

# **Zkvalitňování informačního obsahu termovizních snímků použitím algoritmů pro zpracování obrazu**

Nosek Jiří, Bc.

Vedoucí práce: Hofreiter Milan, Prof. Ing. CSc.

## **Abstrakt**

*Tato práce se zabývá teoretickým a praktickým rozбором problematiky aplikace algoritmů obrazové fúze a jejich možného využití pro zvýšení informačního obsahu a rozlišení termovizních snímků. Součástí práce je implementace několika stávajících fúzovacích technik v programovém prostředí MATLAB, jejich následná aplikace na termovizní data a návrh postupů a kritérií hodnocení kvality výsledných snímků.*

## **Klíčová slova**

*Fúze obrazu, registrace obrazu, super-resolution, termovize*

## **1. Úvod**

Infračervená termografie (obecně známá také pod termínem termovize) je v současné době již běžně rozšířenou a velmi často používanou technikou pro měření teploty a zjišťování rozložení teplotního pole povrchu analyzovaných objektů. Na rozdíl od běžných fotografických přístrojů, které zaznamenávají informaci z viditelné části spektra elektromagnetických záření, pokrývající oblast vlnových délek (400÷750) nm, zachycují termografická zařízení (termokamery) delší vlnové délky v rozsahu (7,5÷13)  $\mu\text{m}$  [1], které náleží do infračerveného pásma záření. Termovizní měření nalézá uplatnění prakticky napříč celou technickou praxí, nejrozsáhlejší využití má potom především na poli průmyslu a stavebnictví. Častá jsou například termovizní měření elektrických zařízení, při kterých je možné snadno identifikovat a následně vyměnit nadměrně se zahřívající svorky a spoje u elektrorozvaděčů, v oblasti výrobních technologií lze použitím termokamery rychle a jednoduše odhalit skryté vady v izolaci pecí, které by jinak mohly způsobovat problémy ve výrobním procesu a zvýšení zmetkovosti výrobků nebo dokonce poškození výrobních zařízení. V neposlední řadě se potom termovizním měřením zjišťují nežádoucí úniky tepla z tepelných rozvodů nebo obytných budov.

Navzdory prudkému technologickému vývoji termografických zobrazovacích zařízení disponují současné termokamery oproti běžným zobrazovacím zařízením stále ještě výrazně horšími rozlišovacími schopnostmi. Zatímco běžné kamerové systémy jsou dnes vybaveny výkonnými CCD čipy, které jsou schopny bez problémů snímat barevný obraz s rozlišením až v řádech desítek Mpx, je obrazové rozlišení průmyslových termokamer poslední generace firmy FLIR Systems limitováno výstupem s fyzickým rozlišením (640×480) px, tj. přibližně 0,3 Mpx [1]. Vysoká náročnost výroby technologicky vyspělejších termokamer se navíc nepříznivě odráží i v pořizovací ceně takovýchto zařízení, je tedy vhodné se zabývat nejen dalším technologickým vývojem vlastních senzorů termografických zařízení, ale také dodatečným softwarovým zpracováním termovizních obrazů (termogramů). Vzhledem k vizuálnímu charakteru termogramů se přímo nabízí možnost považovat termografická data za obrazová a pokusit se o jejich zpracování a zkvalitnění obsažené informace speciálními algoritmy pro zpracování obrazu.

Hlavním cílem této práce je posouzení vhodnosti aplikace vybraných algoritmů a technik na termografické snímky získané leteckým snímkováním krajinných ekosystémů na Třeboňsku. Veškeré výpočty a programové vybavení byly aplikovány v programovém prostředí MATLAB s využitím odpovídajících toolboxů (Image Processing Toolbox, Wavelet Toolbox).

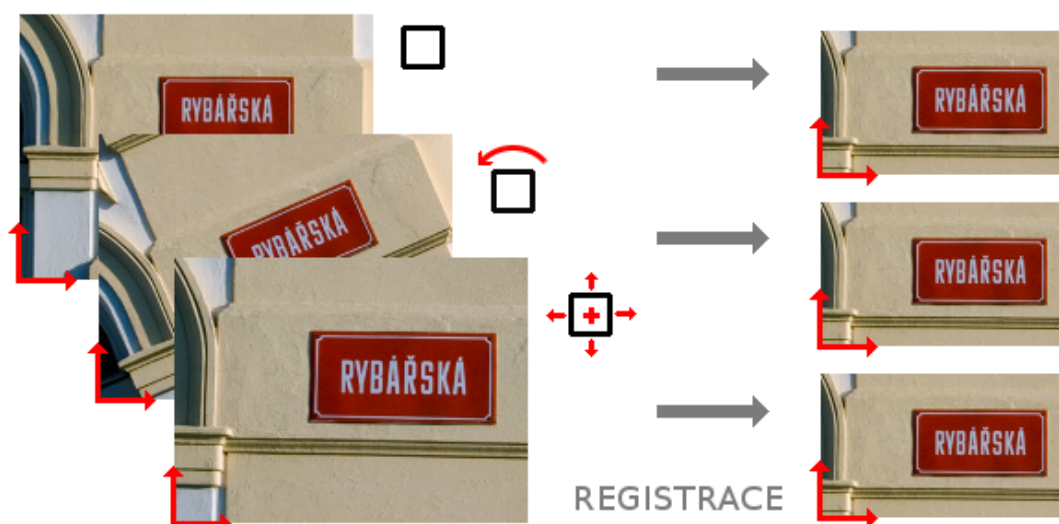
## 2. Použité techniky pro zkvalitňování obrazu a zvyšování rozlišení

Při řešení této práce byly využity dva různé přístupy, které ke zkvalitnění výstupních dat shodně využívají principu obrazové fúze. Jedná se na jedné straně o vícesenzorovou obrazovou fúzi multispektrálních dat, na straně druhé o experimentálně vyvíjené softwarové nástroje pro zvyšování prostorového rozlišení obrazu použitím dat stejného typu, v anglosaské literatuře označovaných termínem *super-resolution* (SR). U obou přístupů je kvalitnějšího snímku (v dalším textu bude označován zkratkou HR – z anglického *high resolution*) dosaženo spojením obrazové informace z více obrazů s nižším rozlišením (LR – z anglického *low resolution*), zachycujících stejnou scénu z jiného místa nebo i jiným typem senzoru (v případě vícesenzorové fúze může jeden nebo více senzorů pracovat i v jiném spektrálním pásmu elektromagnetického záření). Většina algoritmů popisovaných v následujícím textu respektuje tzv. vícekanálový akviziční model (1) publikovaný v [2], na základě kterého lze matematicky vyjádřit vztah mezi originální snímanou scénou  $o(x,y)$  a jejím obrazem  $z_k(i,j)$ , který je zachycen senzorem v příslušném  $k$ -tém kanálu (např. pozorováním v různých spektrálních pásmech, atd.).

$$z_k(i, j) = D[h_k(x, y) * o(W_k(x, y))] + n_k(i, j) \quad (1)$$

Model uvažuje tři možné druhy degradace obrazu snímané scény - geometrickou deformaci  $W_k(x,y)$ , která reprezentuje vzájemnou polohu scény a obrazového senzoru, funkci rozmazání  $h_k(x,y)$ , konvolující s deformovaným obrazem a také aditivní šum  $n_k(i,j)$ .  $D$  je operátor modelující zobrazovací funkci senzoru.

### 2.1 Předzpracování a registrace obrazových dat



Obr. 1: Schéma registrace sady třech snímků

Veškerá vstupní obrazová data (LR snímky) pro fúzovací algoritmy musí být nejprve správně zregistrována. Registrací se rozumí geometrické sesazení vstupních snímků vůči referenčnímu obrazu takovým způsobem, aby si vzájemně korespondující body všech obrazů

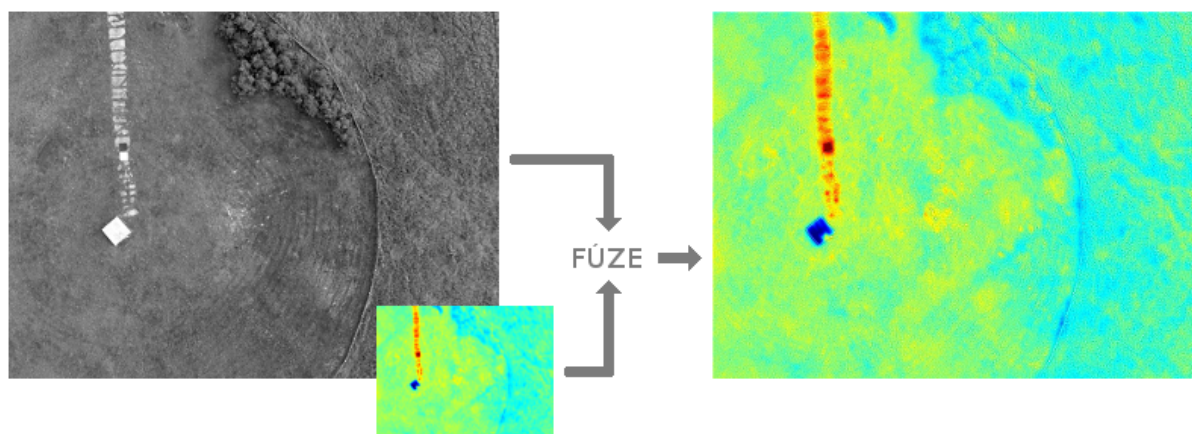
odpovídaly a geometrická deformace  $W_k(x,y)$  z (1) byla odstraněna. Bezchybné zvládnutí registrace zpracovávaných dat je klíčovým faktorem, který zásadním způsobem ovlivňuje úspěšnost následně prováděné obrazové fúze.

Samotný registrační proces se skládá ze čtyř fází [3]. Nejprve je třeba ve zpracovávaných obrazových datech nalézt významné objekty - oblasti s vysokým kontrastem, výrazné hrany, atd. - na základě kterých lze po vzájemném zpárování mezi jednotlivými snímky odhadnout pro každý registrovaný snímek jedinečný transformační model popisující jeho geometrický vztah vůči obrazu referenčnímu. Jakmile je model znám, přichází na řadu závěrečná fáze, při které jsou všechny registrované obrazy převzorkovány do souřadnicového systému referenčního snímku a vhodným způsobem oříznuty.

Náročnost registračního procesu je do velké míry závislá na typu transformačního vztahu mezi snímky. Jednodušší automatické metody registrace obrazů pracující na základních statistických principech (křížová korelace, kovariance) si bez problémů dokážou poradit se snímky, jejichž geometrické vztahy mají podobu translace (posunutí) nebo mírné rotace [3]. Jsou-li však registrované snímky navíc zatíženy transformacemi složitějšího charakteru, jako je změna měřítka nebo zkosení obrazu, je k automatickému nalezení korespondencí mezi obrázky třeba použít mnohem sofistikovanější algoritmy založené na detekci objektů (např. publikované v [4]). registrační nástroje fungující na výše popsaném principu jsou však výrazně omezeny požadavkem plošnosti snímané scény. Pokud je tato scéna prostorová a je snímána senzory z různých míst a úhlů, nelze ve většině případů správně určit typ ani parametry globálního transformačního modelu (např. projektivní transformace) a převzorkovaný snímek neodpovídá referenčnímu [5].

Registrace snímků použitých v této práci byla provedena registračními funkcemi MATLABu a také nástrojem WBS Image Matcher [4], který byl vyvinut na Katedře kybernetiky Fakulty elektrotechnické ČVUT.

## 2.2 Algoritmy pro obrazovou fúzi multispektrálních dat



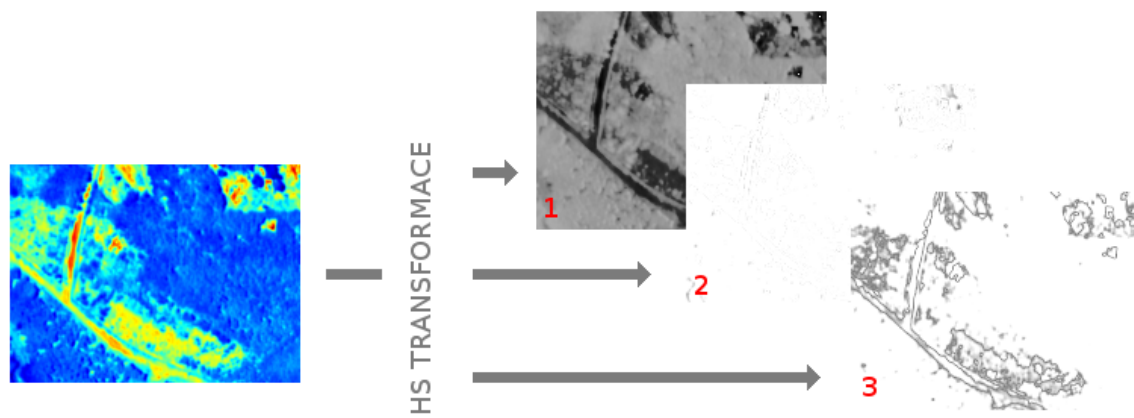
**Obr. 2:** Princip fúzování panchromatického a termovizního snímku

Tento přístup k problematice zkvalitňování obrazových dat vychází z principu spojení obrazové informace získané z několika senzorů rozdílného typu, které zachycují tentýž objekt v různých spektrálních pásmech. Takovéto techniky jsou využívány např. v oblasti medicínské diagnózy (fúzování snímků CT, MRI, atd.) a především satelitního snímkování [6], kde je takto kombinována informace kvalitnějšího černobílého (panchromatického) obrazu o vysokém rozlišení a méně kvalitního barevného snímku. Cílem je obohacení interpolací zvětšeného barevného snímku o vysokofrekvenční obrazové hrany a detaily, čímž je ve výsledku do značné míry vykompenzováno menší prostorové rozlišení použitých

záznamových zařízení a vznikají snímky obsahující obrazovou informaci z širšího spektra záření.

V rámci této práce byly na termovizní a obrazová data aplikovány tři různé techniky používané pro fúzování snímků při satelitním snímkování [6] - IHS transformace, filtrace obrazu hornopropustním filtrem a waveletová fúze.

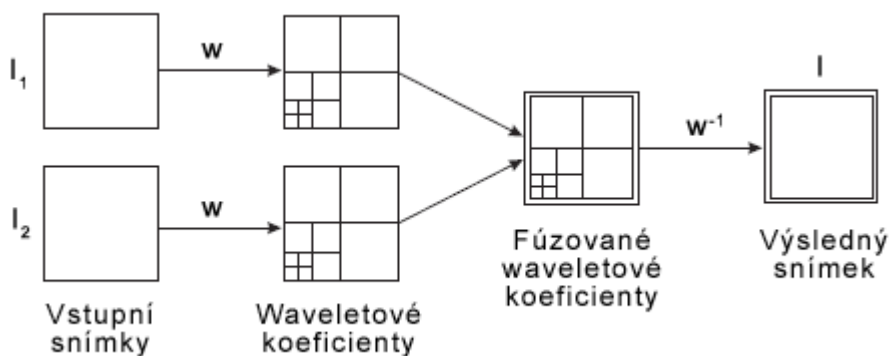
Princip **IHS transformace** spočívá v převedení spektrálního snímku (v tomto případě obrazu termogramu v barevném prostoru RGB) do barevného modelu IHS (*intensity – hue – saturation*). Fúze je následně provedena nahrazením komponenty jasu, která je hlavním nositelem prostorové informace, vhodně ekvalizovaným panchromatickým snímkem, obsahujícím větší množství vysokofrekvenční informace. Na Obr. 3 je znázorněn termovizní snímek a jeho základní komponenty po transformaci do IHS barevného prostoru.



**Obr. 3:** IHS rozklad termovizního snímku – komponenta odstínu (1), jasu (2) a saturace (3)

Při **filtrování obrazu hornopropustním (*high-pass*) filtrem** je termovizní obraz obohacen o vysokofrekvenční signál z panchromatického snímku, v kterém je obsažena hlavní část vizuální prostorové informace (hrany, detaily textur, atd.). Filtraci je možné provést diskrétní konvolucí obrazu s vhodnou maskou [7], případně jejich násobením v obrazové oblasti po aplikaci diskrétní Fourierovy transformace.

Fúzování obrazů prostřednictvím **waveletových** algoritmů patří oproti předchozím mezi podstatně složitější a pokročilejší techniky. Všechny fúzované snímky jsou nejprve v každém RGB kanále podrobeny diskrétnímu waveletovému rozkladu na jednodušší funkce (koeficienty), které jsou následně fúzovány podle předem zvoleného fúzovacího pravidla. Tímto pravidlem se rozumí funkce rozděluje váhy mezi jednotlivé vstupní snímky podle toho, jakým způsobem z nich mají být ve výsledném snímku zkombinovány detaily (hrany a jiná prostorová informace s vyšší frekvencí) a aproximace (barevné textury). Zfúzované koeficienty jsou v poslední fázi zpětnou waveletovou transformací převedeny zpět na obrazová data. Celý proces, který je názorně ukázán na Obr. 4 (převzato z [8]), lze



**Obr. 4:** Schéma waveletové fúze dvou snímků

zjednodušeně matematicky popsat vzorcem (2) [8], kde  $I_1$  a  $I_2$  značí vstupní snímky,  $\phi$  vybrané fúzovací pravidlo,  $I$  výsledný snímek a  $w$  ( $w^{-1}$ ) diskrétní dopřednou, resp. inverzní waveletovou transformaci.

$$I(x, y) = w^{-1}(\phi(w(I_1(x, y)), w(I_2(x, y)))) \quad (2)$$

## 2.3 Super-resolution algoritmy

Super-resolution techniky patří mezi pokročilejší nástroje pro zkvalitňování a rekonstrukci obrazových dat. Výsledný HR obraz s vyšším rozlišením je v tomto případě výsledkem fúze většího počtu zaregistrovaných LR snímků stejného typu. Při řešení této práce byly použity dvě experimentálně vytvořené aplikace využívající vícekanálové super-resolution rekonstrukční algoritmy (vhodné i pro barevné snímky) – nástroj BSR [2] vyvíjený na Ústavu teorie informace a automatizace Akademie věd České republiky a MDSP resolution enhancement software [9], který byl vytvořen na University of Carolina. Obě aplikace jsou napsány jako roziřující toolboxy s grafickým rozhraním (GUI) pro programové prostředí MATLAB.

Nástroj **BSR** (hlouběji rozebraný v [10]) využívá kromě super-resolution také techniku slepé dekonvoluce, která dokáže automaticky identifikovat způsob degradace rozmazaného snímku a následně toto rozmazání odstranit. Funce slepé dekonvoluce je tak prakticky nezávislá na znalosti apriorní informace o typu a velikosti rozmazání snímků. Kombinací obou technik vzniká silný nástroj autory označovaný termínem *Blind Super-Resolution* [11].

**MDSP resolution enhancement software** implementuje několik typů algoritmů, jako je robust multi-frame super-resolution, fast dynamic super-resolution, atd. [12][13] Stejně jako BSR obsahuje některé techniky schopné do určité míry eliminovat rozmanění přítomné ve vstupních snímcích. V rámci této práce byla použita technika *Robust (Median Gradient) Super-Resolution* s  $L_2$  (Tikhonovovou) regularizací [12].



**Obr. 5:** Znáznornění super-resolution rekonstrukce sady dvaceti černobílých snímků

## 3. Aplikace algoritmů pro fúzi multispektrálních obrazů na termovizní data

V této sekci jsou ukázány a rozebrány výsledky, kterých bylo dosaženo aplikací fúzovacích metod popsaných v kapitole 2.2. Jako vstupní byl použit panchromatický snímek o rozměrech (2048×1536) px, odpovídající prostorovému rozlišení 3Mpx, a termogram o rozměrech (320×240) px.

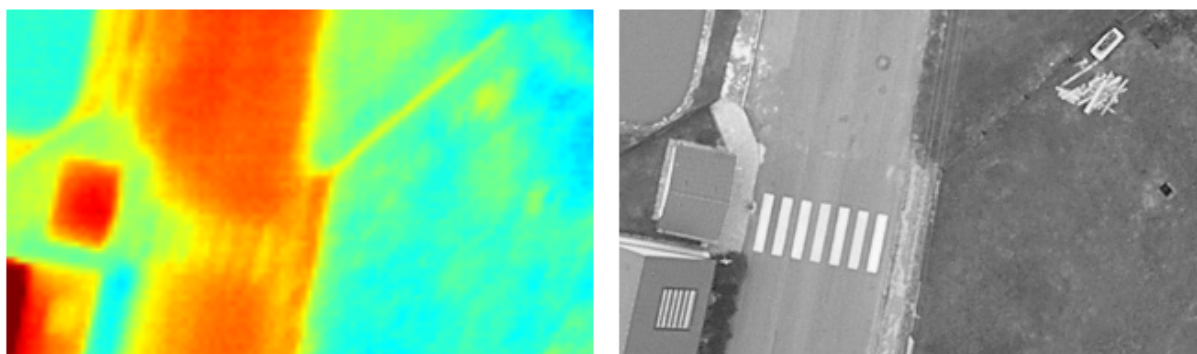
### 3.1 Stanovení způsobu vyhodnocování

Zvolení vhodných kvantitativních kritérií pro porovnání získaných snímků je v případě multispektrální fúze složitou záležitostí. V odborné literatuře se k tomuto účelu běžně používají statistické metody porovnání [6][14], drtivá většina z nich je však založena na rozdílu fúzovaného snímku oproti obrazu referenčnímu, který byl přímo pořízen ve vyšším rozlišení. V případě této aplikace, kdy je výstupní snímek výsledkem fúze obrazů z dvou

různých modalit (viditelné světlo a infračervené záření), však takovýto referenční snímek neexistuje. Hlavním kritériem kvality výsledného snímku tak bude vizuální zhodnocení přidané obrazové informace (hrany, detaily objektů) a zároveň zachování původní barevné struktury ploch (tj. informace o teplotním poli snímané scény).

### 3.2 Předzpracování dat

Po provedení registrace termogramu do souřadnicového systému panchromatického snímku (zvětšení je provedeno bikubickou interpolací teplotních hodnot) je černobílý obraz oříznut tak, aby vizuální obsah, který zachycuje, prostorově odpovídal obsahu termoviznímu. Na základě teplotních hodnot termogramu a odpovídající barevné škály je vytvořen nový barevný (RGB) snímek. Takto zpracovaná vstupní data (Obr. 6) je již možné podrobit výše popsanými fúzovacím technikám.



**Obr. 6:** Zvětšený termogram převedený do RGB podoby (vlevo), panchromatický snímek (vpravo)

### 3.3 Porovnání výsledků

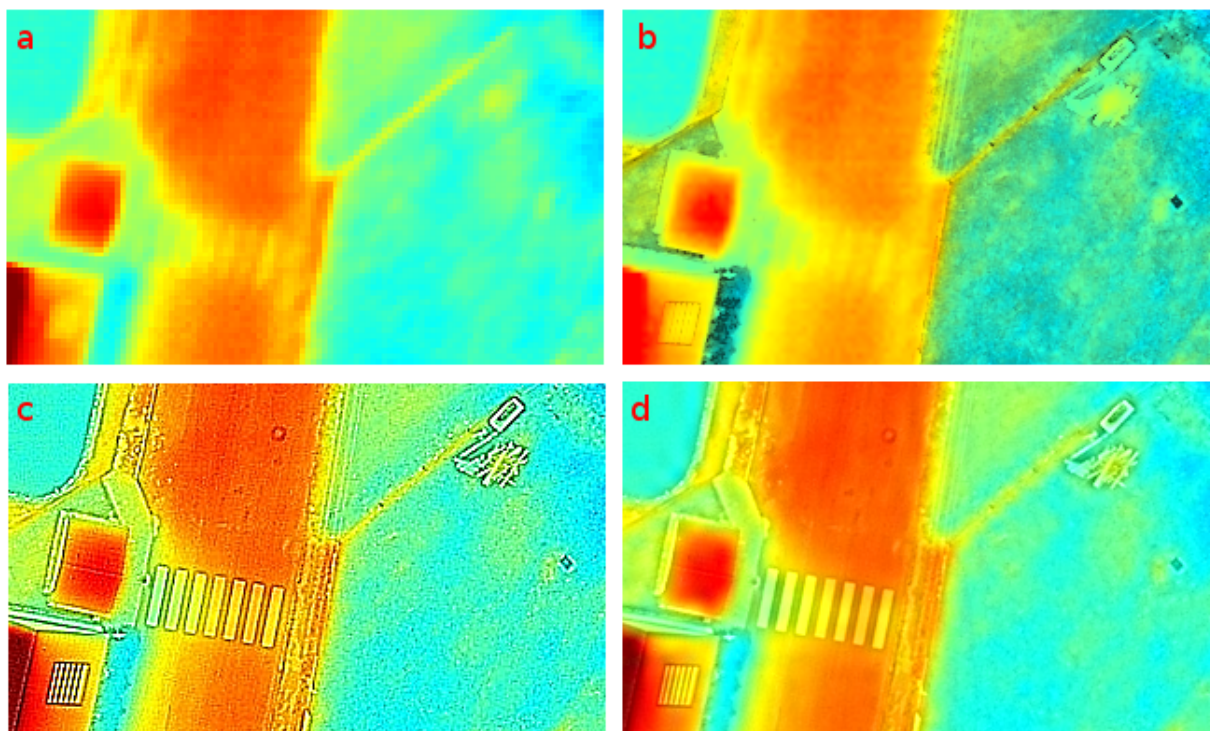
Výsledné snímky po fúzi upraveného termogramu s černobílým obrazem jsou na Obr. 7. U obrazu získaného aplikací IHS transformace (Obr. 7b) je patrné, že zkvalitnění prostorových detailů bylo dosaženo pouze v některých oblastech. Příčinou je pravděpodobně potlačení části informace při ekvalizaci panchromatického snímku. V některých částech obrazu navíc dochází k viditelnému zkreslení barevné (a tedy i teplotní) informace, což není žádoucí.

U termogramu doplněného o vysokofrekvenční signál, získaný high-pass filtrací panchromatického snímku, je oproti metodě IHS transformace dosaženo velice zajímavého výsledku. Při použití konvoluční masky s koeficienty dle (3) je výsledný snímek (Obr. 7c) obohacen o výrazné množství hran a prostorových detailů, zatímco výraznější ovlivnění barevných ploch je minimální (je přidávána pouze vysokofrekvenční informace).

$$\begin{pmatrix} -8/9 & -8/9 & -8/9 \\ -8/9 & 64/9 & -8/9 \\ -8/9 & -8/9 & -8/9 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Ostrost obrazových hran extrahovaných z panchromatického snímku lze ovlivnit modifikací konvoluční masky, kdy jsou při zvolení „ostřejších“ parametrů hrany výraznější, na druhou stranu tak zároveň dochází k nežádoucímu zvyšování hladiny obrazového šumu.

Poslední hodnocenou technikou je fúzování obrazu prostřednictvím waveletové dekompozice. Ke spojení snímků byly použity algoritmy implementované ve Wavelet Toolboxu MATLABu. Nejlepších výsledků dosahují dekompoziční waveletové techniky vyšších řádů rodiny *Daubechies* na třetí úrovni dekompozice (Obr. 7d). Uplatněné fúzovací pravidlo poměrně dobře doplňuje výsledný snímek o prostorové detaily a zachovává aproximace barevného obrazu. Z hlediska kvality je pozitivní také absence rušivého vysokofrekvenčního šumu. Nevýhodou takto zpracovaného obrazu může být vzor, který zanechává na větších barevných plochách pravoúhlý algoritmus waveletové transformace.



**Obr. 7:** Porovnání výsledných obrazů : původní (dvojnásobně zvětšený) termogram (a), výsledek IHS transformace (b), fúze high-pass filtrem (c), fúze waveletovou dekompozicí (d)

#### 4. Aplikace super-resolution algoritmů na termovizní data

Při aplikaci super-resolution nástrojů je pro fúzi použito většího počtu obrazových souborů stejného typu (v tomto případě šesti LR termogramů získaných během jednoho přeletu při leteckém snímání). Výstupem navržené procedury je potom termogram ve své původní teplotní reprezentaci. Oproti fúzovacímu principu uvedenému v minulé kapitole, kde mají výsledná data pouze obrazový (vizuální) charakter, má tento přístup velkou výhodou v tom, že vyfúzovaný termogram může být použit k dalšímu numerickému zpracování.

##### 4.1 Stanovení způsobu vyhodnocování

Kromě vizuálního porovnání výsledných snímků byly v tomto případě použity i některé statistické ukazatele uvedené v [14]. Jako referenční snímek pro výpočet pixelového rozdílu obrazů byl použit výřez termogramu v původním rozlišení, vstupní snímky pro fúzi byly zmenšeny na polovinu své velikosti a pomocí super-resolution algoritmů následně zvětšeny zpět na původní velikost. Mezi počítané ukazatele patří:

**Střední kvadratická chyba** (*mean square error*)

$$MSE = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [R(i, j) - F(i, j)]^2 \quad (4)$$

**Střední absolutní chyba** (*mean absolute error*)

$$MAE = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |R(i, j) - F(i, j)| \quad (5)$$

kde  $R(i,j)$  a  $F(i,j)$  značí referenční, resp. výsledný fúzovaný termogram,  $m$  a  $n$  jeho rozměry. Druhá mocnina rozdílu termogramů se výrazně zvětšuje s velkými hodnotami a naopak zvýhodňuje hodnoty menší než jedna, proto bylo pro porovnání použito také kritérium

uvážující absolutní hodnotu. V obou případech značí nižší hodnota výsledku větší podobnost obrazů.

Vzhledem k použití obrazové registrace vstupních termogramů se dá předpokládat, že v případě jejího nepřesného provedení budou negativně ovlivněny hodnoty uvedených kvantitativních ukazatelů, jejichž výpočet je založen na pixelovém rozdílu teplotních matic. Kvalita super-resolution rekonstrukce je proto v této práci posuzována také ze statistického hlediska podle relativních četností výskytu teplot na základě teplotních histogramů. Rozdíl relativních četností teplot oproti referenčnímu termogramu je následně kvantitativně posouzen na základě výpočtu střední kvadratické a absolutní chyby.

## 4.2 Předzpracování dat

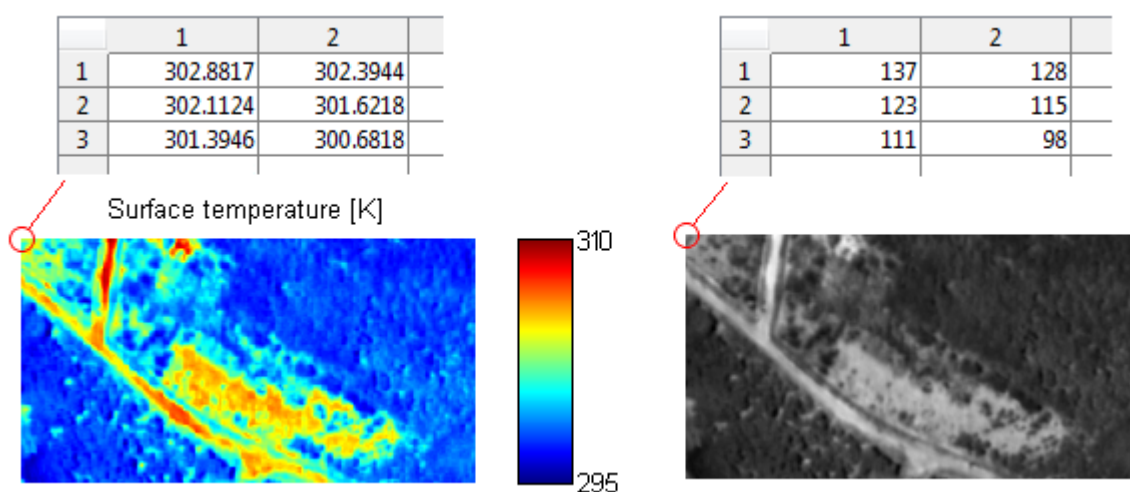
Podle výše uvedeného postupu bylo šest vstupních termogramů po zregistrování vhodně oříznuto a převzorkováno na poloviční rozměry (LR data). Aby mohla být teplotní data zpracována obrazovými algoritmy, bylo využito vizuálního charakteru termogramů a termovizní data byla přetransformována do formy černobílého obrázku. V tomto případě byla použita lineární transformace dle vztahu (6), kde  $T(i,j)$  je původní termogram,  $I(i,j)$  hodnota jasu černobílého obrazu,  $\Delta T$  šířka teplotního pásma  $\langle T_{MIN}, T_{MAX} \rangle$  a  $b$  bitová hloubka transformace.

$$I(i, j) = 2^b \frac{T(i, j) - T_{MIN}}{\Delta T} \quad (6)$$

Nežádoucím vedlejším účinkem této transformace je useknutí části teplotní informace, a tedy zmenšení přesnosti teplotních hodnot. Dosažitelná přesnost  $\delta$  závisí na rozsahu hodnot teplotního pole, které je v termogramech zachyceno a také bitové hloubce použité transformace. Přesnosti  $\delta$  lineární transformace teplot je definována vztahem (7).

$$\delta = \frac{\Delta T}{2^b} \quad (7)$$

Tato metoda je použitelná tehdy, jsou-li všechny hodnoty teplotního pole v přijatelně úzkém rozsahu, případně nejsou-li kladeny velké nároky na přesnost termovizních dat. V opačném případě by byla řešením transformace na obraz vyšší bitové hloubky nebo použití logaritmické stupnice, vyskytují-li se pouze ojedinělé teplotní výkyvy. Po provedení super-resolution rekonstrukce lze aplikovat inverzní transformaci a získaná obrazová data převést zpět do teplotní reprezentace.

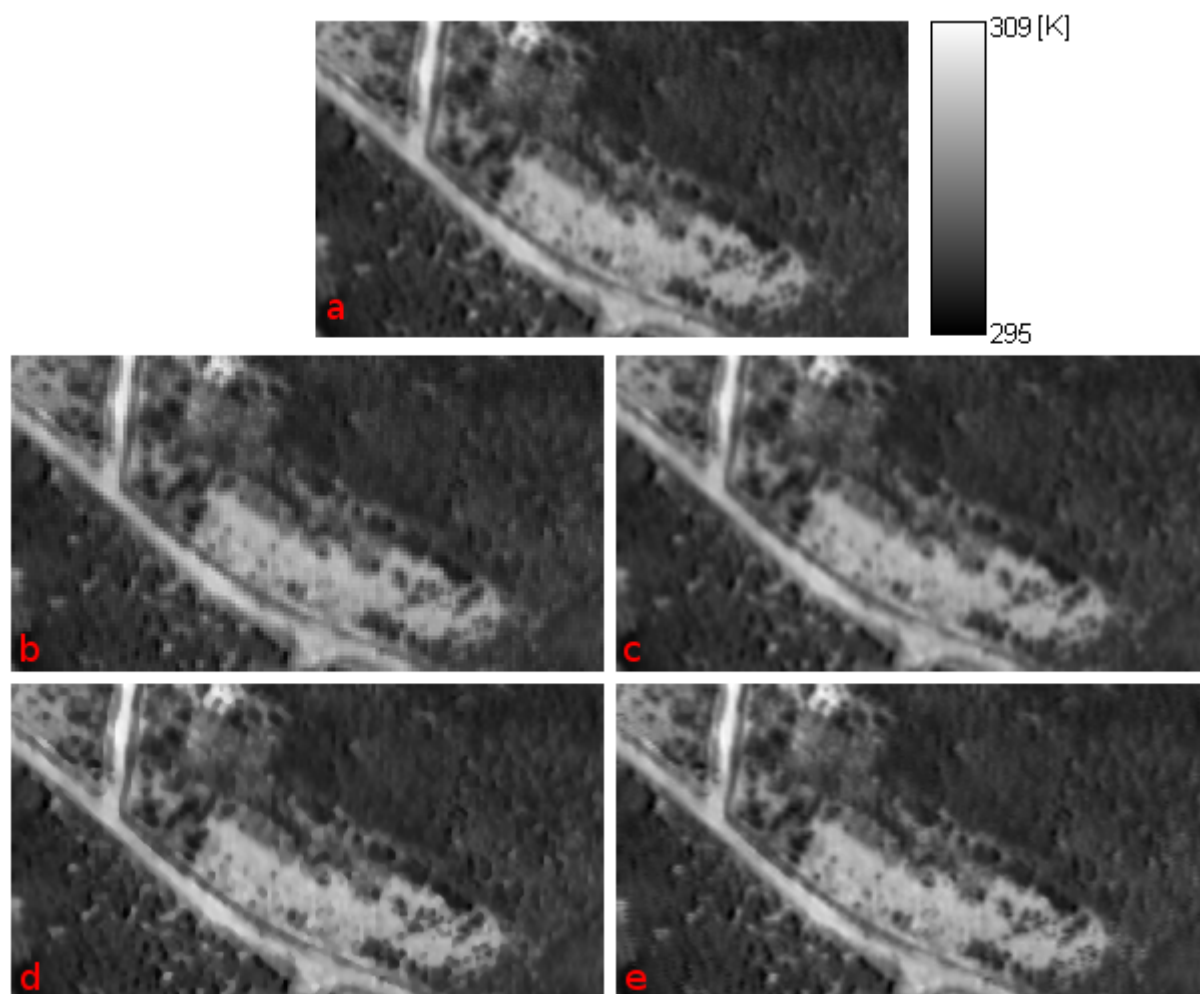


**Obr. 8:** Původní termovizní data (vlevo), černobílý snímek po transformaci (vpravo)

### 4.3 Porovnání výsledků

Výsledné rekonstrukce termogramů, kterých bylo docíleno fúzacími technikami Blind Super-Resolution (nástroje BSR) a Robust Median Gradient Super-Resolution (MDSP) jsou znázorněny na Obr. 9. Pro větší názornost jsou všechny termogramy zobrazeny v lineární stupnici šedi. Pro porovnání je zde zobrazen také termogram vytvořený bikubickou interpolací jednoho z LR snímků (Obr. 9c) a jeden ze vstupních snímků zvětšený na dvojnásobek (Obr. 9b). Funkce jednoduše aplikovatelné bikubické interpolace je založena na průměrování obrazu (princip dolnoproustního filtru), což způsobuje nežádoucí rozostřování přechodů v místech rychlejších teplotních změn (reprezentovaných obrazovými hranami). Tomu odpovídá i rozdílový termogram (Obr. 10a) s širšími hranami v místech rychlejších teplotních skoků.

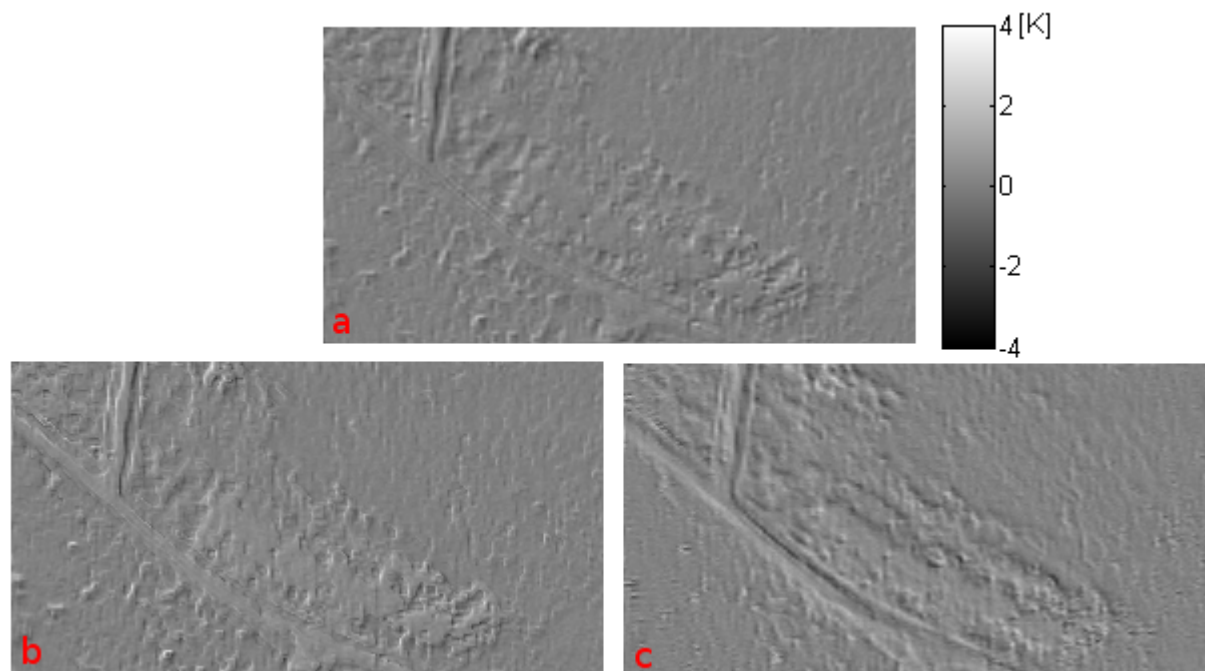
U termogramu získaného fúzováním nástrojem technikou Blind Super-Resolution jsou teplotní přechody mnohem lépe zvýrazněny, na druhou stranu je celková podobnost teplotního pole z hlediska rozdílu (viz. Tabulka 1) proti referenčnímu snímku menší (průměrný absolutní teplotní rozdíl 0,25K). Rozdílový termogram (Obr. 10b) je podobný jako v případě bikubické interpolace, hrany rozdílového reliéfu jsou v tomto případě ale mnohem ostřejší a častější, což odpovídá právě většímu zvýraznění míst s rychlými teplotními přechody ve výsledném termogramu. Totéž platí i pro data fúzovaná technikou Robust



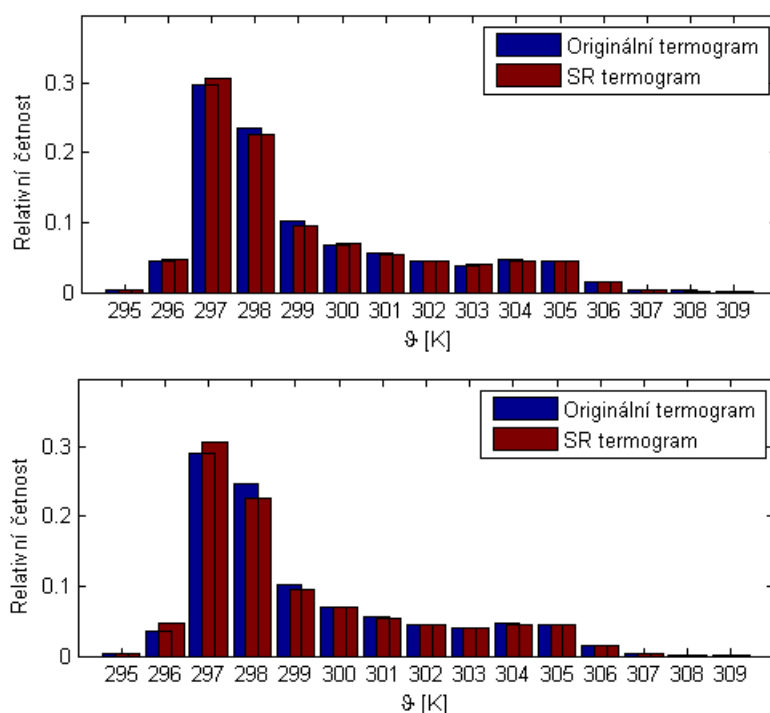
**Obr. 9:** Porovnání HR termogramů po super-resolution rekonstrukci: referenční HR obraz (a), jeden ze vstupních termogramů zvětšený na dvojnásobek původní velikosti (b), bikubická interpolace (c), Blind Super-Resolution (d) a Robust Median Gradient (e)

(Median Gradient) Super-Resolution, kde je ale rozdílový reliéf celkově výraznější a dochází tak ke kumulaci nepřesností. V levém a pravém dolním rohu zrekonstruovaného snímku jsou navíc patrné nežádoucí obrazové artefakty.

Z porovnání histogramů (Tabulka 1) vychází u všech sad testovaných snímků nejlépe snímek fúzovaný technikou Blind Super-Resolution (v tomto případě průměrný absolutní rozdíl četností teplot v rámci intervalů o šířce 1K pouze 0,23%).



**Obr. 10:** Rozdílové termogramy proti referenčnímu HR obrazu: bikubická interpolace (a), Blind Super-Resolution (b), Robust Median Gradient Super-Resolution (c)



**Obr. 11:** Histogram četností teplot: Blind Super-Resolution (nahore), Robust Median Gradient Super-Resolution (dole)

**Tabulka 1:** Vypočtené kvantitativní ukazatele porovnání termogramů a histogramů

|                                     |          | Pixelový rozdíl         |                         | Rozdíl Histogramů       |                         |
|-------------------------------------|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Technika                            | Ukazatel | MSE<br>$\times 10^{-1}$ | MAE<br>$\times 10^{-1}$ | MSE<br>$\times 10^{-5}$ | MAE<br>$\times 10^{-3}$ |
| Bikubická interpolace               |          | 0,9                     | 2,1                     | 3,9                     | 3,4                     |
| Blind Super-Resolution (BSR)        |          | 1,4                     | 2,5                     | 1,5                     | 2,3                     |
| Robust Median Gradient $L_2$ (MDSP) |          | 1,6                     | 2,8                     | 5,8                     | 3,9                     |

## 5. Závěr

V této práci byly shrnuty teoretické i praktické poznatky zjištěné a uplatněné během aplikace speciálních technik pro fúzování obrazových dat a super-resolution rekonstrukčních algoritmů na vybrané sady termografických dat v podobě leteckých snímků krajinných systémů. Na základě zvolených kvantitativních kritérií i subjektivního porovnání byla zhodocena a diskutována kvalita výsledků dosažených použitými metodami.

Z technik založených na principu multispektrální obrazové fúze bylo docíleno nejlepších výsledků při aplikaci algoritmů waveletové dekompozice a high-pass filtrování. Navržený přístup může být aplikován například pro usnadnění lokalizace míst s neobvyklými teplotami (vady izolace, místa unikajícího tepla, atd.) při vizuální inspekci termografických dat. Tímto způsobem získaná data však nemají ryze teplotní charakter a nejde je tak dále numericky zpracovávat.

Při aplikaci super-resolution algoritmů na sadu termovizních snímků bylo z hlediska vizuální rekonstrukce dosaženo nejlepších výsledků metodou Blind Super-Resolution. Relativně vysoké hodnoty spočtených kvantitativních ukazatelů, založených na pixelovém rozdílu proti ideálnímu termogramu, indikují u všech použitých technik nežádoucí zkreslení původních hodnot termovizních dat. To výrazně limituje možnost použití navržených metod v případech, kdy je třeba termografická data vyhodnocovat s vysokou přesností. Použité super-resolution techniky jsou navíc implementovány do algoritmů pro jednorázové zpracování obrazových dat, což znemožňuje jejich přímé použití pro „real-time“ aplikaci.

## Seznam použité literatury

- [1] Infrared camera technical specifications, 2011. FLIR Systems product literature. <http://www.flir.com/thermography/eurasia/en/content/?id=32017> (accessed March 10, 2011).
- [2] Šroubek, F.; Flusser, J. *Matlab Tool for Blind Superresolution* [CD-ROM]; ÚTIA AV ČR: Praha, 2006.
- [3] Zitová, B.; Flusser, J.; Šroubek, F. Image Registration: A Survey and Recent Advances. Presented at IEEE International Conference on Image Processing, Genoa, 9/2005.
- [4] Matas, J.; et al. Robust Wide Baseline Stereo from Maximally Stable Extremal Regions. In *Electronic Proceedings*, British Machine Vision Conference, Cardiff, 9/2002; Marshall, D., Rosin, P. L., Eds.; 2002; pp 384–393.
- [5] Novák, M. Termovizní měření vybrané lokality a zhodnocení SW nástroje Blind Superresolution. Semestrální projekt II, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2008.

- [6] Wang, Z.; et al. A Comparative Analysis of Image Fusion Methods. In *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 6/2005; Ruf, Ch., Ed.; 2005; pp 1391–1402.
- [7] Owens, R. Spatial domain methods, 1997. Computer Vision.  
[http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL\\_COPIES/OWENS/LECT5/node3.html](http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/OWENS/LECT5/node3.html)  
(accessed March 10, 2011).
- [8] Hill, P.; et al. Image Fusion using ComplexWavelets. In *Electronic Proceedings*, British Machine Vision Conference, Cardiff, 9/2002; Marshall, D., Rosin, P. L., Eds.; 2002; pp 487–496.
- [9] Farsiu, S. *MDSP resolution Enhancement Software User's Manual* [online]; University of California, 2004. <http://users.soe.ucsc.edu/~milanfar/software/SR-MANUAL-GUI.pdf>  
(accessed March 10, 2011).
- [10] Nosek, J. Fúrování obrazů s využitím aplikace BSR pro programové prostředí MATLAB. Bakalářská práce, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2009.
- [11] Šroubek, F.; Flusser, J.; et al. *Multiframe blind deconvolution coupled with frame registration and resolution enhancement* [online]; ÚTIA AV ČR: Praha, 2006.  
<http://dar.site.cas.cz/download.php?bd=394> (accessed March 10, 2011).
- [12] Farsiu, S.; Elad, M.; Robinson, D.; Milanfar, P. Fast and robust multi-frame super-resolution. Presented at IEEE Transactions Image Processing, 10/2004.
- [13] Farsiu, S.; Elad, M.; Robinson, D.; Milanfar, P. Fast dynamic super-resolution. Presented at Processings SPIE's Conference on Image Reconstruction from Incomplete Data, Denver, 8/2004.
- [14] Chan, J. Ch.-W.; et al. *A comparison of superresolution reconstruction methods for multiangle CHRIS/Proba images* [online]; Vrije Universiteit Brusse,  
[http://earth.esa.int/pub/ESA\\_DOC/PROBA/PROBA019.pdf](http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/PROBA/PROBA019.pdf) (accessed March 10, 2011).