazvukové zkoušky a další.

Odborník na IRNDT hledá v získaném snímku indikace. Indikace jsou oblasti s odlišnou teplotou od okolí, které mohou signalizovat přítomnost defektů (bublin, trhlin, špatných spojů, atd) nebo jiných problémů. Tato oblast může být viditelná ve zvolené teplotní paletě. Například paleta s teplými barvami (červená, oranžová, žlutá) zobrazí indikaci teplými barvami a okolí indikace je zobrazeno chladnými barvami.

Indikace se také mohou hledat automaticky. Některé IR kamery mají funkci automatického hledání indikací, což umožňuje kameře rozpoznat a označit oblasti s odlišnou teplotou.

Pro analýzu a interpretaci infračerveného obrazu mohou být použity teplotní statistiky. Teplotní statistiky jsou měřitelné hodnoty, které se vztahují k teplotám zachyceným infračervenou kamerou.

Některé z nejčastěji používaných teplotních statistik, které se využívají před snímáním objektu:

1. Časová konstanta: Časová konstanta určuje rychlost, s jakou se infračervená kamera přizpůsobuje změnám teploty v dané oblasti. To může být důležité při měření objektů s rychlými změnami teploty.
2. Úhel pohledu: Úhel pohledu se vztahuje k úhlu, pod kterým je infračervená kamera namířena na objekt. Tento parametr může ovlivnit přesnost teplotního měření.

Některé z nejčastěji používaných teplotních statistik, které se využívají pro vyhodnocení termografické nahrávky:

1. Minimální, maximální a průměrná teplota: Tyto hodnoty ukazují minimální, maximální a průměrnou teplotu zachycenou v dané oblasti.
2. Rozsah teplot: Rozsah teplot určuje rozdíl mezi minimální a maximální teplotou zachycenou v dané oblasti.
3. Kontrast: Kontrast se vztahuje k rozdílu mezi teplotou objektu a okolím a může pomoci rozlišit různé objekty v infračerveném obrazu.

Tyto teplotní statistiky lze využít pro analýzu a interpretaci infračerveného obrazu.

Každá z metod NDT má svoje výhody i nevýhody. Pokud se zaměříme na termografické NDT, tak jako jeho obecné výhody a nevýhody můžeme uvést následující [ITM13]

Výhody:

1. Rychlost kontroly materiálu.
2. Bezkontaktnost, bez nutnosti spojování jako v případě konvenčního ultrazvuku.
3. Bezpečnost personálu, nedochází ke škodlivému záření jako v případě rentgenové radiografie. Nicméně k zahřátí materiálu dochází vnější buzením (např. silné záblesky lampou), což vyžaduje ochranu očí. Hluk vyvolaný ultrazvukem zase vyžaduje ochranné špunty do uší.
4. Jednoduchost zpracování výsledků. Výsledky jsou relativně snadno interpretovatelné, protože jsou (často) získávány v obrazových nebo video formátech, které umožňují zpracování získaných dat.
5. Rozsáhlá škála různorodých aplikací, kde se daná metoda může uplatnit.

6. Přesnost testování pro některé specifické aplikace, kde jiné NDT metody selhávají. Například v případě otevřených mikrotrhlin v tepelně zpracovaných povlacích. Tyto materiály se obtížně kontrolují jinými NDT metodami.
7. Počet hodin nutných pro školení pracovníků, kteří budou danou metodu provádět. Oproti jiným metodám NDT, jako například NDT ultrazvukem nebo rentgenem, kde školení může zabrat až dvojnásobek času.

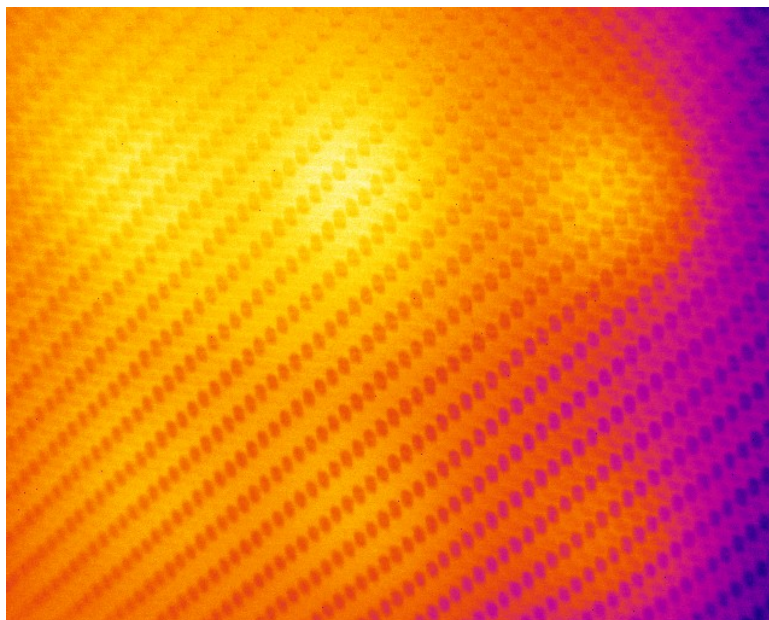
Nevýhody:

1. Je obtížné rovnoměrně zahřát materiál (zejména v případě kdy materiál chceme zahřát pulzně). Materiály mohou mít různorodé tvary, velikost a termální vlastnosti. Dosáhnout rovnoměrného zahřátí u všech materiálů je obtížné. Z tohoto důvodu byly navrženy techniky zpracování, které se snaží nerovnoměrné zahřátí eliminovat.
2. Tepelné ztráty vyvolané okolním prostředím nebo jiným vnějším zdrojem mohou vyvolat mylnou interpretaci získaných výsledků.
3. Cenová náročnost zařízení pro termografické NDT. Přestože pořizovací cena přístrojů se v závislosti na kvalitě a aplikaci liší, potřebná zařízení jsou dražší než některé jiné NDT techniky (vizuální kontrola, levnější ultrazvukové přístroje a jiné). Přesto v porovnání s cenovou náročností sofistikované techniky NDT jako je použití rentgenu, není cenová náročnost zas tak velká.
4. Detekuje pouze vady, které způsobují změny tepelných vlastností materiálu. Pokud vada neovlivňuje šíření tepla v materiálu, nelze ji detekovat pomocí dané techniky, protože teplota defektu nebude rozdílná oproti nepoškozené části materiálu.
5. Technika dokáže odhalit defekt pouze do určité hloubky. Pokud je defekt příliš hluboko a je malý, daná technika nedokáže defekt odhalit, popřípadě bude velmi slabě viditelný ve snímku, což ztíží jeho indikaci pro odborníka. Přesto je možné detekovat vady do několika centimetrů pod povrchem, pokud použijeme velmi nízké modulační frekvence.
6. Variace emisivity v materiálech. Emisivita je fyzikální veličina, která se vyjadřuje číslem mezi 0 a 1. Veličina vyjadřuje tepelné záření, které je objekt schopný vysílat. [Wol+85] Emisivita závisí na materiálu, ze kterého je objekt složen a také na povrchové úpravě daného objektu. Materiály s malou emisivitou silně odrážejí tepelné záření z okolí. Lze aplikovat nátěr na povrch měřeného materiálu, který by kompenzoval emisivitu.

Problém nerovnoměrné expozice

4

Expozicí snímku se míní množství světla dopadajícího na snímač fotoaparátu či kamery při měření. Během měření chceme mít rovnoměrnou expozici, neboli chceme, aby nám na snímač dopadalo rovnoměrné množství světla. Jedním z problémů, které mohou ovlivnit kvalitu termografického snímku, je nerovnoměrná expozice. K nerovnoměrné expozici dochází, když kamera zachytí různé množství infračerveného záření z různých částí objektu. V důsledku toho se některé oblasti snímku jeví světlejší nebo tmavší než jiné, to způsobuje nepřesné údaje o teplotě na měřeném objektu. Příklad nerovnoměrné expozice je vidět na obrázku 4.1, kde pravá část snímku má výrazně chladnější barvy oproti zbytku snímku.



Obrázek 4.1: Příklad nerovnoměrné expozice

Nerovnoměrná expozice snímku může záviset na více faktorech. Jednou z častých příčin, kvůli které dochází k nerovnoměrné expozici, je nesprávné umístění zdroje buzení. Pokud zdroj buzení uchytíme pod úhlem vzhledem ke snímanému objektu, dojde k nerovnoměrnému vybuzení tepla ve snímaném objektu. Pokud je navíc v prostoru ve kterém dochází ke snímání příliš intenzivní zdroj světla, nebo zdroj světla je umístěn poblíž snímaného objektu, popřípadě na snímaný objekt dopadají paprsky slunce, dojde také k nerovnoměrné expozici vyvolané vnějším zdrojem tepla. V tomto případě lze říci, že místnost ve které docházelo k měření, nebyla vhodně připravena k měření.

Další příčinou nerovnoměrné expozice je nesprávné nastavení IR kamery z jejíž pomocí měříme objekt. Před měřením je nutné správně nastavit parametry IR kamery, jako je například emisivita nebo citlivost. Při nesprávném nastavení parametrů kamery dochází také k nerovnoměrné expozici snímku. Pokud je například nastavení emisivity příliš nízké, IR kamera nemusí být schopna zachytit dostatečné množství infračerveného záření, což vede k malé expozici ve výsledném snímku. Pokud je naopak nastavení citlivosti vysoké, IR kamera může zachytit velké množství záření, což ve výsledku vytvoří přesvícený snímek.

Nerovnoměrnou expozici mohou způsobit také technické problémy IR kamery. Může dojít k tomu, že IR kamera má vadný snímač nebo její objektiv je poškozen a nedokáže zachytit infračervené záření rovnoměrně, což vede k nerovnoměrné expozici výsledného snímku.

Výsledek termografického snímání také ovlivňuje teplota pozadí. Okolní teplota nemusí být stabilní nebo se poblíž snímaného objektu může nacházet jiný zdroj tepla, což ovlivní teplotu snímaného objektu a výslednou expozici na snímku. Pokud například před snímáním uhlíkové desky, jsme danou desku drželi v rukou, ve výsledném snímku budou viditelné tepelné skvrny, které byly vytvořeny naší interakcí se snímaným materiálem před měřením. K podobnému efektu může dojít i vnějším vlivem z okolí.

Při IRNDT měříme různorodé materiály, které mají jak rozdílný tvar tak i rozdílné termální vlastnosti, jako je například emisivita. Rozdílná emisivita snímaného materiálu způsobuje, že část materiálu vysílá větší množství infračerveného záření oproti své zbylé části. Díky tomu na IR kameru dopadá rozdílné množství záření, což ve výsledku způsobuje nerovnoměrnou expozici. Při provádění IRNDT zahříváme materiál vnějším buzením (například pulzem z lampy). Snímaný materiál nemusí být plochý, může být částmi zaoblený, vypuklý nebo jinak tvarovaný. Pokud je materiál navíc i lesklý, poté také dochází k nerovnoměrné expozici ve výsledném snímku.

V souhrnu k nerovnoměrné expozici dochází pokud poškozen snímač kamery, je nesprávně nastavena kamera, zdroj buzení je pod úhlem, působením vnějšími zdroji tepla v okolí, interakcí se snímaným objektem před měřením nebo máme lesklý materiál s rozdílnou emisivitou či složitým tvarem.

Pokud chceme nerovnoměrné expozici předcházet, musíme nejdříve určit hlavní příčinu jejího vzniku. Nejdříve můžeme zkontrolovat světelné podmínky. Pokud je v místnosti příliš světla nebo naopak jeho nedostatek, bude nutné upravit světelné zdroje. Objekt by měl být nasvícen rovnoměrně ze všech úhlů, ve kterých dochází ke snímání IR kamerou. Viditelné stíny nebo odrazy na snímaném objektu je nutné eliminovat. Před prováděním IRNDT vnějším buzením se nejdříve ujistíme, že budící lampa je zaměřena na objekt kolmo. Pokud by byla budící lampa na objekt namířena pod úhlem, jedna část snímku by byla přesvícena a druhá naopak příliš temná.

Před snímáním IR kamerou je nutné také zkontrolovat nastavení takových parametrů jako například emisivita a citlivost kamery. Nastavení těchto parametrů lze provést podle pokynů výrobce kamery nebo podle typu snímaného materiálu.

Při měření lze využít referenční zdroj tepla, který potlačí změny okolního tepla. Výsledný snímek lze také upravit různými algoritmy. Můžeme například využít vzorový snímek, u kterého jsme si jisti, že má rovnoměrnou expozici a jeho teploty jsou věrohodné. Pokud podobný snímek vlastníme nebo jsme schopni ho vytvořit, poté lze využít techniky odečtení dvou snímků od sebe. Odečteme vzorový snímek od snímku s nerovnoměrnou expozicí. Ve výsledném snímku poté dojde ke kompenzaci jasů a také ke zvýraznění defektů.

Odlíšnou technikou, jak odstranit nerovnoměrnou expozici, je odečtení dvou snímků od sebe. Můžeme odečíst předchozí snímek od snímku aktuálního, popřípadě můžeme odečíst libovolný jiný snímek od aktuálního snímku ze sekvence, která vznikla při měření objektu. Při takovém odečtení se zvýrazní indikace a potlačí nerovnoměrná expozice. Lze také využít jiný operátor namísto odečítání. Snímky můžeme podělit, v tomto případě získáváme desetinné hodnoty, které pak musíme převést na hodnoty celočíselné.

Kompozitní materiály, problém s mřížkou v obrazu při měření

5

Kompozitní materiál lze definovat jako kombinaci dvou nebo více materiálů, která vede k lepším vlastnostem, než jaké mají jednotlivé složky použité samostatně. Na rozdíl od kovových slitin si každý materiál zachovává své samostatné chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti. Dvěma složkami jsou výztuž a matrice. Hlavními výhodami kompozitních materiálů jsou jejich vysoká pevnost a tuhost v kombinaci s nízkou hustotou ve srovnání se sypkými materiály, což umožňuje snížit hmotnost hotového dílu. Pevnost a tuhost zajišťuje výztužná fáze. Ve většině případů je výztuž tvrdší, pevnější a tužší než matrice. Výztuž je obvykle tvořena vlákny nebo částicemi. [Cam10]

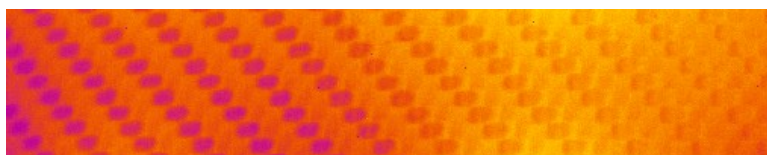
Kompozitní materiály se díky svým vlastnostem využívají v mnoha odvětvích jako například v letectví, automobilovém průmyslu, stavebnictví. Interakcí s prostředím a postupným opotřebením kompozitního materiálu dochází ke vzniku defektů a poškození, které ovlivňují mechanické vlastnosti a celistvost kompozitního materiálu. Nedestruktivní testování a jeho následné vyhodnocení zachovává celistvost kompozitního materiálu a nezpůsobuje jeho další narušení. Testování také provádíme, abychom se ujistili, že nově vytvořený materiál je bez výrobní vady.

IRNDT měření kompozitního materiálu probíhá následujícím způsobem. Připravíme místnost ve které budeme měřit kompozitní materiál, místnost by měla být rovnoměrně osvětlena, se stabilní teplotou a bez vnějších teplotních zdrojů. Materiál upevníme tak, aby jeho pozice byla v průběhu měření stabilní. Pokud provádíme aktivní IRNDT měření pak připravíme vnější zdroj buzení. Při použití budící lampy zkontrolujeme, zda lampa není při snímání pod úhlem. Upravíme parametry IR kamery, nastavíme správnou emisivitu a citlivost. Kameru umístíme k měřenému objektu do dostatečné vzdálenosti, tak aby ve výsledném snímku byl měřený objekt viditelný. Odstraníme překážky mezi měřeným objektem a kamerou, následně za-

čneme měřit.

Když je kompozitní materiál vystaven vnějšímu zdroji tepla, například tepelné lampě nebo blesku, absorbuje a odráží teplo různě v závislosti na svém složení, struktuře a vadách. Výsledné rozložení teploty na povrchu materiálu může být zachyceno infračervenou kamerou a zobrazeno jako digitální obraz s teplotními daty, který může odhalit vzory nebo anomálie, které ukazují na vady, jako jsou dutiny nebo trhliny, a také například na odchylky v orientaci vláken.

Vzhledem k tomu, že kompozitní materiál je složen z více substancí, při termografickém měření mohou být viditelné ve výsledném snímku vzory. Tyto vzory jsou způsobeny strukturou kompozitního materiálu, která ovlivňuje proces zahřívání a ochlazování. Orientace vláken v kompozitních materiálech ovlivňuje výslednou vodivost a způsobuje rozdílné rozložení teplot. Na snímku je pak vidět vzor orientace vláken. Vzory mohou být využity při zkoumání správnosti orientace vláken, pokud ale hledáme indikace a defekty v materiálu, podobné vzory ztěžují jejich hledání. Příklad mřížky, která vznikla při měření, je vidět na obrázku 5.1. Obrázek 5.1 obsahuje pravidelné, oblé fleky, ty představují mřížku.



Obrázek 5.1: Pravidelná mřížka v termografickém snímku

Existuje několik technik, které mohou pomoci odstranit opakující se vzory ve snímku. Lze například využít prostorového filtrování. Prostorové filtrování odstraní vysokofrekvenční šum v obraze při zachování nízkofrekvenčních složek. Toho lze docílit použitím mediánového, Wienerova nebo Gaussova filtru. [Bha+77] Použitím těchto filtrů lze zlepšit výsledný snímek a redukovat vzniklé vzory.

Jinou technikou je Fourierova analýza. Jedná se o matematickou techniku, která dokáže identifikovat a odstranit periodické vzory v obraze. Obraz je rozložen na řadu sinusových a kosinusových funkcí s různou frekvencí. Po převedení obrazu do frekvenčního spektra lze odfiltrovat frekvence spojené s opakujícím se vzorem. Vzor je ve frekvenčním spektru krásně vidět, jeho frekvence jsou totiž vyšší, jelikož je vzor ve snímku periodický. [Bha+77]

Snímky lze také pořídít z více úhlů. Analýzou rozdílů mezi snímky je možné odstranit opakující se vzory nebo mřížky způsobené strukturou složeného materiálu.

Cíl práce

6

Techniky, které byly v rámci bakalářské práce implementovány, jsou běžně využívány při zpracování klasických snímků. Klasické digitální snímky pracují s daty, které jsou v rozpětí od 0 do 255. Úpravu známých technik je především nutné provést proto, že termografické snímky obsahují data, která nemusí být v rozpětí od 0 do 255. Termografická data mohou mít kladné i záporné hodnoty. Materiál se při měření může zahřát do teplot, které přesahují hodnotu 255. Data nelze jednoduše přemapovat na hodnoty od 0 do 255, protože bychom ztratili přesnost měření. Teplotní obraz také obsahuje desetinná čísla. Před aplikací těchto technik je proto nutné provést jejich úpravu, po které je lze aplikovat na termografické snímky.

LabIR[®]

Termografická data získaná při měření můžeme zpracovávat ve speciálním softwaru, který je na daný typ úlohy přímo určen. Příkladem takového softwaru je program LabIR[®]. Tento software umožňuje načíst nahrávku s termografickými daty nebo načíst jeden termografický snímek. Načtenou nahrávku dále můžeme analyzovat. K programu lze také připojit vybrané typy kamer a získaná data v přímém přenosu zobrazovat v tomto softwaru. Program umožňuje data zpracovat. Například lze použít Fourierovu transformaci pro zvýraznění indikací nebo aplikovat několik typů filtrů, které jsou v programu implementovány.

V bakalářské práci nebyly implementovány algoritmy pro načítání termografických dat a jejich následné zobrazení. Tyto funkce již software LabIR[®] nabízel. Bakalářská práce software LabIR[®] rozšířila o funkce, které vyrovnávají nerovnoměrnou expozici a odstraňují mřížku v termografickém obraze. Díky tomu se na upraveném termografickém snímku lépe hledají indikace. Software LabIR[®] byl proto rozšířen o dva nové filtry a jeden již existující filtr byl modifikován.

Pro aplikaci těchto filtrů je nutné nejdříve otevřít termografickou nahrávku nebo

termografický snímek. Po načtení termografický dat, lze v záložce "Měření" vybrat položku "Upravit filtry...". Zobrazí se okno s dostupnými filtry, které software LabIR[®] nabízí. Soupis filtrů obsahuje dvě položky, které byly do softwaru v rámci bakalářské práce přidány. Jedná se o položky "Nerovnoměrná expozice" a "Mřížka v obraze".

Nově vznikla také uživatelská rozhraní, která dovolují upravit činnost vytvořených filtrů. Uživatelská rozhraní byla do softwaru LabIR[®] zakomponována tak, aby nenarušovala celistvost a funkčnost již existujících nástrojů softwaru LabIR[®].

Software LabIR[®] nabízí možnost vrstvit filtry. Uživatel může použít více filtrů na jeden snímek. Filtry se následně hromadí po vrstvách. Filtr, který je na nejvyšší vrstvě, pracuje s daty, které byly modifikovány předchozími filtry.

Metody kompenzace expozice

7

Byly implementovány dvě metody pro kompenzaci nerovnoměrné expozice. První metoda prokládá termografickými daty plochu, kterou následně vyrovnává. Druhá metoda využívá referenční snímek, jehož termografická data jsou využita pro úpravu termografických dat stávajícího snímku.

7.1 Proložení a narovnání plochy

Filtr pro kompenzaci nerovnoměrné expozice, který byl přidán do softwaru LabIR[®], prokládá termografickými daty plochu. Bod termografického snímku si můžeme představit v 3D prostoru. Jeho souřadnice x , y představují umístění pixelu na řádku a sloupci snímku. Souřadnice z je pak jeho teplotní hodnota. Po vytvoření plochy, která je proložena termografickými daty, se snažíme plochu narovnat. Narovnáváním vytvořené plochy zároveň vyrovnáváme naměřené teplotní hodnoty. Dochází ke změně původních teplotních dat, což může být problém, pokud potřebujeme zachovat přesnost fyzikálního měření. Pro účel zlepšení vyhledávání indikací nám ale globální změna teplotních dat nevádí. Typ plochy, kterou budou data proložena, si uživatel může samostatně zvolit v uživatelském rozhraní daného filtru. Dostupné pro výběr jsou plochy s těmito předpisy:

- **poly11** - je polynom prvního stupně v proměnných x a y , jedná se tedy o lineární polynom. Obsahuje tři koeficienty, které jsou označeny jako $p00$, $p10$ a $p01$.

$$sf(x, y) = p00 + p10 \cdot x + p01 \cdot y$$

Koeficient $p00$ je tzv. konstantní člen, který určuje posun polynomu v ose z . Koeficienty $p10$ a $p01$ určují směr vodorovného a svislého sklonu plochy.

- **poly12** - je polynom druhého stupně v proměnné x a prvního stupně v proměnné y , jedná se tedy o kvadraticko-lineární polynom. Obsahuje pět koeficientů, které jsou označeny jako $p00$, $p10$, $p01$, $p11$ a $p02$.

$$sf(x, y) = p00 + p10 \cdot x + p01 \cdot y + p11 \cdot x \cdot y + p02 \cdot y^2$$

Koeficient $p00$ je tzv. konstantní člen, který určuje posun polynomu v ose z . Koeficienty $p10$ a $p01$ určují směr vodorovného a svislého sklonu plochy. Koeficient $p11$ určuje, jakým způsobem se polynom mění v závislosti na obou proměnných x a y . Koeficient $p02$ určuje zakřivení plochy v ose y .

- **poly21** - jedná se o shodný polynom jako polynom s označením poly12, zde dochází k zakřivení v ose x

$$sf(x, y) = p00 + p10 \cdot x + p01 \cdot y + p11 \cdot x \cdot y + p20 \cdot x^2$$

- **poly22** - je polynom druhého stupně v proměnných x a y , tedy kvadratický polynom. Obsahuje šest koeficientů, které jsou označeny jako $p00$, $p10$, $p01$, $p11$, $p20$ a $p02$.

$$sf(x, y) = p00 + p10 \cdot x + p01 \cdot y + p11 \cdot x \cdot y + p20 \cdot x^2 + p02 \cdot y^2$$

Koeficient $p00$ je tzv. konstantní člen, který určuje posun polynomu v ose z . Koeficienty $p10$ a $p01$ určují směr vodorovného a svislého sklonu plochy. Koeficient $p11$ určuje, zda je plocha konvexní nebo konkávní vzhledem k bodu se souřadnicemi (x, y) . Koeficienty $p20$ a $p02$ určují zakřivení plochy v ose x a y .

Koeficienty polynomu jsou dopočítány metodou nejmenších čtverců. [Chr] K výpočtu se využila knihovná funkce z knihovny MathNet Numerics. Jedná se o open-source knihovnu pro matematické výpočty v .NET platformě. Knihovna je volně dostupná pod open-source licencí MIT a může být použita pro komerční i nekomerční účely.

Metoda `MathNet.Numerics.LinearRegression.MultipleRegression.DirectMethod` z knihovny `MathNet.numerics` slouží k provedení lineární regrese s více než jednou nezávislou proměnnou pomocí tzv. přímé metody (`direct method`).

Metoda má následující vstupní parametry:

- **xy** - dvourozměrné pole s hodnotami nezávislých proměnných (x) a jejich odpovídajícími závislými proměnnými (y).

- **z** - jednorozměrné pole s hodnotami druhých nezávislých proměnných (z). Každý prvek pole odpovídá hodnotě z druhé nezávislé proměnné pro stejné pozorování jako v poli xy. Pokud regrese obsahuje pouze dvě nezávislé proměnné, z je prázdné pole.
- **true** - boolovská hodnota určující, zda funkce má přidat sloupec jedniček do matice xy. Tento sloupec představuje tzv. konstantní výraz a slouží k modelování průměrné hodnoty závislé proměnné pro všechny hodnoty nezávislých proměnných, které nejsou v modelu uvedeny. Pokud je tento argument nastaven na true, funkce přidá sloupec jedniček na začátek matice xy.

Zdrojový kód 7.1: Použitá metoda "DirectMethod"

```
1 MathNet.Numerics.LinearRegression.MultipleRegression.  
   DirectMethod(xy, z, true);
```

Funkce `MathNet.Numerics.Fit.LinearMultiDim` z knihovny `MathNet numerics` slouží k přizpůsobení lineárního modelu více-dimenzionálním datům. Konkrétně se jedná o přizpůsobení polynomu daného stupně.

Metoda má následující vstupní parametry:

- **xy** - dvourozměrné pole s hodnotami nezávislých proměnných (x) a jejich odpovídajícími závislými proměnnými (y).
- **z** - jednorozměrné pole s hodnotami druhých nezávislých proměnných (z). Každý prvek pole odpovídá hodnotě z druhé nezávislé proměnné pro stejné pozorování jako v matici xy. Pokud regrese obsahuje pouze dvě nezávislé proměnné, z je prázdné pole.
- **true** - pole polynomů, které mají být použity v modelu. V tomto konkrétním případě se jedná o pole polynomů druhého stupně (tj. kvadratických polynomů) pro každou nezávislou proměnnou v modelu.

Zdrojový kód 7.2: Použitá metoda "LinearMultiDim"

```
1 List<Func<double[], double>> poly21 = CreatePoly21Function();  
2 MathNet.Numerics.Fit.LinearMultiDim(xy, z, poly21.ToArray());
```

V samotném kódu je pak zkontrolováno, který polynom uživatel chce použít. Na základě zvoleného polynomu se vybere odpovídající metoda z knihovny `MathNet Numerics`. Pokud se volá metoda "LinearMultiDim", před jejím voláním je vytvořen odpovídající polynom. Příklad tvorby polynomu "poly12" je uveden v 7.3.

Zdrojový kód 7.3: Tvorba polynomu "poly12"

```

1 BEGIN
2 FUNCTION CreatePoly12Function()

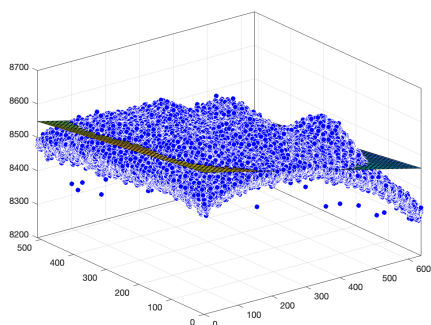
4 poly12Surface = List of functions

6 // result function will be: p00 + p10*x + p01*y + p11*x*y +
  p02*y^2
7 // d[1] is x value, d[0] is y value
8 poly12Surface.Add(function (d) { return 1; }) // p00
9 poly12Surface.Add(function (d) { return d[1]; }) // p10*x
10 poly12Surface.Add(function (d) { return d[0]; }) // p01*y
11 poly12Surface.Add(function (d) { return d[0] * d[1]; })
12 poly12Surface.Add(function (d) { return d[0] * d[0]; })

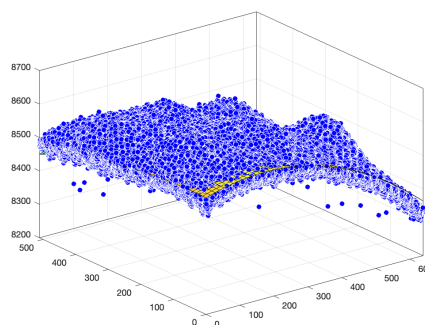
14 RETURN poly12Surface
15 END

```

Vzhledem k geometrickému uspořádání dat si uživatel zvolí vhodný polynom, který se nejlépe proloží termografickými daty. Na snímku 7.1 a 7.2 můžeme vidět, jak se termografickými daty prokládá plocha. Plocha typu poly22 lépe aproximuje termografická data, což je vidět při porovnání obrázků 7.1 a 7.2. Při použití polynomu poly22 bude mít výsledný snímek po aplikaci filtru lépe kompenzovanou expozice v porovnání s aplikací polynomu poly11.



Obrázek 7.1: Rovina poly11

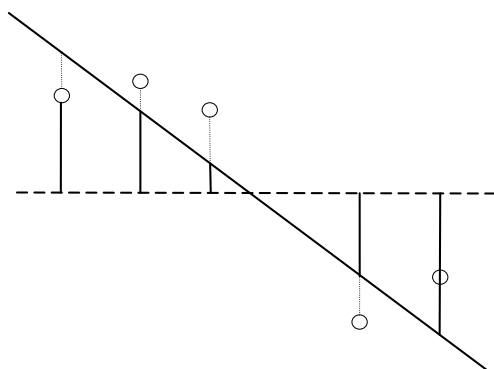


Obrázek 7.2: Rovina poly22

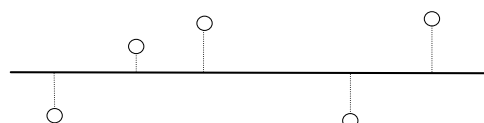
Při tvorbě plochy se do výpočtu zahrnují pouze data, která uživatel nezakreslil štětcem v GUI filtru. Data, která se zakreslila, nebudou zahrnuta do výsledného pole dat, které se použije pro výpočet koeficientů plochy. Určení, která data zahrnout a která vynechat, se provádí na základě bitmapy. Program si uchovává dvě bitmapy. Jedna bitmapa představuje původní data termografického snímku bez jakékoliv úpravy. Druhá bitmapa představuje termografický snímek, na kterém již byly provedeny úpravy. Pod slovem úprava se míní, že uživatel na termografický snímek

přidal obrazce. Před výpočtem koeficientů plochy, se dvě bitmapy porovnají. Pokud se originální bitmapa liší od bitmapy aktuální, znamená to, že uživatel bitmapu změnil, neboli přidal na ní v daném místě obrazec. Bod, nad kterým je umístěn obrazec, nebude do výpočtu zahrnut. Teoreticky je možné, že uživatel zvolí přesně tu barvu štětce, která je shodná s RGB hodnotou bodu v termografickém snímku. V takovém případě bude bod zahrnut do výpočtu, přestože ho uživatel zakreslil. Situace ale není příliš pravděpodobná, protože nedává smysl zakreslovat body stejnou barvou jakou již mají.

Po vytvoření plochy se na ploše určí střed a vypočte jeho funkční hodnota. Ta se následně využije ke kompenzaci nerovnoměrné expozice. Kompenzaci bodu se souřadnicemi (x, y) provedeme tak, že k intenzitě bodu v termografickém snímku přičteme rozdíl funkčních hodnot středu proložené plochy a funkčních hodnot plochy v bodě (x, y) . Proces je znázorněn na obrázcích 7.3 a 7.4.



Obrázek 7.3: Před



Obrázek 7.4: Po

Mějme ku příkladu bod se souřadnicemi $(1, 1)$. Nejdříve určíme funkční hodnotu tohoto bodu na vytvořené ploše, která aproximuje naměřená data. Vypočítanou funkční hodnotu pak odečteme od funkční hodnoty, která se nachází ve středu plochy. Získaný rozdíl pak následně přičteme k teplotní hodnotě bodu se souřadnicemi $(1, 1)$. Teplotní hodnota v daném bodě se buď zvýší, pokud byla funkční hodnota na ploše menší než funkční hodnota středu plochy, nebo naopak sníží, pokud byla funkční hodnota na ploše vyšší než funkční hodnota středu plochy. Bodům, které mají větší odchylku funkční hodnoty na ploše od střední hodnoty plochy, budou přičteny větší teplotní hodnoty. Platí to i obráceně. Příklad metody, která by spočetla

funkční hodnotu pro plochu typu "poly11", je uveden v 7.4. Na základě předaných souřadnic a koeficientů, se vrátí spočtená funkční hodnota. Koeficienty závisí na ploše, která byla uživatelem vybrána. Souřadnice x a y jsou souřadnice termografického bodu, jehož funkční hodnotu chceme spočítat na ploše, která aproximuje termografická data.

Zdrojový kód 7.4: Výpočet funkční hodnoty pro poly11

```
1 private double computePlaneValue(int x, int y, double []
    coefficients)
2 {
3
4     return coefficients[0] + x * coefficients[2] + y *
    coefficients[1];
5 }
```

Kompenzace nerovnoměrné expozice se následně provádí tak, jak je uvedeno v 7.5. Nejdříve se vypočte funkční hodnota bodu na ploše. Následně se provede výpočet hodnoty, která bude kompenzovat nerovnoměrnou expozici. Výsledek je uložen do pole termografických hodnot, jehož hodnoty budou zobrazeny v hlavním okně aplikace i v GUI filtru.

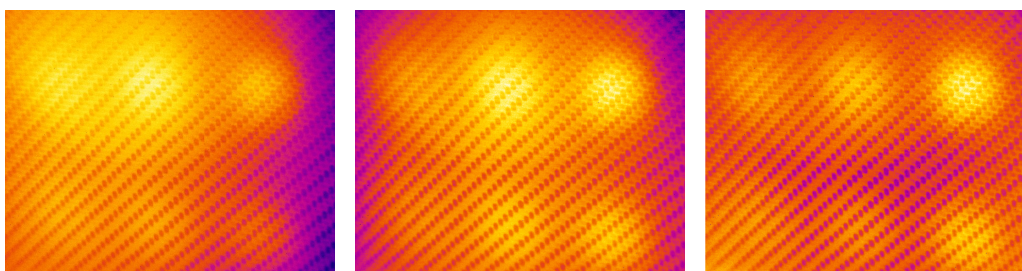
Zdrojový kód 7.5: Kompenzace nerovnoměrné expozice

```
1 BEGIN
2
3 FOR row = 0 to Height-1 DO
4 FOR column = 0 to Width-1 DO
5
6 valueOnPlane = computePlaneValue(column, row, coefficients)
7 data[row][column] = data[row][column] +
8     (middlePlaneTemp - valueOnPlane)
9 ENDFOR
10 ENDFOR
11
12 END
```

Výsledky aplikace filtru jsou viditelné na obrázcích 7.6 a 7.7. Byly použity stejná data a plochy jako na 7.1 a 7.2. Při použití plochy poly11 se nerovnoměrnosti expozice rozprostřely po krajích. Body na pravém okraji snímku byly vyvýšeny, kdežto body v levé části snímku se snížily. Při použití plochy poly22, která lépe aproximovala termografická data, se nerovnoměrná expozice rozprostřela po celém snímku.

7.2 Referenční snímek

Nerovnoměrnou expozici lze také kompenzovat použitím referenčního snímku. Do programu LabIR[®] nebyl přidán nový filtr, pro použití referenčního snímku, tento



Obrázek 7.5: Originál Obrázek 7.6: Filtr poly11 Obrázek 7.7: Filtr poly22

filtr již v programu existoval. Existující filtr se v rámci bakalářské práce rozšířil tak, aby bylo možné využít i referenční snímek z externí termografické nahrávky a také aby bylo možné snímky nejenom odečítat ale i dělit.

Program LabIR[®] nabízel filtr s názvem "referenční snímek". Tento filtr v původní implementaci nastavil jeden snímek z otevřené termografické nahrávky jako referenční, od všech ostatních se pak odečítá. Tento přístup ale nedovoloval kompenzovat nerovnoměrnou expozici za pomoci jiné termografické nahrávky. GUI existujícího filtru se rozšířilo o sekci "Ref. snímek z jiné nahrávky", jak je vidět na obrázku 7.8.

Uživatel může zvolit nahrávku, ze které se použije referenční snímek. Existuje několik možností, jak snímky od sebe odečítat nebo dělit. Aktuální snímek z nahrávky, který je otevřen v hlavním okně aplikace, má své pořadové číslo vzhledem k nahrávce. Pokud je například otevřen snímek s pořadovým číslem 10, pak při volbě "Použít snímky 1:1" bude od aktuálního snímku odečten snímek se stejným pořadovým číslem z nahrávky externí (neboli bude použit také desátý snímek z externí nahrávky). Externí nahrávka může mít snímků více či méně než aktuálně otevřená nahrávka. Pokud má nahrávka, která je otevřená v hlavním okně, více snímků než nahrávka externí, při překročení meze se z externí nahrávky použije poslední snímek. Kromě možnosti "Použít snímky 1:1" může uživatel nastavit referenční snímek ručně. Pokud při ručním nastavování referenčního snímku uživatel překročí meze, z externí nahrávky se použije poslední dostupný snímek. Použit záporné číslo referenčního snímku není povoleno.

Při odečítání dvou snímků je ve výsledném snímku vidět změna teplotních hodnot. Pokud máme nahrávku s materiálem, který je bez defektu, lze tuto nahrávku použít jako referenční nahrávku. Při zvolení volby "Použít snímky 1:1" pak vidíme rozdíl šíření tepla v materiálu bez defektu oproti šíření tepla v materiálu s defektem. Na výsledném snímku po odečtení budou viditelné rozdíly, neboli defekty, bez nerovnoměrné expozice. V praxi není možné vždy zajistit původní materiál bez defektu, jehož nahrávka by se použila jako referenční.

Ref. snímek z jiné nahrávky:

...

Použít snímky 1:1 Nastavit číslo snímku

0

Použít

rozdíl snímků podíl snímků

Ref. snímek z aktuální nahrávky:

Nastavit snímek

Reset snímku

Jako referenční používat předchozí snímek

Obrázek 7.8: GUI filtru pro použití referenčního snímku

Ukázkový pseudokód, který provádí odečtení dvou snímků při použití metody "1:1" je zobrazena v 7.6. Nejdříve se nastaví odpovídající snímek v externí nahrávce, dále se bod po bodu provádí operace dělení či odečítání. Pokud snímky odečítáme, metoda "ExecuteOperation(...)" odečte od teplotní hodnoty bodu z aktuálního snímku teplotní hodnotu bodu ze snímku externího. Výsledek se uloží do pole hodnot, jehož data se zobrazí jak v okně aplikace tak v GUI filtru.

Zdrojový kód 7.6: Rozdíl či podíl dvou snímků

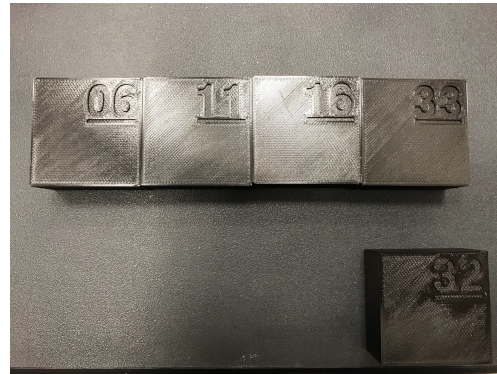
```
1 BEGIN
3 externalSequence.SetFrameIndex(currentSequence.FrameIndex)
5 FOR row = 0 to Height DO
6 FOR column = 0 to Width DO
8 currentTemp = FrameData[row][column]
9 externalTemp = ExternalData[row][column]
10 updatedTemp = ExecuteOperation(currentTemp, externalTemp)
11 FrameData[row][column] = updatedTemp
13 END FOR
14 END FOR
16 END
```

Před použitím daného filtru je nutné pořádit dvě nahrávky. První nahrávka představuje termografické měření materiálu s defektem. Druhá nahrávka představuje termografické měření totožného materiálu bez defektu. Průběh měření ilustruje

obrázek 7.9. Nastaví se IR kamera a připraví se zdroj buzení. Následně je umístěn na podložku snímáný materiál. Materiály, které byly snímány, jsou zobrazeny na obrázku 7.10. Jedná se o plastové krychle, které pod povrchem obsahují různě velké defekty.

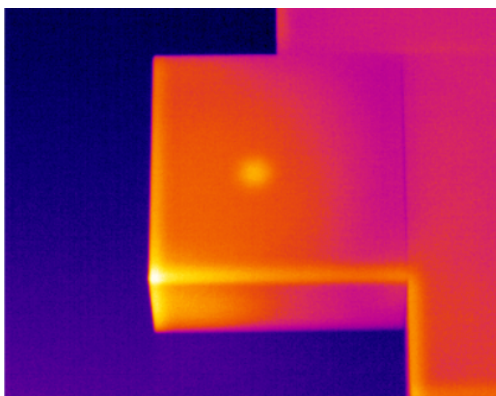


Obrázek 7.9: Průběh měření

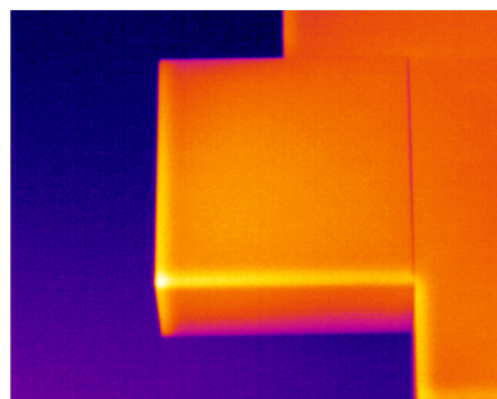


Obrázek 7.10: Měřené objekty

Výsledek použití filtru je zobrazen na obrázcích 7.13 a 7.14. Není jednoduché pořádit dvě totožné termografické nahrávky. Obrázek 7.13 vznikl po odečtení dvou snímků. Vzniklý snímek zvýrazňuje defekt uprostřed snímaného objektu a odstraňuje nerovnoměrnou expozici, po krajích snímku ale také vynikly teplotní rozdíly, které nepředstavují defekt. Tyto nadbytečné teplotní rozdíly vznikly tím, že původní materiál byl před snímáním krátce držen v rukou a tím se zahřál. Dalším problémem je totožně umístit materiál bez defektu na místo, kde byl materiál s defektem. Ideálním výsledkem by byl snímek, který by zobrazil pouze defekt. Docílit takového výsledku ale není jednoduché.

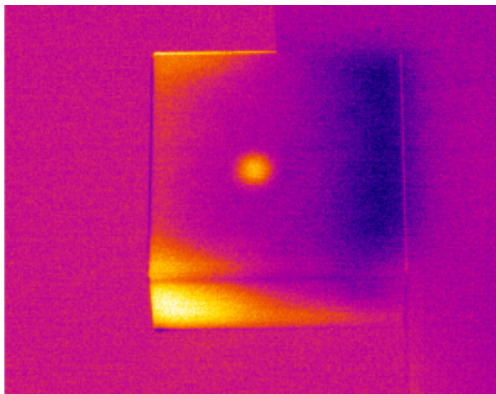


Obrázek 7.11: Původní snímek

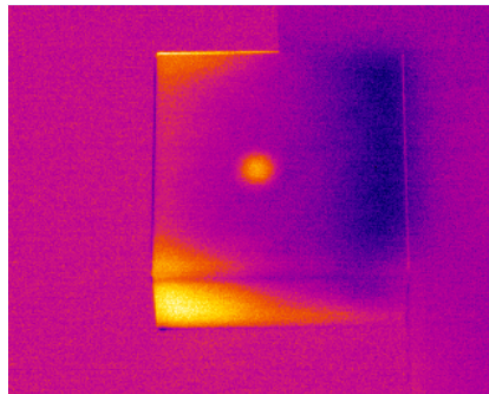


Obrázek 7.12: Tímto snímkem se odečítalo/dělilo

Obrázek 7.14 vznikl vydělením dvou snímků. Mezi obrázky 7.13 a 7.14 je minimální rozdíl. Stejně jako při odečítání, i zde hraje velkou roli to, jak přesně byly snímky porovnány.



Obrázek 7.13: Výsledný snímek po odečtení



Obrázek 7.14: Výsledný snímek po vydělení

Filtrace mřížky z obrazu

8

Pro filtraci mřížky v termografickém obrazu se využívá Fourierova transformace. Při transformaci se termografická data převádí do oblasti frekvenční domény. Tímto způsobem může být získána informace o periodických oscilacích, které by jinak mohly být skryty v nepravidelných teplotních datech. Pokud má termografický snímek pravidelný vzor, pak v oblasti frekvenční domény tento vzor vynikne.

Fourierova transformace rozloží signál či obraz na jednotlivé sinusové a kosinusové vlny. Tímto způsobem je možné získat informace o amplitudě a fázi jednotlivých frekvencí, které se nacházejí v signálu/obrazu.

Fourierova transformace se provádí pomocí integrálních vzorců, kde se vstupní signál či obraz převede na frekvenční obrazový prostor (nebo prostor frekvenčních koeficientů). Pro diskrétní signály a obrazy se používá diskrétní Fourierova transformace, která se provádí pomocí diskrétních vzorců a algoritmů, jako například algoritmus Fast Fourier Transform (FFT). [BS94]

Inverzní Fourierova transformace poté umožňuje převést snímek z frekvenčního prostoru zpět na termografický snímek. Tím je umožněno zpětné získání původního snímku, který již bude bez frekvencí, které uživatel odstraní. Pokud má termografický snímek opakující se vzor, pak v oblasti frekvenční domény tento vzor vynikne vysokou amplitudou, kterou lze jednoduše označit. Převodem zpět se frekvence s označenou amplitudou ignorují a výsledný termografický snímek bude bez frekvencí, které představovaly pravidelný vzor v obraze.

Vzorec pro výpočet Fourierovy transformace:

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-2\pi i (ux + vy)} dx dy$$

kde $f(x, y)$ je intenzita signálu/obrazu v bodě (x, y) , $F(u, v)$ je frekvenční koeficient pro danou frekvenci (u, v) a $e^{-2\pi i (ux + vy)}$ je komplexní exponenciála.

Vzorec pro inverzní Fourierovu transformaci:

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) e^{2\pi i(ux+vy)} du dv$$

kde $F(u, v)$ jsou frekvenční koeficienty pro danou frekvenci (u, v) , $f(x, y)$ je intenzita signálu/obrazu v bodě (x, y) a $e^{2\pi i(ux+vy)}$ je opět komplexní exponenciála.

Při zpracování termografických snímků pracujeme s diskrétními hodnotami. Pro výpočet Fourierovy transformace pak využíváme vzorce v diskrétním tvaru.

Vzorec pro diskrétní Fourierovu transformaci:

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-2\pi i(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})}$$

kde N je velikost signálu/obrazu a $f(x, y)$ je intenzita signálu/obrazu v bodě (x, y) .

Vzorec pro diskrétní inverzní Fourierovu transformaci:

$$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{2\pi i(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})}$$

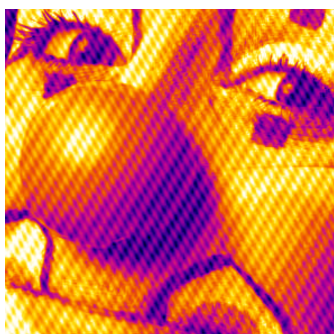
kde $F(u, v)$ jsou frekvenční koeficienty pro danou frekvenci (u, v) a $f(x, y)$ je intenzita signálu/obrazu v bodě (x, y) .

Algoritmus pracuje následujícím způsobem:

- Vypočtení diskrétní Fourierovy transformace (DFT) na řádcích a sloupcích pixelů pomocí algoritmu FFT (Fast Fourier Transform). Algoritmus FFT je rychlý algoritmus pro výpočet DFT a umožňuje efektivní výpočet Fourierovy transformace na velkých souborech dat.
- Výpočet amplitudového spektra, fázového spektra a výkonového spektra pomocí výsledků DFT.
- Zobrazení frekvenčního spektra uživateli v GUI filtru.
- Aplikace filtračního procesu na data, která uživatel specifikoval jako nežádoucí frekvence.
- Inverzní Fourierova transformace (IDFT), která převede signál zpět na termografický snímek.

Výsledkem Fourierovy transformace diskrétního signálu je obraz, který obsahuje informace o amplitudách, které byly přítomny v původním obrazu. Frekvenční spektrum můžeme zobrazit v podobě dvourozměrného grafu, kde na ose x a y jsou zobrazeny frekvence v horizontálním a vertikálním směru a intenzita obrazového pixelu reprezentuje amplitudu dané frekvence. Obrázek 8.1 ilustruje obrazový snímek s viditelnou mřížkou, kterou chceme odstranit. [Lee] Po převedení tohoto snímku do frekvenčního spektra získáme obrázek, který je zobrazen na 8.2. Na okrajích snímku 8.3 jsou viditelné vysoké frekvence, způsobené nežádoucí mřížkou.

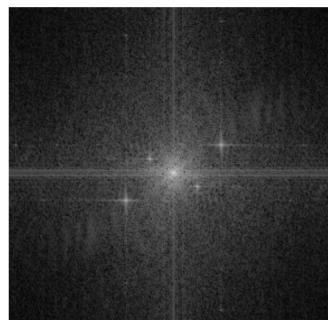
Vysoké frekvence jsou na obrázku 8.3 umístěny po okrajích kvůli způsobu, jakým je počítána Fourierova transformace. Při aplikaci Fourierovy transformace na obraz je výstup obrazu vytvořen jako matice s centrální symetrií, kde jsou nižší frekvence v centrální části a vyšší frekvence jsou na okrajích. To znamená, že oblasti s nízkými frekvencemi jsou umístěny v blízkosti středu matice a oblasti s vysokými frekvencemi jsou na okrajích matice. Pokud bychom tuto symetrii neupravili a zobrazili přímo výslednou Fourierovu transformaci, vysoké frekvence by byly zobrazeny na krajích a nízké frekvence by byly zobrazeny v centru, jak je vidět na obrázku 8.2. Pro přirozenější vizuální interpretaci frekvenčního spektra je nutné kvadranty s frekvenčními daty přeházet. Kvadranty přeházíme tak, aby byly nízké frekvence v centru a vysoké frekvence na okrajích. Provedeme výměnu prvního a čtvrtého kvadrantu a výměnu druhého a třetího kvadrantu. Ve výsledku budou vysoké frekvence umístěny ve středu snímku a nízké frekvence budou po okrajích. Výsledný snímek po přeházení kvadrantů je viditelný na 8.3. Interpretace spektra na snímku 8.3 je přirozenější než na snímku 8.2. Snímek s frekvenčním spektrem zobrazuje periodická data z původního termografického snímku. Mřížka je na snímku 8.3 viditelná jako hvězdné body kolem středu snímku. Uživatel má možnost tyto body označit, čímž odstraní vysoké frekvence.



Obrázek 8.1: Původní snímek



Obrázek 8.2: Spektrum bez přeuspořádání



Obrázek 8.3: Spektrum s přeuspořádáním

Přehození kvadrantů provádí kód zobrazený v 8.1. Nepřehozená data v poli "ma-

trix” se ukládají do nového pole, kde již budou umístěny tak, aby vysoké frekvence byly ve středu. Nové pole "fftShifted" poté bude zobrazeno v GUI filtru.

Zdrojový kód 8.1: Přehození kvadrantů

```
1 // flip quadrants
2 for (int i = 0; i < i_max; i++)
3 {
4     for (int j = 0; j < j_max; j++)
5     {
6         fftShifted[i + i_shift, j + j_shift] = matrix[i, j];
7         fftShifted[i, j] = matrix[i + i_shift, j + j_shift];
8         fftShifted[i + i_shift, j] = matrix[i, j + j_shift];
9         fftShifted[i, j + j_shift] = matrix[i + i_shift, j];
10    }
11 }
```

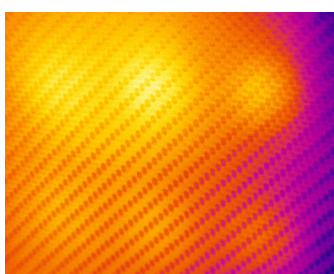
Výpočet diskrétní Fourierovy transformace provádí metoda `Fourier.Forward(data)` z knihovny `MathNet Numerics`. [CRG] Metoda vypočítává jednorozměrnou diskrétní Fourierovou transformaci (DFT) pomocí algoritmu Cooley-Tukey. Konkrétně se vypočte DFT řádku matice, který je předán jako vstupní argument "data". Tímto způsobem jsou metodě postupně předány všechny řádky matice. Následně se předávají i všechny sloupce matice.

Algoritmus Cooley-Tukey je založen na rozkladu DFT na menší DFT podle strategie "rozděl a panuj". Tento rozklad umožňuje snížit počet operací z původního $O(n^2)$ na $O(n \log n)$, což je výhodné, pokud provádíme Fourierovou transformaci na velkém objemu dat. [CRG]

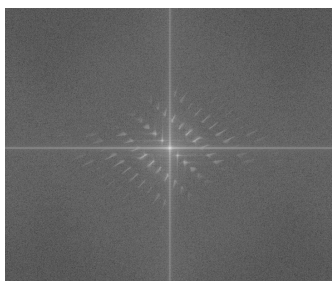
Po provedení Fourierovy transformace se frekvenční spektrum zobrazí uživateli. Uživatel ručně označí místa, která chce z frekvenčního spektra odstranit. Poté dochází k porovnání bitmap původního snímku frekvenčního spektra s bitmapou frekvenčního snímku, na které jsou obrazce. Pixel, nad kterými jsou obrazce, poté při inverzní transformaci nebudou započteny. Stejně jako u filtru referenční snímek, i zde se může stát, že uživatel zvolí stejnou barvu štětce, kterou má i označovaný pixel. V tomto případě se pixel zahrne do inverzní transformace, přestože byl zakreslen štětcem. Pravděpodobnost této situace ale není vysoká, nedává smysl označovat nežádoucí pixely stejnou barvou, jakou mají.

Příklad označení vysokých amplitud pro termografický snímek je vidět na obrázku 8.6. Snímal se laminát z uhlíkových vláken. Vysoké amplitudy jsou umístěny poblíž středu, jedná se o bílé pravidelné šmouhy. Pravidelné umístění těchto míst kolem středu ilustruje obrázek 8.5. Uživatel tyto místa musí označit ručně, pokud chce odstranit mřížku v původním snímku. Ruční označení vysokých amplitud, jak zná-

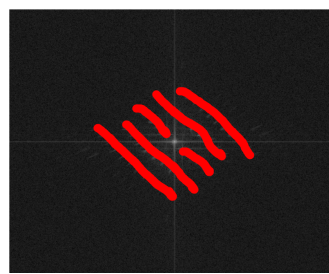
zorní obrázek 8.6, není pečlivé, protože nebyly označeny pouze konkrétní body s vysokými amplitudami, ale také jejich okolí, které má již amplitudy nízké. Uživatel, který bude filtr aplikovat, již musí samostatně zvážit, zda dá přednost pečlivosti nebo rychlosti označení. Filtr by se dal ještě do budoucna modifikovat tak, aby označování prováděl automaticky. Frekvenční spektrum by se naprahovalo dle amplitud. Na základě stanoveného prahu by se odstranily amplitudy, které by práh přesahovaly a zachovaly ty amplitudy, které by byly pod prahem. Tento přístup by musel ale ošetřit středový bod, ten je ve frekvenčním spektru důležitý, při jeho odstranění vznikne nepřehledný termografický snímek. Popřípadě by se dala využít umělá inteligence, která by na základě trénovacích dat určila místa, která představují vysoké amplitudy. Frekvence jsou na snímku frekvenčního spektra symetrické. Filtr by se proto mohl modifikovat tak, že při označení míst s vysokou amplitudou se zároveň označí body, které jsou středově souměrné.



Obrázek 8.4: Původní snímek

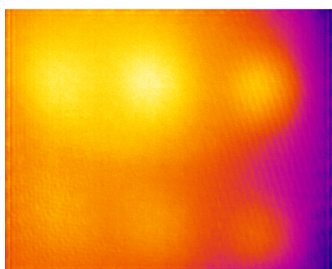


Obrázek 8.5: Frekvenční spektrum



Obrázek 8.6: Označení vysokých frekvencí

Výsledek aplikace filtru je vidět na obrázku 8.7. Přestože označení bodů s vysokými frekvencemi nebylo pečlivé, výsledný snímek po aplikaci filtru již neobsahuje pravidelnou mřížku jako původní snímek 8.4. Snímek po aplikaci filtru je vyhlazený a indikace jsou viditelnější.

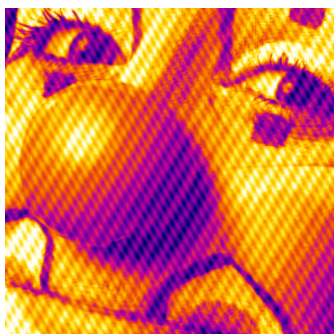


Obrázek 8.7: Aplikace filtru

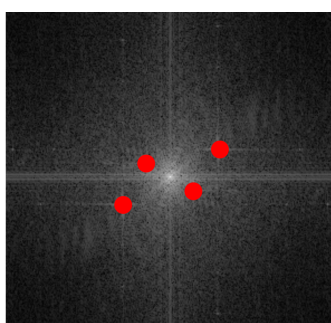
Aplikace filtru na snímek s mřížkou, jehož frekvenční spektrum neobsahuje velké množství míst s vysokými frekvencemi a jehož úprava ve frekvenčním spektru

8. Filtrace mřížky z obrazu

je jednoduchá, ilustruje obrázek 8.9. Tento snímek ve frekvenčním spektru obsahuje čtyři razantní body s vysokou amplitudou, jejich označení je pak jednoduché. Po označení těchto bodů a následném použití inverzní Fourierovy transformace získáváme snímek, který již neobsahuje rušivou mřížku.



Obrázek 8.8: Původní snímek



Obrázek 8.9: Označení vysokých frekvencí

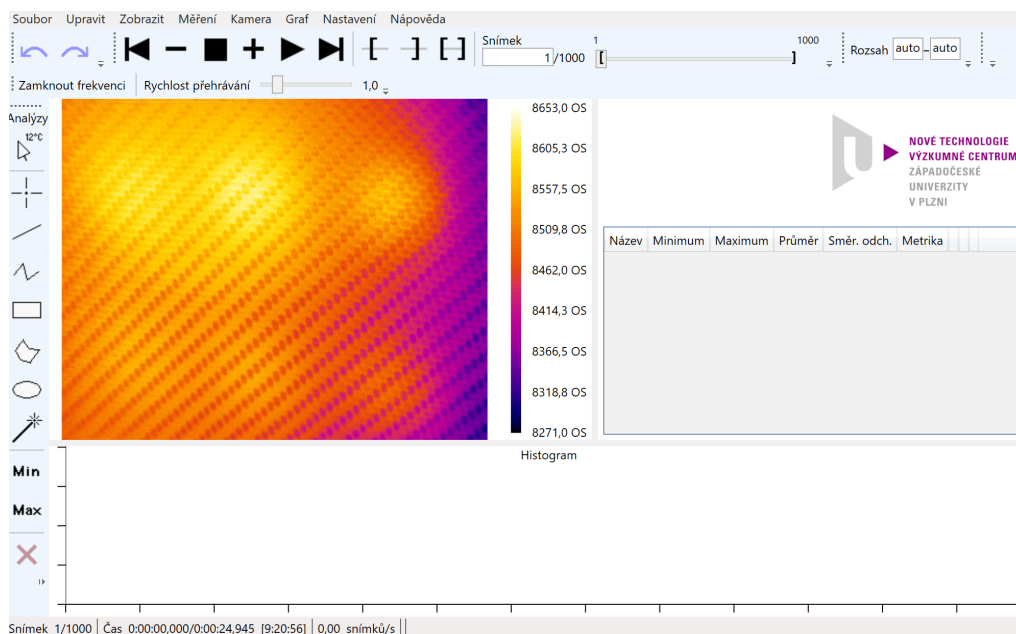


Obrázek 8.10: Aplikace filtru

Uživatelské rozhraní

9

Dostupné filtry lze zobrazit kliknutím v záložce "Měření" na položku "Upravit filtry...". Zobrazí se okno "Nastavení filtrů zdroje", ve kterém lze vybrat potřebný filtr. V závislosti na vybraném filtru se zobrazí uživatelské rozhraní, ve kterém lze práci filtru upravit či nastavit. Některé filtry není potřeba dodatečně nastavovat, po jejich přidání se filtr rovnou aplikuje na načtenou nahrávku nebo na načtený snímek.



Obrázek 9.1: GUI aplikace LabIR

Obrázek 9.1 ilustruje uživatelské rozhraní aplikace LabIR[®]. GUI zobrazuje termografický snímek, který načel uživatel. Uživatel dále může využít funkce, které software nabízí.

V bakalářské práci byly přidány 2 nové filtry do již existujícího okna "Nastavení filtrů zdroje". Přidaný filtr pro kompenzaci nerovnoměrné expozice lze dodatečně upravit tak, aby přesněji aproximoval termografická data a lépe tím kompenzoval nerovnoměrnou expozici. K tomuto účelu bylo vytvořené uživatelské rozhraní, kde uživatel může například zvolit typ aproximace. Filtr pro odstranění mřížky v obraze, který byl také nově přidán, vyžaduje interakci s uživatelem. Uživatel musí samostatně vybrat ve snímku, představujícím frekvenční spektrum, místa, kde je frekvence vysoká. Výběr těchto frekvencí také provádí v nově vytvořeném uživatelském rozhraní.

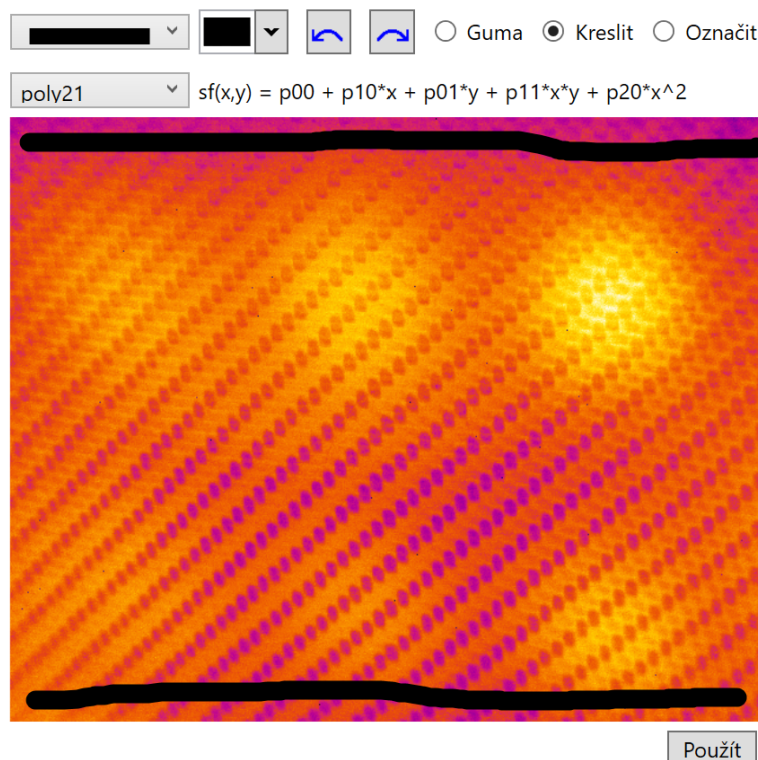
9.1 Položka "Nerovnoměrná expozice"

Položka představuje filtr pro kompenzaci nerovnoměrné expozice. Po jejím vybrání je filtr ihned aplikován s přednastavenými hodnotami a výsledek jeho aplikace je viditelný v hlavním okně programu LabIR[®]. Přednastavené hodnoty lze upravit ve vytvořeném GUI.

Na obrázku 9.2 je zobrazeno GUI filtru. GUI se zobrazí až po přidání filtru. Filtr se ihned aplikuje na termografická data, proto je v GUI zobrazen termografický snímek, na kterém již byl filtr aplikován. Filtr použil přednastavené hodnoty a výsledek kompenzace nerovnoměrné expozice zobrazil v hlavním okně a také v okně uživatelského rozhraní daného filtru.

Uživatel může označit místa, která nechce zahrnout do výpočtu výsledného snímku s kompenzovanou expozicí. Funkce se hodí především v situaci, kdy na termografickém snímku je kromě měřeného objektu také pozadí nebo držák vzorku. Kompenzaci nerovnoměrné expozice chceme provádět pouze podle termografických dat snímaného objektu. Místa, která nechceme zahrnout do výpočtu, se zamažou štětce. Tloušťku i barvu štětce si uživatel může zvolit. Na obrázku 9.2 uživatel černou linií ve vrchní i spodní části snímku označil místa, která nechce zahrnout do výpočtu výsledného snímku. Nový snímek s kompenzací nerovnoměrné expozice bez zahrnutí označených míst bude vytvořen po stisknutí tlačítka "Použít". Pokud se místa označí chybně, lze vybrat gumu a namalovaný obrazec vymazat, popřípadě lze obrazec označit a přesunout na jiné místo. Pokud uživatel chce odvolat poslední akci, může stisknout tlačítko "krok zpět". Tlačítko je na obrázku 9.2 označenou modrou šipkou namířenou vlevo. Opačnou akci provede modrá šipka směřující vpravo. Při tvorbě snímku s kompenzovanou expozicí se termografickými daty prokládá polynomiální rovina. Typ polynomiální roviny, kterou budou data proložena, může uživatel specifikovat v GUI. Přednastavená je hodnota "poly21". Předpis této polynomiální roviny je zobrazen v uživatelském rozhraní. Pro položku "poly21" se jedná

o polynom s předpisem $sf(x, y) = p00 + p10 \cdot x + p10 \cdot y + p11 \cdot x \cdot y + p20 \cdot x^2$.

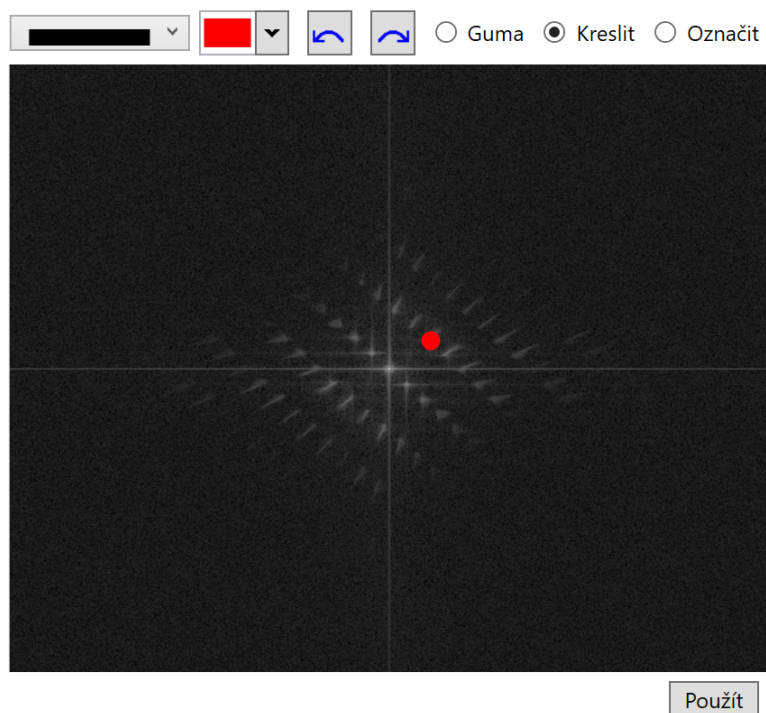


Obrázek 9.2: GUI filtru pro kompenzaci nerovnoměrné expozice

9.2 Položka "Mřížka v obraze"

Položka představuje filtr, který odstraní mřížku na snímku. Přidáním tohoto filtru se původní snímek nezmění. Ke změně dojde až po interakci uživatele s uživatelským rozhraním. Původní snímek je nejdříve převeden Fourierovou transformací na snímek, který zobrazuje frekvenční spektrum. Snímek s frekvenčním spektrem je pak zobrazen v GUI filtru, jak je vidět na obrázku 9.3.

Uživatel má možnost zakreslit místa s vysokou frekvencí. Při zakreslování těchto míst může uživatel zvolit odpovídající tloušťku čáry popřípadě barvu čáry. Pokud se zakreslí místa chybně, může uživatel odvolat akci tlačítkem "krok zpět." Tlačítko "krok zpět" je na snímku 9.3 označeno modrou šipkou směřující vlevo.

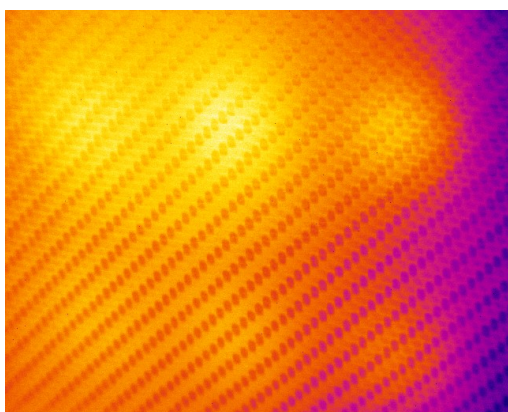


Obrázek 9.3: GUI filtru pro odstranění mřížky v obraze

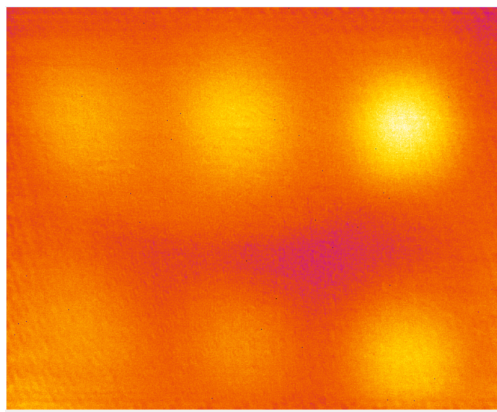
Použití filtru pro kompenzaci nerovnoměrné expozice je vhodnou volbou, pokud je obtížné umístit zdroj buzení tak, aby se snímané těleso zahřálo rovnoměrně. Pro efektivní korekci nerovnoměrné expozice je nutné zvážit, který dostupný polynom bude naměřená data aproximovat nejlépe. Lze použít referenční snímek, ale v praxi není snadné zajistit původní nepoškozený materiál, jehož snímky by se použily jako referenční. Při kompenzaci nerovnoměrné expozice dochází k úpravě naměřených teplotních dat, což způsobuje, že na upraveném snímku již nelze vyhodnocovat teploty. Při IRNDT inspekci to většinou nevádí. Před použitím daného algoritmu je vhodné promyslet, zda přesnost měření není nutno zachovat.

Aplikace Fourierovy transformace na termografický snímek se ukázala jako vhodná volba pro odstranění nežádoucí mřížky. Pravidelný vzor je ve frekvenčním spektru, do kterého je termografický snímek převeden, snadno identifikovatelný. Při odstraňování mřížky ve frekvenčním spektru je kvalita výsledku závislá na pečlivosti uživatele. Uživatel při označování vysokých amplitud může označit i ty amplitudy, které by se měly zachovat. Ideálním případem by bylo filtr modifikovat tak, aby se označování amplitud představujících pravidelný vzor provádělo automaticky, například tím, že se snímek naprahuje. Nevýhodnou Fourierovy transformace je její nízká rychlost. Zpracovat termografickou nahrávku, která obsahuje tisíc snímků, zabere poměrně velké množství času. Takové zpracování je navíc náročné pro uživatele, který musí v každém snímku označit místa s vysokými amplitudami. Tento proces by mohl být v budoucnu automatizován.

Zkombinováním dvou výše zmíněných filtrů získáme výsledný snímek, který je zobrazen na obrázku 10.2. Na původním snímku došlo ke kompenzaci nerovnoměrné expozice pomocí polynomu "poly22". Následně se aplikovala Fourierova transformace, která z původního snímku odstranila rušivou mřížku. Vcelku lze říci, že výsledný snímek po aplikaci dvou filtrů je kvalitnější. Operátor, který hledá indikace, dokáže lépe označit místa s defekty, protože není rušen mřížkou ani nerovnoměrnou expozicí.



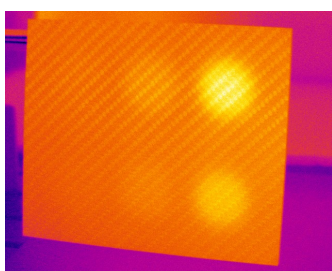
Obrázek 10.1: Původní termografický snímek



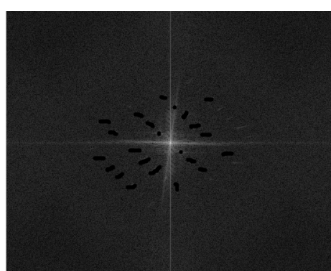
Obrázek 10.2: Snímek po aplikaci implementovaných filtrů

První příloha

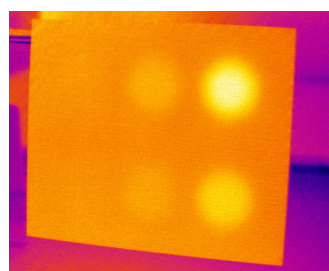
A



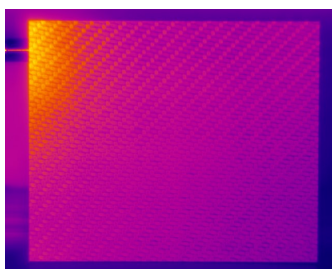
Obrázek A.1: Původní termografický snímek



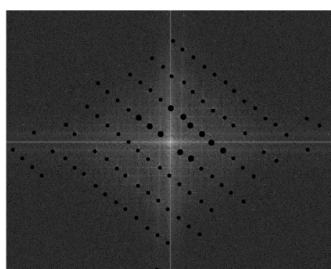
Obrázek A.2: Frekvenční spektrum



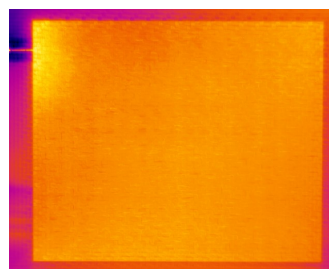
Obrázek A.3: Aplikace implementovaných filtrů



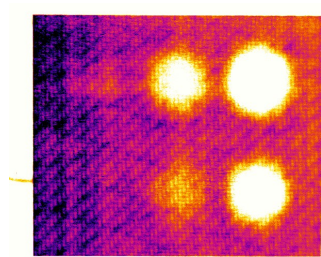
Obrázek A.4: Původní termografický snímek



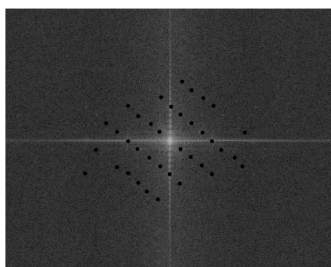
Obrázek A.5: Frekvenční spektrum



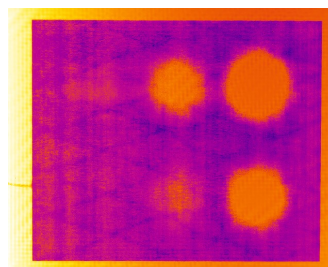
Obrázek A.6: Aplikace implementovaných filtrů



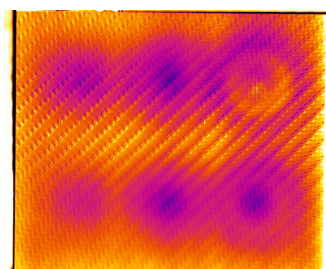
Obrázek A.7: Původní termografický snímek



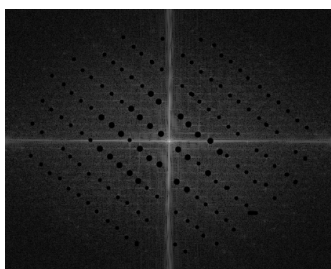
Obrázek A.8: Frekvenční spektrum



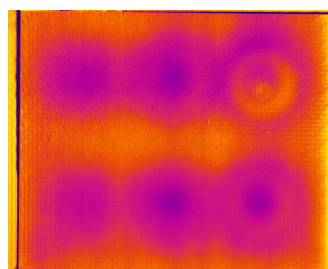
Obrázek A.9: Aplikace implementovaných filtrů



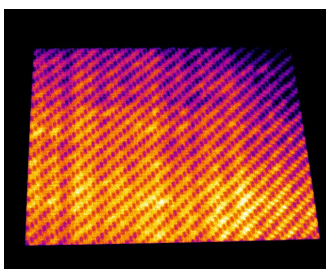
Obrázek A.10: Původní termografický snímek



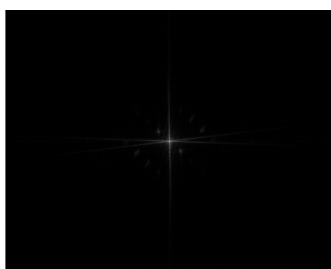
Obrázek A.11: Frekvenční spektrum



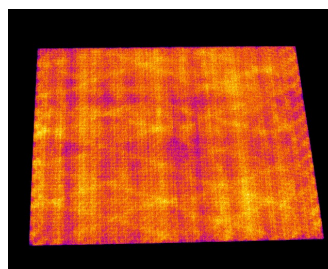
Obrázek A.12: Aplikace implementovaných filtrů



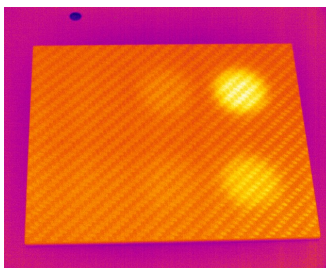
Obrázek A.13: Původní termografický snímek



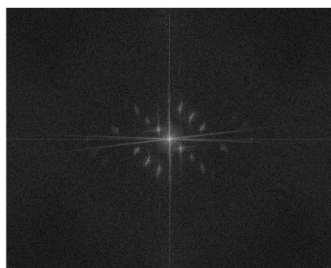
Obrázek A.14: Frekvenční spektrum



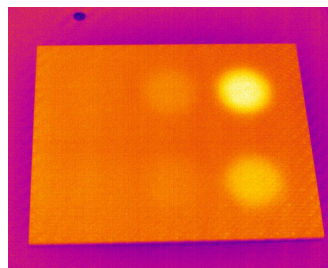
Obrázek A.15: Aplikace implementovaných filtrů



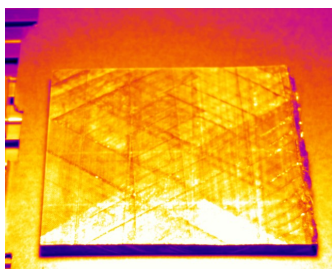
Obrázek A.16: Původní termografický snímek



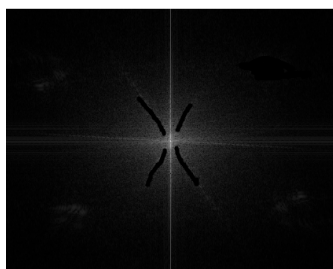
Obrázek A.17: Frekvenční spektrum



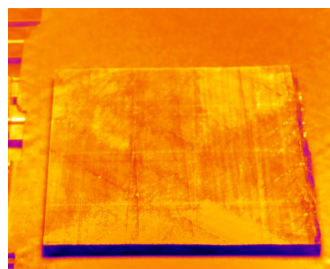
Obrázek A.18: Aplikace implementovaných filtrů



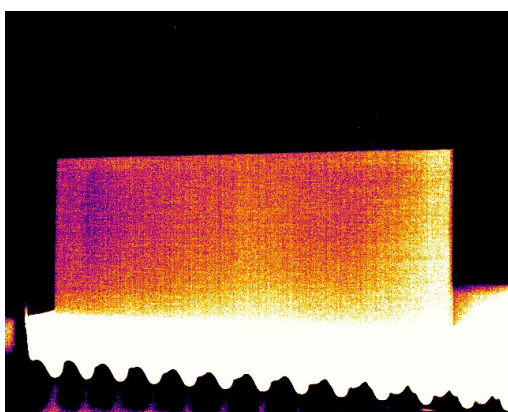
Obrázek A.19: Původní termografický snímek



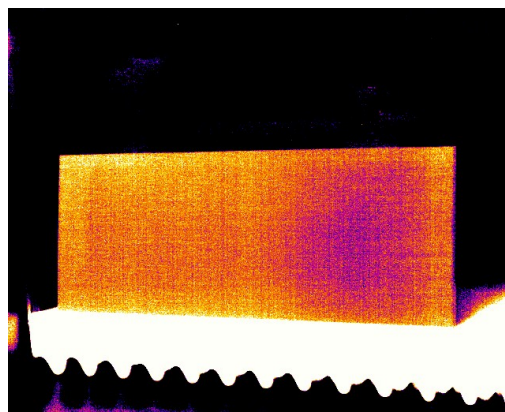
Obrázek A.20: Frekvenční spektrum



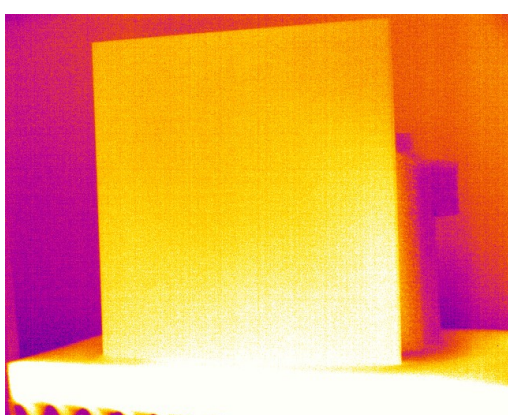
Obrázek A.21: Aplikace implementovaných filtrů



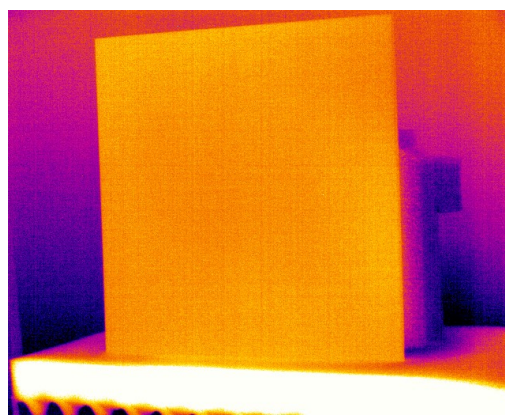
Obrázek A.22: Původní termografický snímek



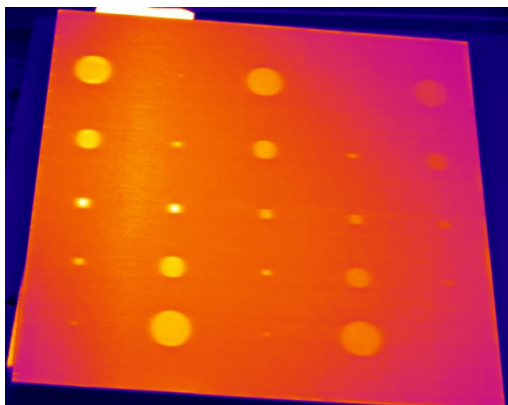
Obrázek A.23: Snímek po vyrovnání expozice



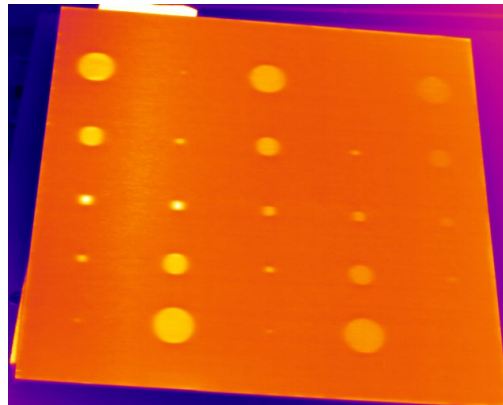
Obrázek A.24: Původní termografický snímek



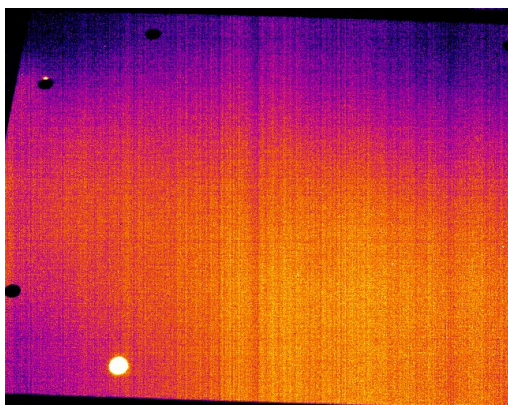
Obrázek A.25: Snímek po vyrovnání expozice



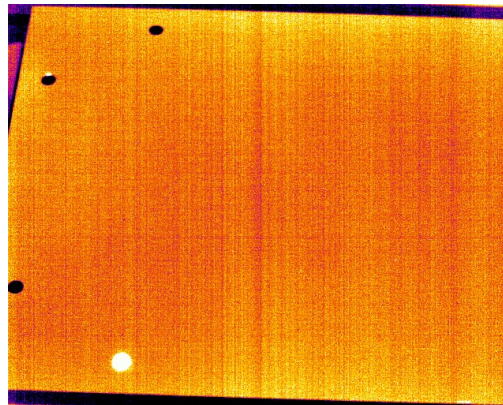
Obrázek A.26: Původní termografický snímek



Obrázek A.27: Snímek po vyrovnání expozice



Obrázek A.28: Původní termografický snímek



Obrázek A.29: Snímek po vyrovnání expozice

Druhá příloha

B

Detailní popis aktuální adresářové struktury bakalářské práce.

B.1 Aplikace_a_Knihovny

Adresář obsahuje vytvořené zdrojové soubory, ve kterých jsou filtry a GUI.

B.2 Text_prace

Adresář obsahuje \LaTeX zdrojové soubory a vygenerovaný PDF soubor bakalářské práce.

img/ - adresář obsahuje ilustrace, které byly použity v textu bakalářské práce.

B.3 Vstupni_data

Adresář obsahuje vstupní snímky, na kterých budou aplikovány implementované filtry.

B.4 Vysledky

Adresář obsahuje výsledné snímky, na kterých již byly aplikovány implementované filtry.

Snímky jsou pojmenovány následujícím způsobem:

1. `_combination`: Výsledný snímek na který byl aplikován filtr odstraňující mřížku a filtr vyrovnávající expozici
2. `_grid_remove`: Výsledný snímek na který byl aplikován pouze filtr odstraňující mřížku

B. Druhá příloha

3. `_uneven _exposure`: Výsledný snímek na který byl aplikován pouze filtr vyrovnávající expozici
4. `_spectrum`: Snímek frekvenčního spektra
5. `_original`: Původní snímek bez úprav

Bibliografie

- [Avd+04] AVDELIDIS, N.P. et al. Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT. *Progress in Aerospace Sciences*. 2004, roč. 40, s. 143–162. Dostupné z DOI: 10.1016/j.paerosci.2004.03.001.
- [BS94] BAILEY, David H.; SWARZTRAUBER, Paul N. A Fast Method for the Numerical Evaluation of Continuous Fourier and Laplace Transforms. *SIAM Journal on Scientific Computing*. 1994, roč. 15, č. 5, s. 1105–1110. Dostupné z DOI: 10.1137/0915067.
- [Bal+16] BALAGEAS, Daniel et al. Thermal (IR) and Other NDT Techniques for Improved Material Inspection. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2016, roč. 35. Dostupné z DOI: 10.1007/s10921-015-0331-7.
- [Bha+77] BHABATOSH, Chanda et al. *Digital image processing and analysis*. PHI Learning Pvt. Ltd., 1977.
- [Cam10] CAMPBELL, Flake C. *Structural composite materials*. ASM international, 2010.
- [Chr] CHRISTOPH RUEGG Marcus Cuda, Jurgen Van Gael. *Curve Fitting: Linear Regression*. MathNet Numerics. Dostupné také z: <https://numerics.mathdotnet.com/Regression.html>.
- [CRG] CUDA, Marcus; RUEGG, Christoph; GAEL, Jurgen Van. *Fourier and related linear integral transforms*. MathNet Numerics. Dostupné také z: <https://numerics.mathdotnet.com/IntegralTransforms.html>.
- [ITM13] IBARRA-CASTANEDO, Clemente; TARPANI, José; MALDAGUE, Xavier. Nondestructive testing with thermography. *European Journal of Physics*. 2013, roč. 34, S91–S109. Dostupné z DOI: 10.1088/0143-0807/34/6/S91.
- [Lee] LEE, Prof. Seungchul. *Image in Frequency Domain*. [B.r.]. Dostupné také z: https://i-systems.github.io/teaching/image_proc/iNotes/02_image_in_freq_py.html. 2023/04/14.

- [MŠM20] MUZIKA, L.; ŠVANTNER, M.; MOSKAL, D. Experimental investigation of a time-power transformation method for flash-pulse thermographic testing. *Appl. Opt.* 2020, roč. 59, č. 17, E89–E96. Dostupné z DOI: 10.1364/AO.388437.
- [Pla18] PLANCK, M. *The Theory of Heat Radiation*. Prabhat Prakashan, 2018. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=o1pHDwAAQBAJ>.
- [Wol+85] WOLFE, W.L.; MICHIGAN. INFRARED INFORMATION, Environmental Research Institute of; CENTER, Analysis; ZISSIS, G.J.; NAVAL RESEARCH, United States. Office of. *The Infrared Handbook*. Environmental Research Institute of Michigan, 1985. IRIA series in infrared & electro-optics. ISBN 9780960359011. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=LDhSAAAAMAAJ>.

Seznam obrázků

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Ironbow paleta | 8 |
| 2.2 | Rainbow paleta | 8 |
| 2.3 | Rainbow paleta s vysokým kontrastem | 8 |
| 2.4 | Grayscale paleta | 9 |
| 4.1 | Příklad nerovnoměrné expozice | 17 |
| 5.1 | Pravidelná mřížka v termografickém snímku | 22 |
| 7.1 | Rovina poly11 | 28 |
| 7.2 | Rovina poly22 | 28 |
| 7.3 | Před | 29 |
| 7.4 | Po | 29 |
| 7.5 | Originál | 31 |
| 7.6 | Filtr poly11 | 31 |
| 7.7 | Filtr poly22 | 31 |
| 7.8 | GUI filtru pro použití referenčního snímku | 32 |
| 7.9 | Průběh měření | 33 |
| 7.10 | Měřené objekty | 33 |
| 7.11 | Původní snímek | 33 |
| 7.12 | Tímto snímkem se odečítalo/dělilo | 33 |
| 7.13 | Výsledný snímek po odečtení | 34 |
| 7.14 | Výsledný snímek po vydělení | 34 |
| 8.1 | Původní snímek | 37 |
| 8.2 | Spektrum bez přeuspořádání | 37 |
| 8.3 | Spektrum s přeuspořádáním | 37 |
| 8.4 | Původní snímek | 39 |
| 8.5 | Frekvenční spektrum | 39 |
| 8.6 | Označení vysokých frekvencí | 39 |
| 8.7 | Aplikace filtru | 39 |
| 8.8 | Původní snímek | 40 |

| | | |
|------|---|----|
| 8.9 | Označení vysokých frekvencí | 40 |
| 8.10 | Aplikace filtru | 40 |
| 9.1 | GUI aplikace LabIR | 41 |
| 9.2 | GUI filtru pro kompenzaci nerovnoměrné expozice | 43 |
| 9.3 | GUI filtru pro odstranění mřížky v obraze | 44 |
| 10.1 | Původní termografický snímek | 46 |
| 10.2 | Snímek po aplikaci implementovaných filtrů | 46 |
| A.1 | Původní termografický snímek | 47 |
| A.2 | Frekvenční spektrum | 47 |
| A.3 | Aplikace implementovaných filtrů | 47 |
| A.4 | Původní termografický snímek | 47 |
| A.5 | Frekvenční spektrum | 47 |
| A.6 | Aplikace implementovaných filtrů | 47 |
| A.7 | Původní termografický snímek | 48 |
| A.8 | Frekvenční spektrum | 48 |
| A.9 | Aplikace implementovaných filtrů | 48 |
| A.10 | Původní termografický snímek | 48 |
| A.11 | Frekvenční spektrum | 48 |
| A.12 | Aplikace implementovaných filtrů | 48 |
| A.13 | Původní termografický snímek | 48 |
| A.14 | Frekvenční spektrum | 48 |
| A.15 | Aplikace implementovaných filtrů | 48 |
| A.16 | Původní termografický snímek | 48 |
| A.17 | Frekvenční spektrum | 48 |
| A.18 | Aplikace implementovaných filtrů | 48 |
| A.19 | Původní termografický snímek | 49 |
| A.20 | Frekvenční spektrum | 49 |
| A.21 | Aplikace implementovaných filtrů | 49 |
| A.22 | Původní termografický snímek | 49 |
| A.23 | Snímek po vyrovnání expozice | 49 |
| A.24 | Původní termografický snímek | 49 |
| A.25 | Snímek po vyrovnání expozice | 49 |
| A.26 | Původní termografický snímek | 50 |
| A.27 | Snímek po vyrovnání expozice | 50 |
| A.28 | Původní termografický snímek | 50 |
| A.29 | Snímek po vyrovnání expozice | 50 |

Seznam výpisů

| | | |
|-----|--|----|
| 7.1 | Použitá metoda "DirectMethod" | 27 |
| 7.2 | Použitá metoda "LinearMultiDim" | 27 |
| 7.3 | Tvorba polynomu "poly12" | 28 |
| 7.4 | Výpočet funkční hodnoty pro poly11 | 30 |
| 7.5 | Kompenzace nerovnoměrné expozice | 30 |
| 7.6 | Rozdíl či podíl dvou snímků | 32 |
| 8.1 | Přehození kvadrantů | 38 |

101011000011100010 1100001
1010110001 10001 10001

110100011101101001 1010101
01100001 1010101
11100010101110101