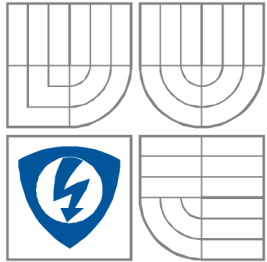


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

PRACOVNÍSTĚ TERMOVIZE

WORKSTATION WITH THERMO CAMERA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

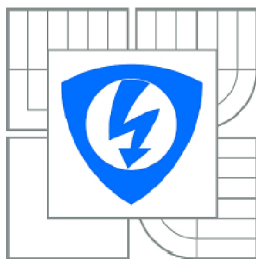
AUTHOR

Bc. MARTIN ZEMAN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MILOSLAV RICHTER, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Martin Zeman

ID: 72760

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Pracoviště termovize

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem studenta je zpracovat možnosti využití termokamery v oblasti počítačového vidění. Konkrétně se jedná o splnění těchto úkolů:

- teoretické zpracování literárních zdrojů - důležité pojmy, principy, vlastnosti, typické aplikace a jejich rozbor,
- průzkum trhu termovizních kamer - vlastnosti, výrobci, ceny,
- sestavení a oživení pracoviště termovize,
- návrh několika laboratorních úloh do kurzu MAPV včetně vyhotovení zadání,
- návrh několika bakalářských či diplomových prací. U vybraných minimálně tří vhodným experimentem ověřit řešitelnost, naznačit možné způsoby řešení a odhadnout odbornou a časovou náročnost.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Hlaváč, V., Šonka, M.: Počítačové vidění. Praha: Grada, 1992.

dále dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 23.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Miloslav Richter, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce obsahuje přehled fyzikálních vlastností, týkajících se termovize a snímání infračerveného záření a podrobného popisu měřicí soustavy. Dále jsou zmíněny konkrétní příklady použití termovize v praxi.

V druhé části práce je proveden průzkum trhu s termokamerami, včetně jednotlivých výrobců, modelů, jejich vlastností a cen. Termokamera, která byla pro tuto práci používána (Guide EasIR-4), je rozebrána podrobně.

Závěrem práce je návrh několika úloh vhodných pro cvičení vyučovaných předmětů počítačového vidění, včetně konkrétního návrhu pracovišť a řešení, a návrh tří zadání pro bakalářské nebo diplomové práce, včetně ověření řešitelnosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Termovize, termokamera, infrakamera, infračervené záření, termo, IR, teplo, počítačové vidění, teplota.

ABSTRACT

This thesis contains an overview of physical principles concerning thermography and infra-red sensing, and a specification of a measuring instrument in a measurement system. Next, there are some particular examples of IR sensing applications.

In the second part there is a thermal camera market research including individual manufacturers and models with their attributes and prices. There is a closer view of the thermal camera used for this thesis (Guide EasIR-4).

In the end of the thesis there are some drafts of computer vision subject tasks (or practices), including workplace designs and solutions, and three task suggestions for bachelor or diploma theses including solution verifications.

KEYWORDS

Thermography, thermal camera, IR, infra-red, sensing, heat, temperature, computer vision.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZEMAN, M. *Pracoviště termovize*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 66 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Miloslav Richter, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Pracoviště termovize jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne: **23. května 2011**

.....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svým vedoucím Ing. Iloně Kalové, Ph.D. a Ing. Miloslavu Richterovi, Ph.D. za odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Dále děkuji firmě MAMUT-THERM s.r.o. za zhotovení a dodání vzorků omítek.

OBSAH

1. ÚVOD.....	12
2. FYZIKÁLNÍ PRINCIPY.....	13
2.1 Teplo a teplota.....	13
2.2 Kondukce, konvekce a radiace.....	14
3. MĚŘICÍ SYSTÉM.....	16
3.1 Objekt a jeho povrch.....	16
3.2 Přenosové médium.....	18
3.3 Měřicí instrument.....	20
4. POUŽITÍ TERMOKAMER.....	23
4.1 Snímání budov.....	23
4.2 Řízení procesu.....	24
4.3 Výzkum a vývoj.....	26
4.4 Vládní systémy.....	27
4.5 Zdraví a lékařské aplikace.....	28
5. TRH S TERMOKAMERAMI.....	30
5.1 Flir.....	30
5.2 Fluke, Raytek.....	31
5.3 Guide.....	32
5.4 Chino Japan.....	33
5.5 Thermoteknix.....	33
5.6 Testo.....	34
6. INFRAKAMERA GUIDE EASIR-4.....	35
7. NÁVRHY ÚLOH PRO PŘEDMĚTY POČÍTAČOVÉHO VIDĚNÍ.....	39
7.1 Úloha č. 1 – Měření vzdálenosti pomocí termokamery.....	39
7.1.1 Zadání.....	39
7.1.2 Postup.....	39
7.1.3 Složení pracoviště.....	40
7.1.4 Řešení.....	40
7.2 Úloha č. 2 – Sledování tepelných vlastností omítek s použitím termokamery.....	42
7.2.1 Zadání.....	42
7.2.2 Postup.....	42

7.2.3 Složení pracoviště.....	42
7.2.4 Řešení.....	43
7.2.5 Možnosti úpravy úlohy.....	45
7.3 Úloha č. 3 – Experimenty s termokamerou.....	46
7.3.1 Zadání.....	46
7.3.2 Postup.....	46
7.3.3 Složení pracoviště.....	48
7.3.4 Řešení.....	48
8. NÁVRHY ÚLOH PRO BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	51
8.1 Diplomová práce - Detekce hlav a osob v obraze z termokamery.....	51
8.1.1 Zadání.....	51
8.1.2 Ověření řešitelnosti.....	51
8.1.3 Zhodnocení.....	53
8.2 Bakalářská práce – Snímání a defektoskopie plechů s použitím termokamery.....	54
8.2.1 Zadání.....	54
8.2.2 Ověření řešitelnosti.....	54
8.2.3 Zhodnocení.....	58
8.3 Diplomová práce - Sledování a vyhodnocení prokrvování rukou z jejich termogramů	
.....	59
8.3.1 Zadání.....	59
8.3.2 Ověření řešitelnosti.....	59
8.3.3 Zhodnocení.....	60
9. ZÁVĚR.....	62

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.2.1: IR oblast v elektromagnetickém spektru.....	14
Obr. 2.2.2: Složky radiace.....	15
Obr. 3.1: Měřicí systém.....	16
Obr. 3.2.1: IR atmosferický přenos pro 10m vzdálenost v nulové nadmořské výšce (50% relativní vlhkost).....	18
Obr. 3.2.2: Prostupnost materiálů, přenášejících IR záření.....	19
Obr. 3.3.1: Komponenty IR termokamery.....	20
Obr. 3.3.2: Mikrobolometr [9].....	21
Obr. 4.1.1: Špatné provedení spojů na budově [3].....	23
Obr. 4.1.2: Tepelné ztráty v důsledku špatné izolace (levá budova) a dobrá izolace bez tepelných ztrát (pravá budova) [3].....	24
Obr. 4.1.3: Vnitřní pohled na tepelné ztráty [3].....	24
Obr. 4.2.1: Tepelné ztráty na potrubí rozvodné sítě tepla [3].....	25
Obr. 4.2.2: Rozpoznání přehřívání spoje pojistkové skříně [3].....	26
Obr. 4.2.3: Rozpoznání přehřívání spoje pojistkové skříně – přehřátý spoj [3].....	26
Obr. 4.3.1: Termografie z vývoje mikrokontrolerů [2].....	27
Obr. 4.4.1: Noční sledování [4].....	27
Obr. 4.4.2: IR skenery na letištích [5], [6].....	28
Obr. 4.5.1: Rozpoznávání roztroušené sklerózy [2].....	28
Obr. 4.5.2: Termografie poprsí při onkologickém vyšetření rakoviny [2].....	29
Obr. 6.1: Dvojitý snímání scény kamerou GUIDE® EasIR-4.....	35
Obr. 6.2: Termokamera GUIDE® EasIR-4 [7].....	38
Obr. 7.1.1: Závislost naměřené teploty na vzdálenosti (modrá) a její regresní přímka (červená).....	41
Obr. 7.2.1: Snímek vzorků omítek pod halogenovou lampou.....	43
Obr. 7.2.2: Snímek vzorků omítek v otevřeném okně (levá část).....	43
Obr. 7.2.3: Snímek vzorků omítek v otevřeném okně (pravá část).....	44
Obr. 7.2.4: Snímek vzorků omítek bez předchozího nahřátí v otevřeném okně.....	44
Obr. 7.3.1: Vlevo snímek v klidu, vpravo po fyzické zátěži (první figurant).....	48
Obr. 7.3.2: Vlevo snímek v klidu, vpravo po fyzické zátěži (druhý figurant).....	49

Obr. 7.3.3: Termosnímek plechovky, obalené do poloviny lepicí páskou a naplněné horkou vodou.....	50
Obr. 7.3.4: Vliv vzdálenosti předmětu na měření termokamerou.....	50
Obr. 8.1.1: Nalezené hlavy v obraze.....	53
Obr. 8.2.1: Nahřátý nerezový plech s otvory a defektem od ruční brusky.....	55
Obr. 8.2.2: Nerezový plech, nahříváný zezadu, se zakrytými otvory.....	56
Obr. 8.2.3: Nerezový plech o různé tloušťce, nahříváný zezadu.....	56
Obr. 8.2.4: Nahřátý automobilový ráfek.....	57
Obr. 8.2.5: Hliníkový plech nasvícený zepředu pod úhlem, který neodráží teplo z reflektoru přímo do kamery.....	57
Obr. 8.2.6: Tři nahřáté plechy z různých materiálů (zleva nerez 0,6 mm, nerez 1,1 mm, hliník 0,9 mm).....	58
Obr. 8.3.1: Pracoviště pro sledování prokrvování ruky.....	60

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1: Emisivita některých materiálů při 0°C (od emivity při pokojové teplotě se téměř neliší) [10].....	17
Tab. 4.1: Stupně přehřívání spojů pojistkové skříně [1].....	25
Tab. 6.1: Technické specifikace termokamery GUIDE® EasIR-4 [7].....	37
Tab. 7.1: Naměřené hodnoty teplot plechovky v závislosti na její vzdálenosti od termokamery.....	40

1. ÚVOD

Tato práce seznámí čtenáře s principy infračerveného snímání a s celkovým použitím termokamer. Představí se zde základní informace o fyzice infračerveného snímání, měřicích systémech a konkrétních případech, kde se termokamery používají.

V druhé části práce je proveden průzkum trhu s termokamerami, včetně jednotlivých výrobců, modelů, jejich vlastností a cen. Termokamera, která byla pro tuto práci používána (Guide EasIR-4), je rozebrána podrobně.

Dále zde jsou zmíněny některé úlohy vhodné pro cvičení vyučovaných předmětů počítačového vidění, včetně konkrétního návrhu pracoviště a řešení, a několik návrhů zadání pro bakalářské nebo diplomové práce, včetně ověření řešitelnosti.

Ale nejdříve krátké historické pozadí termografie.

Kolem roku 1800 objevil britský astronom, technický expert a skladatel Sir Frederick William Herschel infračervenou radiaci. Nechal projít sluneční paprsek hranolem a měřil teplotu za hranicí červené složky viditelného záření. Přitom zjistil, že teplota v těchto místech byla vyšší než teplota uvnitř viditelné části světla. Z tohoto pokusu vyvodil, že musí existovat nějaká neviditelná složka světla za viditelným spektrem.

Dnes je velmi dobře známo, že ta neviditelná složka světla, o které Herschel mluvil, se nazývá infračervené světlo nebo infračervená radiace a je často používána pro měření teploty objektu na jeho povrchu.

2. FYZIKÁLNÍ PRINCIPY

V této kapitole budou přiblíženy základní fyzikální principy. Nejdříve půjde o pohled na teplo a fyzikální jednotky teploty. V druhé části bude popis tří druhů přenosu tepla – kondukce, konvekce a radiace.

2.1 TEPLA A TEPLOTA

Při infračerveném (IR – infrared) měření se měří distribuce tepelné energie (tepla), která je vyzařována z povrchu předmětu.

Teplo (Q [J]) je proces přenosu energie z jednoho systému do druhého v důsledku tepelného kontaktu. Přenáší se mezi systémy jako výsledek rozdílu teplot. Teplo vždy plyne ze systému s vyšší teplotou do systému s nižší teplotou. Tento přenos je popsán následující rovnicí:

$$Q = m c \Delta T \quad [J] \quad (2.1)$$

kde m [kg] je hmotnost systému, c [$J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$] je měrná tepelná kapacita a ΔT [K] je rozdíl teploty na začátku (T_1 [K]) a na konci (T_2 [K]) přechodného děje přenosu tepla ($\Delta T = T_2 - T_1$).

Teplota může být vyjádřena ve dvou různých stupnicích – anglická a metrická stupnice (systém) a může být buď relativní nebo absolutní. Vztahy mezi jednotlivými stupnicemi jsou vyjádřeny následujícími rovnicemi:

$$T_K = T_{\circ C} + 273,15 \quad [K] \quad (2.2)$$

$$T_{\circ C} = \frac{5}{9}(T_{\circ F} - 32) \quad [^{\circ}C] \quad (2.3)$$

$$T_{\circ Ra} = 1,8 \cdot T_K \quad [^{\circ}Ra] \quad (2.4)$$

kde T_K [K] je teplota v Kelvinech, $T_{\circ C}$ [$^{\circ}C$] je teplota ve stupních Celsia, $T_{\circ F}$ [$^{\circ}F$] je teplota ve stupních Fahrenheita a $T_{\circ Ra}$ [$^{\circ}Ra$] je teplota ve stupních Rankina. První dvě jednotky vyjadřují stupnice v metrickém systému, druhé dvě pak v anglickém.

Absolutní nula je vyjádřena teplotou nula Kelvinů nebo nula stupňů Rankina. [1]

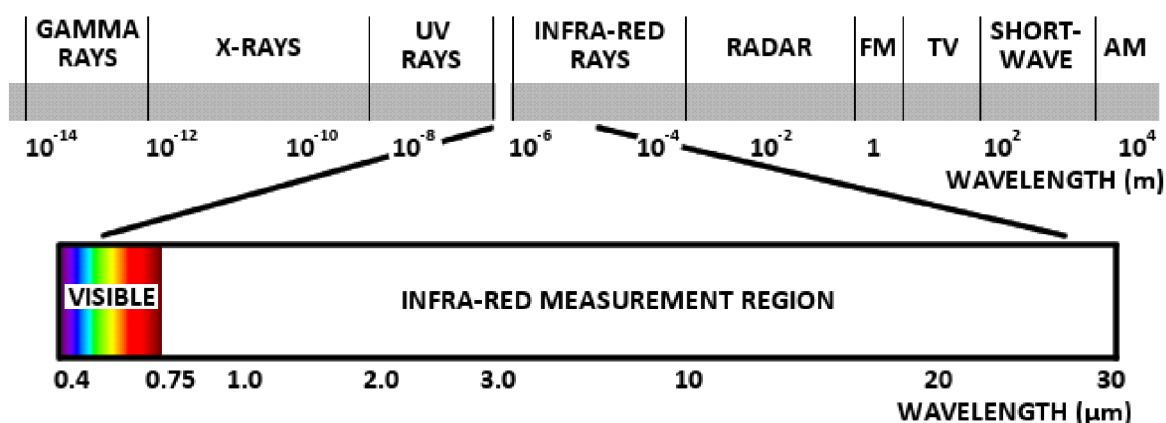
2.2 KONDUKCE, KONVEKCE A RADIACE

Existují tři způsoby přenosu tepla – kondukcce, konvekce a radiace.

Kondukcce (též vedení) je jediný typ tepelného přenosu, který se udává v pevných látkách (stejně jako v kapalných a plynných). Je to jednoduše přenos tepla ve stacionárním objektu nebo systému.

Konvekce (též proudění) je přenos tepla mezi pevou látkou a pohybující se kapalinou nebo plynem. Známe dva typy konvekce – přímé proudění kapalinou (nebo plynem) a proudění kapaliny (nebo plynu) přes povrch pevného objektu.

Radiace (vyzařování) je jev, kdy těleso s vyšší teplotou než okolí vyzařuje teplo a všechny tělesa s teplotou nižší toto teplo pohlcují. Od předchozích dvou typů přenosu tepla se radiace liší především v tom, že může nastat i ve vakuu.

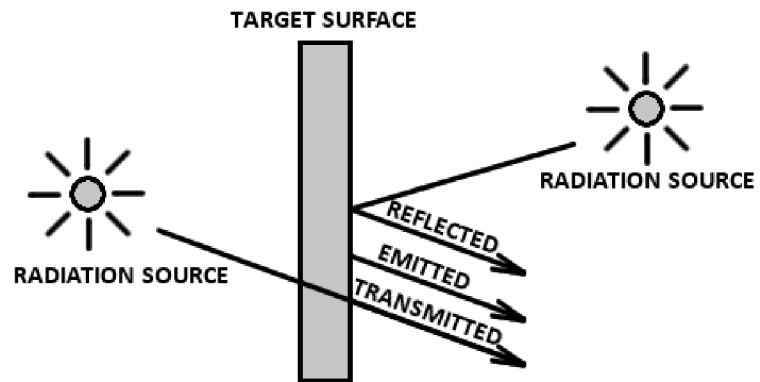


Obr. 2.2.1: IR oblast v elektromagnetickém spektru

Na Obr. 2.2.1 je znázorněné elektromagnetické spektrum. Přenos tepla vyzařováním se nachází v infračervené části spektra (od 0,75 μm do přibližně 100 μm). Nejvíce praktických měření se provádí v oblasti do 30 μm .

Princip bezkontaktního měření teploty a termografie je založen na měření termální infračervené radiace. „Termální IR radiace, opouštějící povrch tělesa, se nazývá zářivá exitance nebo radiozita. Může být vyzařována z povrchu, odrážena od povrchu nebo přenášena skrz povrch tělesa.“ [1]. Toto je znázorněno na Obr. 2.2.2. Celková radiozita je

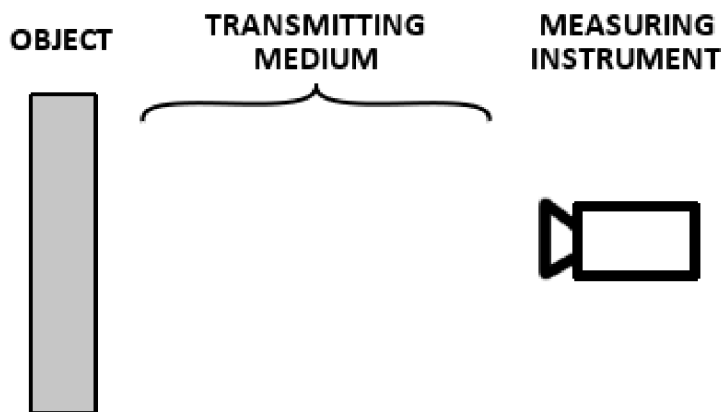
rovna součtu všech tří složek, ale teplota povrchu tělesa je závislá pouze na vyzařované složce. [1]



Obr. 2.2.2: Složky radiace

3. MĚŘICÍ SYSTÉM

Měřicí systém se skládá z objektu, přenosového média a měřicího instrumentu (teploměr IR záření). Celý systém je znázorněn na Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Měřicí systém

3.1 OBJEKT A JEHO POVRCH

Povrch každého objektu s teplotou vyšší než aboslutní nula (0 K) vyzařuje energii ve formě infračervených paprsků. Množství vyzařované energie je úměrné teplotě objektu – čím vyšší teplotu objekt má, tím více energie vyzařuje. Vlastnosti tohoto vyzařování popisuje Stephan-Boltzmannův zákon:

$$W = \varepsilon \sigma T^4 \quad [W m^{-2}] \quad (3.1)$$

kde $W [W m^{-2}]$ je energie vyzářená z povrchu tělesa, vztažená na jednotku plochy, $\varepsilon [-]$ je emisivita povrchu tělesa, $\sigma [W m^{-2} K^{-4}]$ je Stephan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$) a $T [K]$ je aboslutní teplota tělesa.

Emisivita charakterizuje schopnost tělesa, respektive jeho povrchu, vyzařovat teplo a nabývá hodnot od 0,0 do 1,0. Doplněkem emisivity do hodnoty 1,0 je reflektivita povrchu tělesa. Povrchy těles s vysokou emisivitou (nízkou reflektivitou) dobře vyzařují vlastní teplo a špatně odráží teplo z okolí. Naopak, povrchy těles s nízkou emisivitou (vysokou reflektivitou; zpravidla lesklé povrchy) dobře odráží teplo z okolí, čímž zkreslují hodnotu vlastní teploty. Hodnoty emisivit běžných materiálů jsou uvedeny v Tab. 3.1.

Materiál	Emisivita [-]	Materiál	Emisivita [-]
Cihla (červená)	0,85	Lidská kůže	0,98
Dřevo	0,90	Olejová barva	0,94
Galvanizovaná ocel	0,28	Papír	0,70-0,94
Glazovaný porcelán	0,92	Sklo	0,92
Guma	0,93	Sníh	0,83
Lepicí páska	0,95	Textil	0,90
Leštěná měď	0,01	Umělá hmota	0,85-0,95
Leštěný hliník	0,05	Voda	0,98

Tab. 3.1: Emisivita některých materiálů při 0°C (od emivity při pokojové teplotě se téměř neliší) [10]

Velmi teplá tělesa vyzařují energii i ve viditelné části světelného spektra. Slunce (6000 K) nebo wolframová žárovka (3000 K) jsou dobrými příklady této propozice. To znamená, že vlnová délka energie, kterou povrch tělesa vyzařuje, se prodlužuje s tím, jak se objekt ochlazuje. Toto chování popisuje Wienův posunovací zákon:

$$\lambda_m = \frac{b}{T} \quad [m] \quad (3.2)$$

kde $\lambda_m [m]$ je vlnová délka maximální radiace, $b [m \cdot K]$ je Wienova konstanta ($b = 2,8977685 \cdot 10^{-3} m \cdot K$) a $T [K]$ je absolutní teplota tělesa. Tato jednoduchá rovnice je potřebná ke zvolení správného měřicího instrumentu nebo termokamery.

Problém může nastat při měření teplot objektů s různými barvami povrchu. Podle barvy povrchu rozdělujeme objekty do tří kategorií: černá tělesa, šedá tělesa a tzv. nešedá tělesa.

Černé těleso má teoretický povrch s konstantní emivitou přes všechny vlnové délky a absorbuje veškerou energii na svém povrchu. Neodráží ani nepřenáší žádnou energii, takže termokamera vidí jen energii vyzařovanou. Tato kategorie objektů je jen teoretická a v praxi neexistuje.

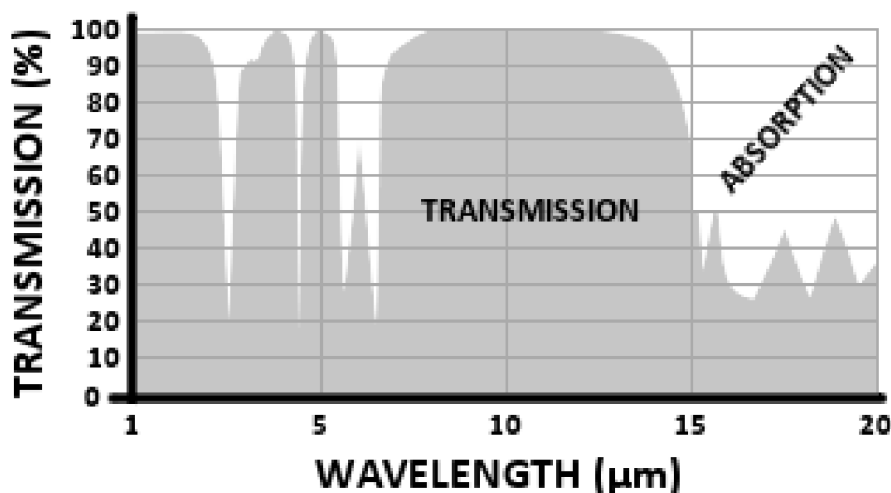
Většina pevných těles je charakterizována jako šedé těleso s vysokou emivitou, která je téměř konstantní pro všechny vlnové délky. Šedá tělesa nepřenášejí žádnou energii, takže termokamera vidí pouze vyzařovanou a odraženou složku radiozity. Když je

emisivita příliš nízká (např. leštěný kovový povrch), odrazivost se zvýší a může vnést do měření nepřesnosti.

Nešedá tělesa mohou být problematická, protože jejich emisivita není s vlnovou délkou konstantní a jimi vyzařovaná energie se pro některé vlnové délky blíží nule. Tento typ objektů se může jevit jako částečně průhledný, protože měřicí instrument vidí všechny tři složky radiace (viz Obr. 2.2.2), což znamená, že zde existuje ještě jedna rušivá energie. [1]

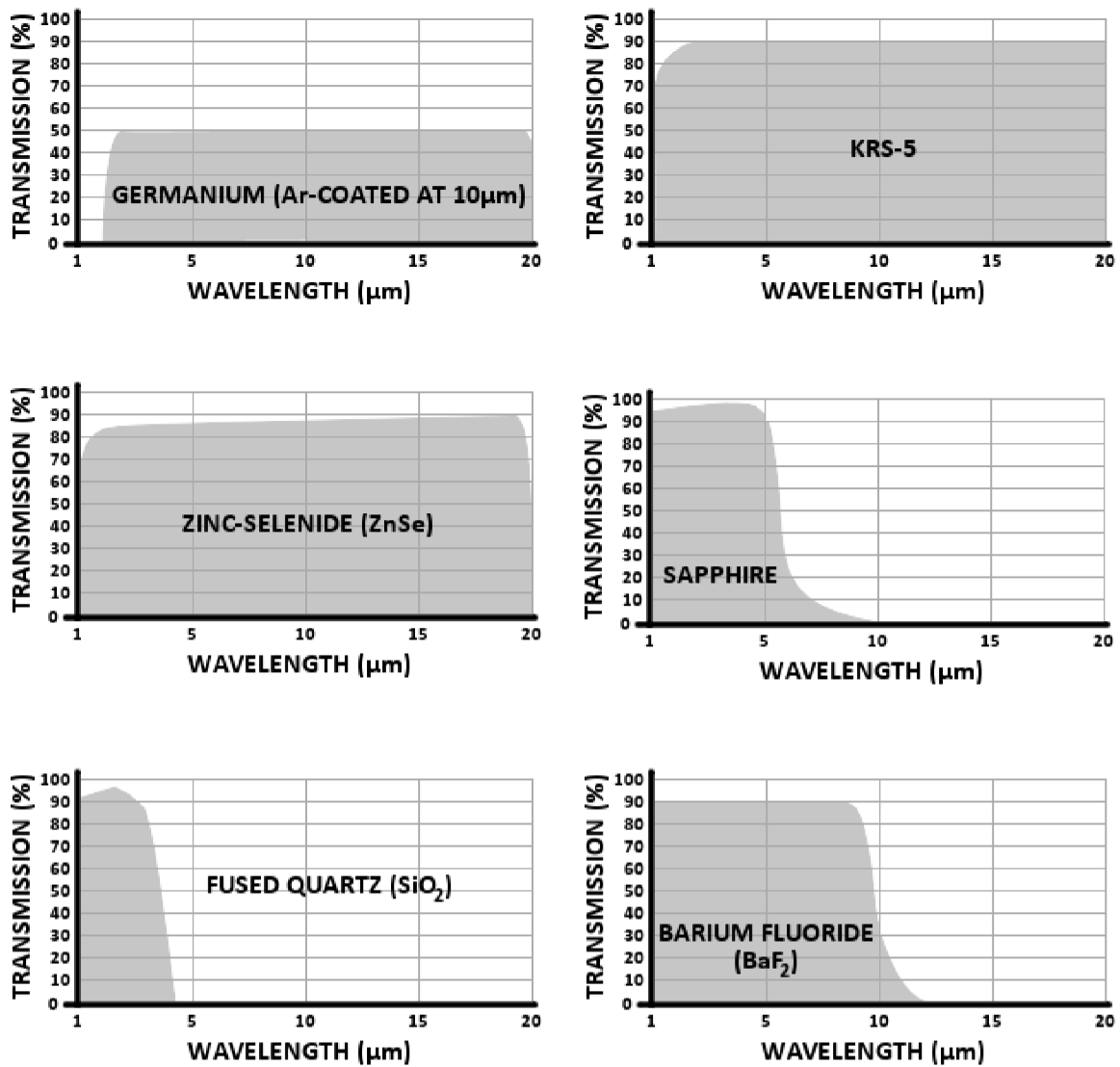
3.2 PŘENOSOVÉ MÉDIUM

Protože měření s termokamerami je bezkontaktní měření, musíme vzít v úvahu i přenosové charakteristiky média mezi měřeným objektem a kamerou. Pokud je přenosovým médiem vakuum, nedojde k žádné ztrátě energie. Pro malé vzdálenosti většina plynů, včetně zemské atmosféry, absorbuje nepatrné množství energie, které může být zanedbáno, pokud nemáme požadavky na vysoce přesné měření. Na větší vzdálenosti může být ztráta energie značná. Stejný efekt může mít měření v těžším nebo hustším vzduchu. Obr. 3.2.1 ukazuje spektrální přenosovou charakteristiku vzduchu při hladině moře pro měřicí vzdálenost 10 m.



Obr. 3.2.1: IR atmosférický přenos pro 10m vzdálenost v nulové nadmořské výšce (50% relativní vlhkost)

IR přenos je vysoký ve dvou spektrálních intervalech. Tyto intervaly se označují 1–5 μm a 8–14 μm atmosferická okna a téměř všechny termokamery mají své operační rozsahy uvnitř jednoho z těchto oken.



Obr. 3.2.2: Prostupnost materiálů, přenášejících IR záření

Kromě atmosféry mohou být v cestě mezi objektem a měřicím instrumentem přítomna i jiná média. Typickými příklady je sklo okna nebo kamerové čočky. Přenosové charakteristiky některých typů skla a křemene jsou vyobrazeny na Obr. 3.2.2. Běžné okenní sklo je složeno z oxidu křemičitého (SiO₂), který přenáší pouze krátké vlnové délky, odpovídající vyšším teplotám. Tím pádem je potřeba eliminovat přítomnost skla v

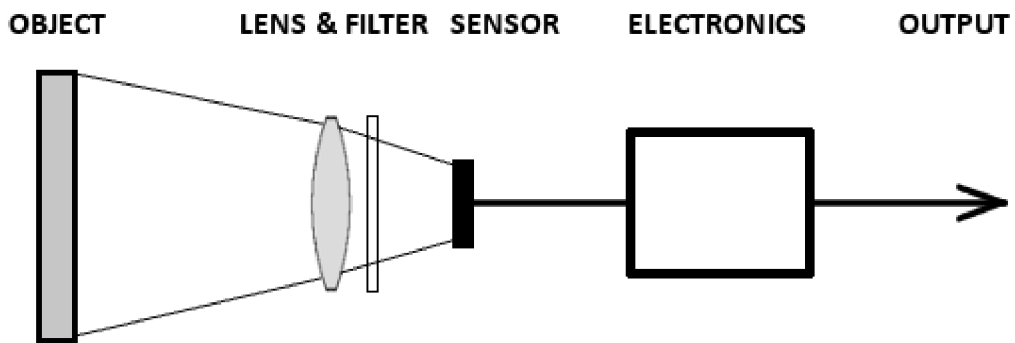
měřicím aparátu, pokud měříme nízké teploty. Samozřejmě, že nelze odstranit čočky kamery, takže pro tyto účely se používají čočky z jiných materiálů, jako je třeba germanium. [1]

3.3 MĚŘICÍ INSTRUMENT

Měřicí instrument se skládá z optiky (čočky a filtry), senzoru a vnitřní elektroniky. Všechny komponenty jsou ilustrované na Obr. 3.3.1.

Samotné čočky byly zmíněny v kapitole 3.2. Slouží k soustředění svazku paprsků energie z povrchu tělesa na povrch senzoru záření.

„8–14 μm (respektive 1–5 μm) filtr omezuje spektrální pásmo energie dopadající na senzor, takže se 'vejde' do atmosferického okna.“ [1]



Obr. 3.3.1: Komponenty IR termokamery

Snímač konvertuje IR záření na stejnosměrný proud, který je následně vnitřní elektronikou zesílen a připraven pro výstup.

Používají se tři hlavní metody měření (skenování):

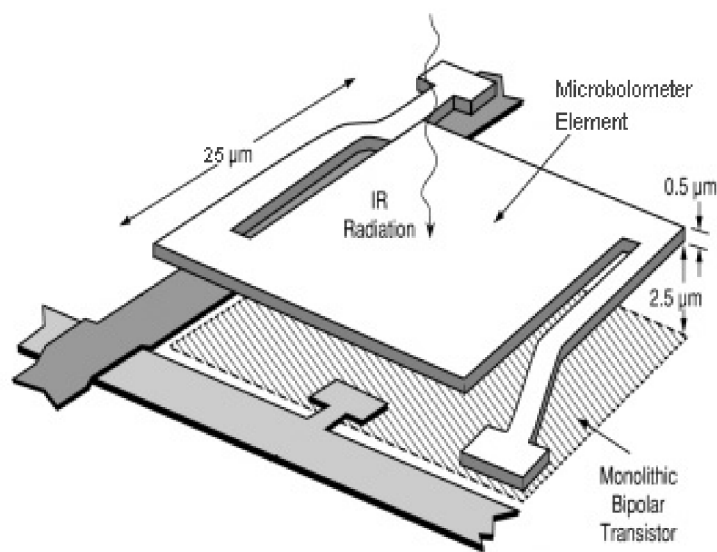
- Řádkové skenování – jeden snímací element a skenovací zrcadlo, nebo lineární detektorové pole, které je namířeno na povrch měřeného objektu. Tato metoda se používá především pro měření teplotních změn pohybujícího se tělesa v závislosti na jeho poloze.
- Dvourozměrné opto-mechanické skenování – lineární skener se pohybuje nad povrchem tělesa, takže dostaneme 2D obraz. Tato metoda byla téměř

vytlačena instrumenty používajícími dvoudimenzionální pole (IR focal plane array).

- IRFPA (infra-red focal plane array) – 2D skener. Toto je nejrozšířenější metoda a používá se téměř ve všech komerčních IR kamerách i pro vojenské účely. Rozlišení IRFPA kamery se pohybuje mezi 0,02–0,2°C.

IR detektory jsou dvojího druhu – termální detektory a fotodetektory. Termální detektory mají „menší citlivosti a pomalejší odezvu (v řádu milisekund)“ [1]. Jejich operační teplota je při nebo poblíž pokojové teploty. Fotodetektory mají „vyšší maximální citlivosti a rychlejší odezvu (v řádu mikrosekund)“ [1], ale pro optimalizaci jejich výkonu je potřeba je chladit na nižší pracovní teploty (např. HgCdTe detektor je chlazen na 77 K pro měření v 8–14 μm atmosferickém okně a na 195 K pro měření v 3–5 μm okně). Pro chlazení se využívá Stirlingova cyklu nebo tekutého dusíku.

V běžných termokamerách se jako snímací prvky používají bolometry, lépe řečeno mikrobolometry (viz Obr. 3.3.2). Mikrobolometr je pole mikroskopických senzorů, které jsou citlivé na infračervené záření určitých vlnových délek. Každý takový element má rozměry přibližně 25 \times 25 μm . Infračervené záření, dopadající na každý bolometrický element, způsobuje zvýšení jeho teploty a tím i změnu jeho elektrického odporu. Tato změna odporu je změřena a přepočtena na teplotu, která může být graficky znázorněna pomocí infračerveného obrázku (termogramu).



Obr. 3.3.2: Mikrobolometr [9]

Mikrobolometry jsou nechlazené termální senzory, přesto jsou schopné produkovat kvalitní infračervené snímky. Použití fotodetektorů, jako je InSb nebo HgCdTe, by sice zvýšilo citlivost, ale vyžadovalo by chlazení senzoru na velmi nízké teploty. To by samozřejmě vedlo ke zvýšení ceny takovýchto snímačů, zhoršení jednoduchosti používání a častější a dražší údržbě. [9]

4. POUŽITÍ TERMOKAMER

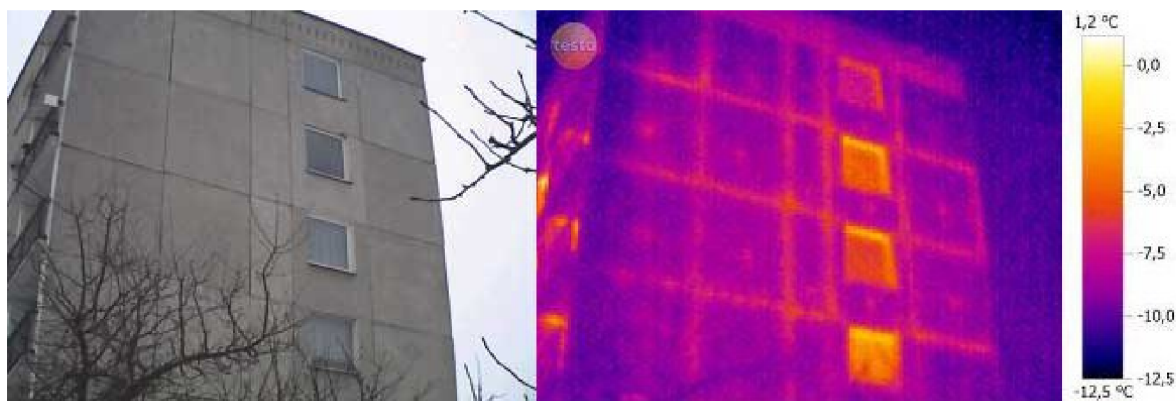
Termokamery nebo IR termální snímání a zobrazování (termografie) může být použito téměř v každém průmyslu. Množství způsobů, jak infračervené kamery používat, je tak velké, že v této kapitole budou odhaleny jen některé z nich. Budou rozděleny do pěti větví – snímání budov, řízení procesu, výzkum a vývoj, vládní systémy a zdraví a lékařské aplikace.

4.1 SNÍMÁNÍ BUDOV

Budovy a struktury jsou jedno z prvních odvětví, kde bylo snímání IR záření použito. Termografie ve stavebním průmyslu nabízí rychlý a bezkontaktní průzkum rozložení teplot na povrchu budov. Používá se především pro detekci míst pláštěů s největšími tepelnými ztrátami v důsledku tzv. termálních mostů nebo v důsledku špatného provedení spojů.

Infračervené snímání budov může být provedeno v závislosti na počasí, nejčastěji v období od listopadu do března.

Příklady monitorování budov jsou zobrazeny na Obr. 4.1.1, Obr. 4.1.2 a Obr. 4.1.3.



Obr. 4.1.1: Špatné provedení spojů na budově [3]



Obr. 4.1.2: Tepelné ztráty v důsledku špatné izolace (levá budova) a dobrá izolace bez tepelných ztrát (pravá budova) [3]



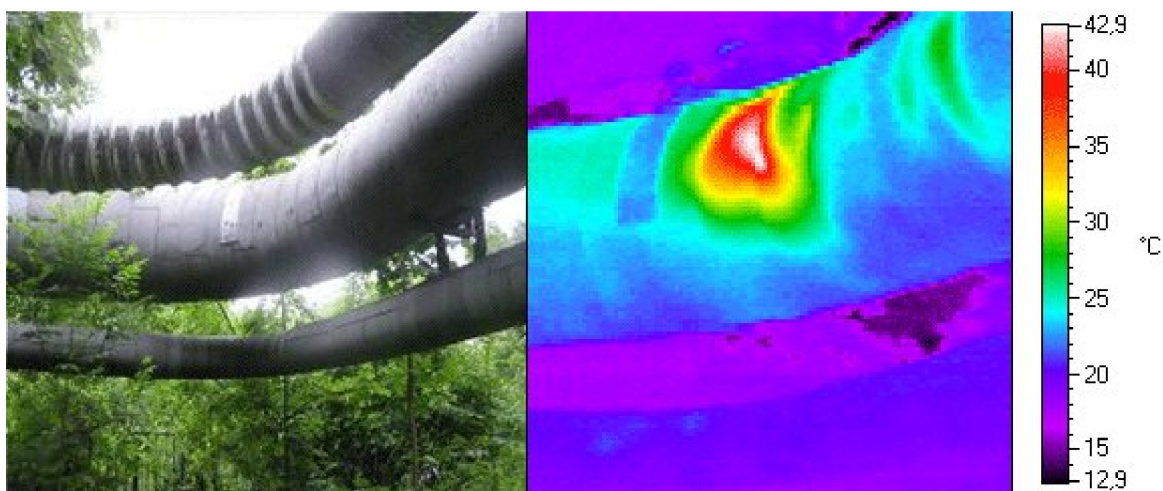
Obr. 4.1.3: Vnitřní pohled na tepelné ztráty [3]

4.2 ŘÍZENÍ PROCESU

Použití termografie v tomto oboru je tak široké, že je téměř nemožné vysvětlit každý případ. IR snímání v řízení procesu je důležité, pokud má být systém bezztrátový. Určitě to stojí za investici.

Výhodou IR termografie v řízení procesu je fakt, že může být provedena „on-line“, bez jakékoliv potřeby odstávky systému nebo přerušení procesu.

Obr. 4.2.1 až Obr. 4.2.3 ukazují některé příklady.



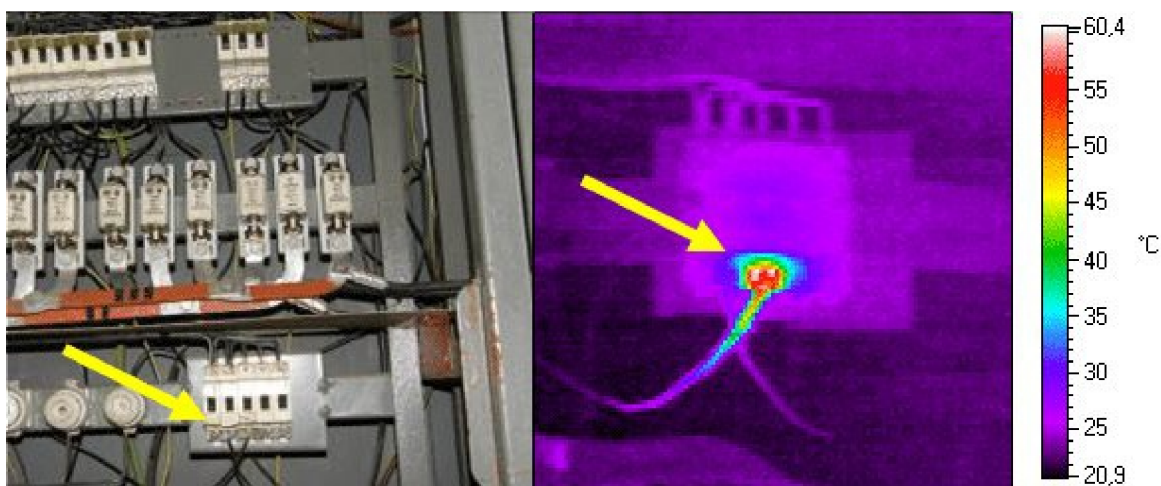
Obr. 4.2.1: Tepelné ztráty na potrubí rozvodné sítě tepla [3]

Mnoho způsobů použití IR kamer lze nalézt i v elektrotechnickém průmyslu. Detekce přehřívání pojistkové skříně je jedním z nich (viz Obr. 4.2.2 a Obr. 4.2.3). Teplota spojů by neměla být mnohem vyšší než teplota vodiče. V praxi se míra přehřívání dělí do čtyř stupňů:

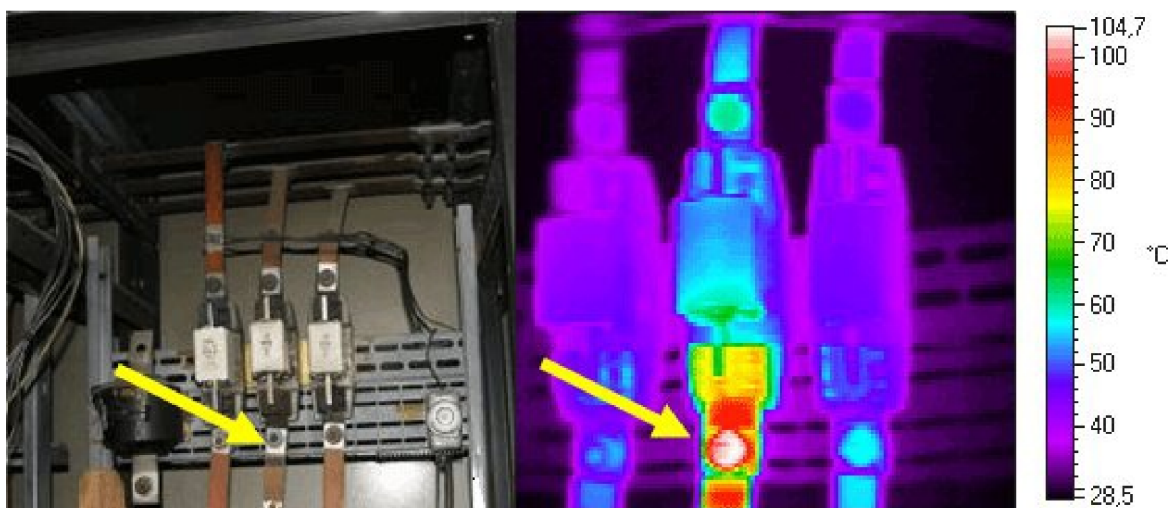
Klasifikační stupeň	Rozsah teplot	Akce
Stupeň I.	$0\text{ }^{\circ}\text{C} < \Delta t < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	Žádná akce
Stupeň II.	$10\text{ }^{\circ}\text{C} < \Delta t < 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	Oprava při příští údržbě
Stupeň III.	$35\text{ }^{\circ}\text{C} < \Delta t < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	Oprava do měsíce
Stupeň IV.	$100\text{ }^{\circ}\text{C} < \Delta t$	Okamžitá oprava

Tab. 4.1: Stupně přehřívání spojů pojistkové skříně [1]

kde Δt [$^{\circ}\text{C}$] je rozdíl teploty spoje a teploty vodiče.



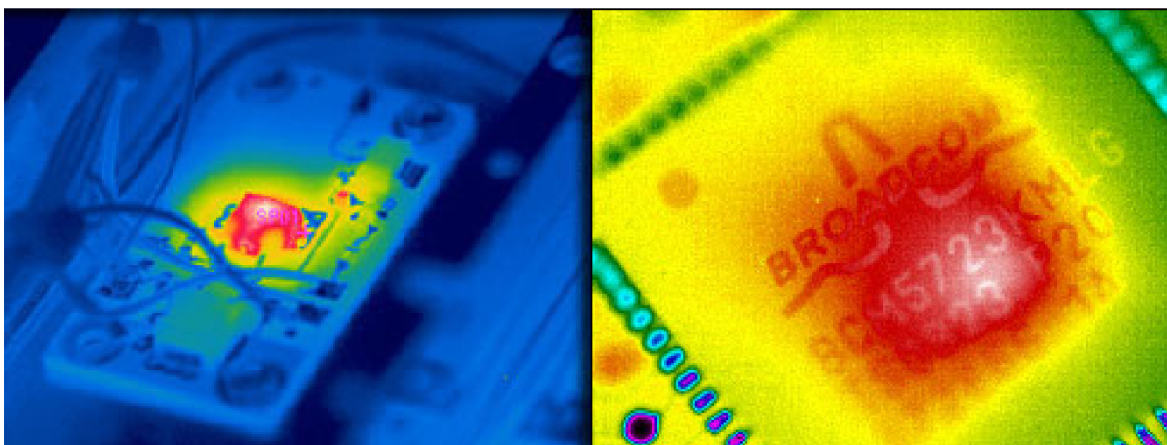
Obr. 4.2.2: Rozpoznání přehřívání spoje pojistkové skříně [3]



Obr. 4.2.3: Rozpoznání přehřívání spoje pojistkové skříně – přehřátý spoj [3]

4.3 VÝZKUM A VÝVOJ

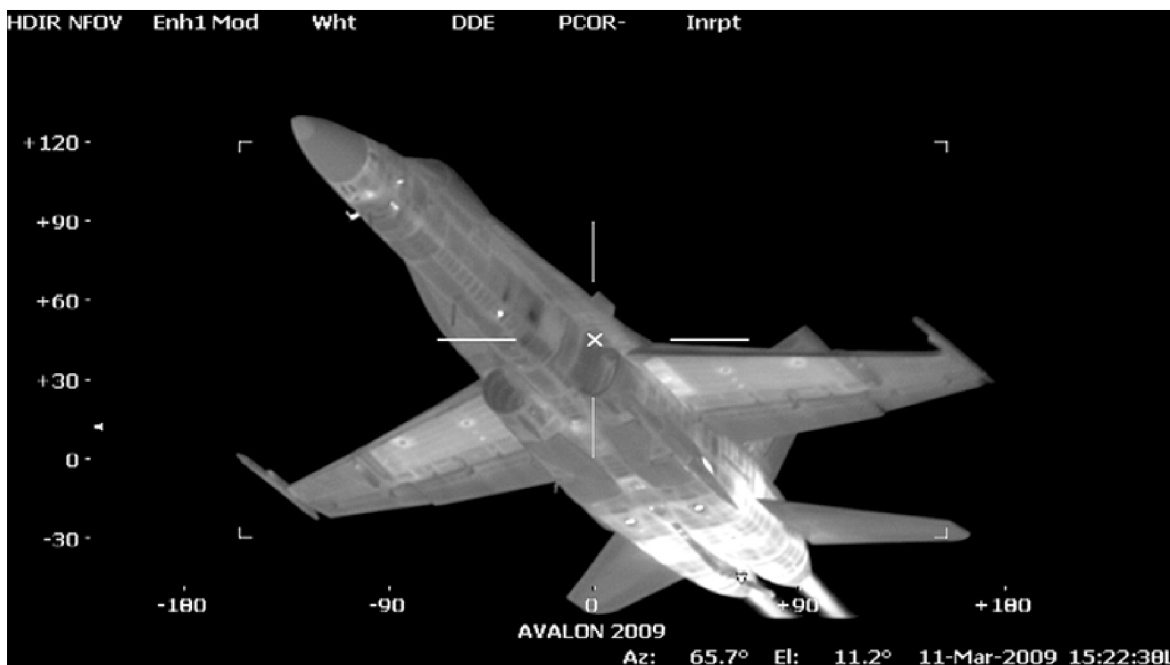
Velmi malé a extrémně citlivé termální snímání je potřeba pro použití v aplikacích z oblastí výzkumu a vývoje. Tento měřicí instrument by měl umožnit komukoliv „zobrazit a provést kvantitativní analýzu termálních obrazů zařízení a materiálů, které navrhují, vyrábí nebo testují“ [2]. Na Obr. 4.3.1 jsou příklady infračerveného snímání při vývoji mikrokontrolerů.



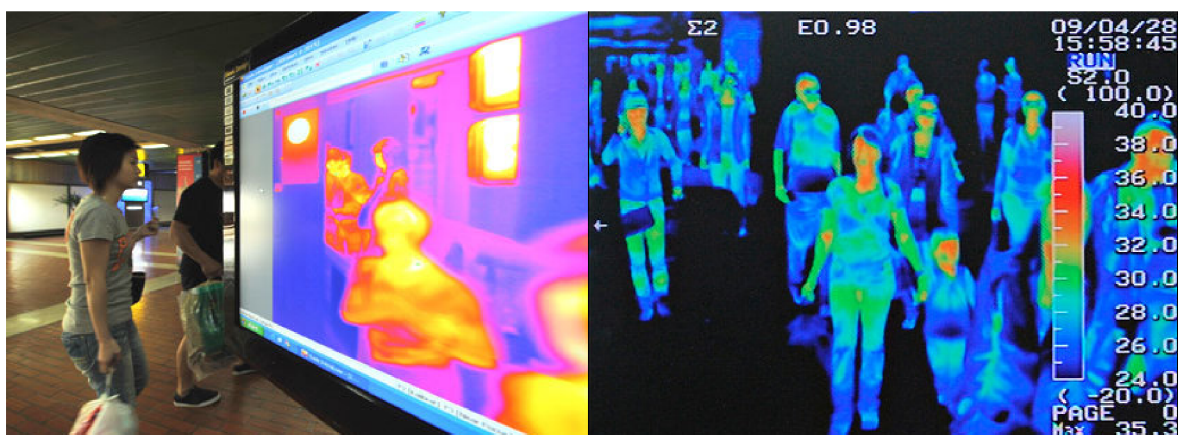
Obr. 4.3.1: Termografie z vývoje mikrokontrolerů [2]

4.4 VLÁDNÍ SYSTÉMY

Například americká vláda využívá termografii už od osmdesátých let. V tomto průmyslu jsou IR kamery používány především proto, aby mohla armáda a policie pracovat v noci nebo v podmínkách se sníženou viditelností. Jiným použitím jsou letiště po celém světě, kde se termokamerami hledají viry (jako ptačí chřipka nebo prasečí chřipka).



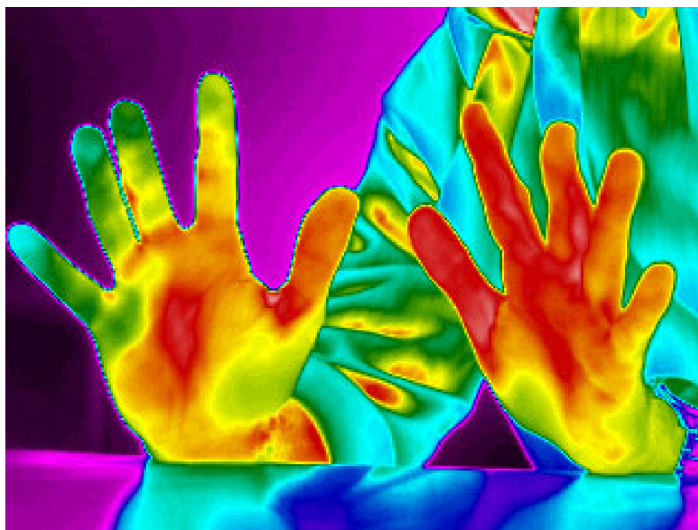
Obr. 4.4.1: Noční sledování [4]



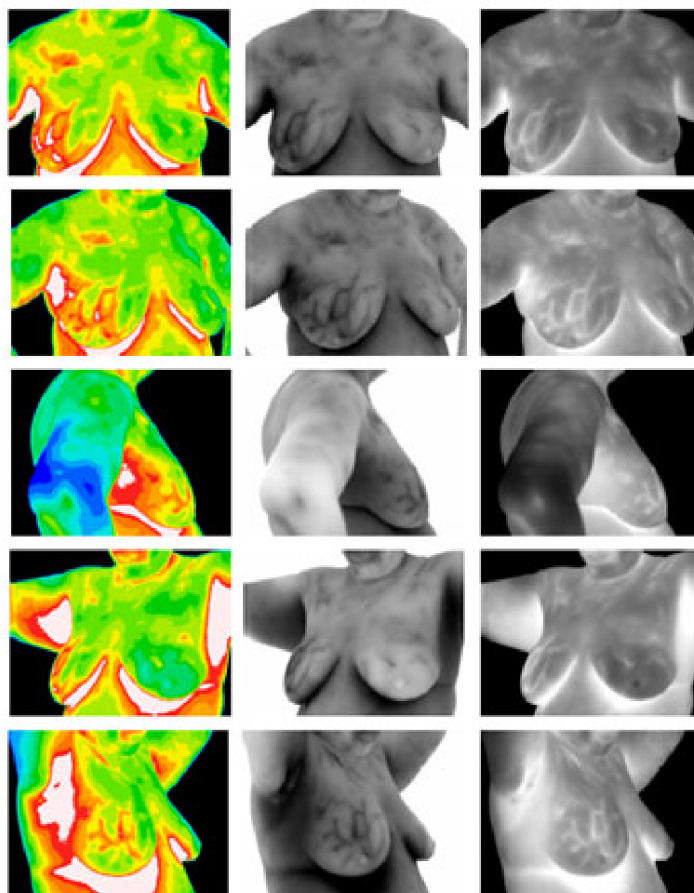
Obr. 4.4.2: IR skenery na letištích [5], [6]

4.5 ZDRAVÍ A LÉKAŘSKÉ APLIKACE

Rychlost rozpoznání chorob se za posledních několik let zvýšila. Termografie je vynikajícím pomocníkem, pokud má být nemoc zjištěna včas. Nejčastějším použitím IR kamer v medicíně je rozpoznání symptomů roztroušené sklerózy, zánětu hlubokých žil, migrénních bolestí hlavy, zubních infekcí nebo virových onemocnění. Lze je použít i při onkologických vyšetřeních rakoviny nebo veterinárních operacích. Obr. 4.5.1 a Obr. 4.5.2 ukazují některé příklady.



Obr. 4.5.1: Rozpoznávání roztroušené sklerózy [2]



Obr. 4.5.2: Termografie poprsí při onkologickém vyšetření rakoviny [2]

5. TRH S TERMOKAMERAMI

V České republice se dají nejjednodušeji zakoupit termokamery značek Flir, Fluke (Raytek), Guide, Chino Japan, Thermoteknix, a Testo. Níže je uvedeno více informací o každém výrobcí, včetně přehledu jeho produktů. Všechny ceny uvedené v této kapitole jsou bez DPH.

5.1 FLIR

Americká firma FLIR je asi největším a nejrozšířenějším výrobcem termovizní techniky a její výrobou a distribucí se zabývá už od roku 1978. Svým působením nepokrývá pouze soukromý sektor prodejem termokamer pro průmyslové aplikace, sledování budov, automatizaci a další, ale vyvíjí i systémy pro komerční využití, jako je ochrana budov, hranic, námořní vyhledávací systémy a speciální sledovací zařízení pro použití v automobilech. Nemalou částí pokrývá i vládní sektor, především zařízeními pro armádu a policii.

- **A řada** - fixní typy kamer pro průmysl a automatizaci, plně ovládané z PC, připojitelné pomocí 100Mbit (resp. 1Gbit) ethernetového kabelu, digitálního vstupu/výstupu nebo USB. Rozlišení čipu je 320×240 px (resp. 640×480 px – pouze A615). Tyto kamery umí snímat fotografie i videosekvence s frekvencí 30–60 Hz (u A615 je možné při rozlišení 640×120 dosáhnout frekvence až 100 Hz). Velkou výhodou je i vysoká citlivost, která je menší než 50 mK. Teplotní rozsah je -20–120°C, u kamery A615 upravitelný až na 300–2000°C. Ceny kamer řady A se pohybují od 4950 EUR (model A300) až po 13 950 EUR (model A615).
- **SC řada, stacionární typy kamer** – vhodné pro vědu a výzkum. S řadou A mají společné velikosti čipů (320×240 nebo 640×480 px), zobrazovací frekvence (9 až 60 Hz, u typu SC655 při zmenšeném snímacím poli až 200 Hz). Vynikají především svojí citlivostí (<50 mK) a teplotním rozsahem (-20–350°C, resp. -20–650°C, rozšířitelný až na 2000°C). Připojení pomocí USB nebo gigabitového ethernetu je samozřejmostí. Ceny kamer řady SC se pohybují od 10 900 EUR (model SC305) do 23 950 EUR (model SC655).

- **SC řada, chlazené kamery** – kamery sloužící pro snímání blízkého infračerveného záření o vlnových délkách zpravidla 0,8–2,5 μm , tedy pro snímání velmi vysokých teplot (až 2000°C). Termoelektricky chlazené HgCdTe čipy mají velikost 320×256 px a při plném rozlišení dosahují obnovovací frekvence až 340 Hz (při sníženém rozlišení na 128×8 px frekvencí až 15 kHz).
- **i řada** – nejmenší a nejlehčí kamery firmy FLIR (hmotnost kolem 340 g). Tyto kamery jsou specifické svojí jednoduchostí, plnou automatikou a nízkou cenou. To vše za cenu zmenšení mikrobolometrického čipu na 60×60 až 120×120 px a snížení citlivosti na 0,10 K (při rozsahu -20–250°C). Na druhou stranu je na zadní straně kamery k dispozici 2,8" barevný LCD displej a možnost ukládání snímků na SD kartu. Ceny kamer řady i se pohybují od 26 000 Kč do 65 000 Kč.
- **E řada** – ruční kamery s čipem 160×120 až 320×240 px jsou vhodné především pro inspekce elektrických a mechanických systémů. Dosahují rozsahu -20–650°C a citlivosti až 0,05 K. Spolu s termosnímkou jsou tyto kamery schopny pořizovat i běžné fotografie vestavěnou 3Mpx kamerou. Možnost komunikace přes Bluetooth nebo Wifi je vynikajícím pomocníkem při práci v terénu. Ceny se pohybují od 100 000 Kč do 187 000 Kč. [4]

5.2 FLUKE, RAYTEK

Další americký výrobce termovizních kamer je Fluke. Tato firma se už od roku 1948 zabývá výrobou veškeré měřicí techniky. Dnes je již nadnárodní korporací a své oficiální zastoupení má i v České republice. Systémovou termovizní techniku ovšem vyrábí prostřednictvím své dceřinné společnosti Raytek USA.

Fluke vyrábí pouze termokamery pro ruční použití. Jejich vlastnosti jsou velmi podobné – kamery dosahují rozlišení nechlazeného mikrobolometrického čipu od 120×120 do 320×240 px. Rozsahy teplot jsou běžně -20–150°C (u dražších modelů až do 600°C) s velmi dobrou citlivostí, dosahující až 40 mK. Každá Fluke termokamera má zabudovanou

malou kameru, snímající obraz ve viditelném spektru, slot na SD kartu a LCD displej. Samozřejmostí je ukládání fotek v různých formátech a natáčení videí. Ceny termokamer Fluke se pohybují od 51 000 Kč do 565 000 Kč.

Stacionární systémové termokamery Raytek ThermoView Pi20 jsou „robustní přístroje s vysokým krytím (IP54) k nepřetržitému monitorování teploty v široké škále průmyslových výrobních procesů. Aplikace nízkoteplotních modelů s rozsahem od -20 do 500°C je vhodná při výrobě a zpracování plastů, v textilním průmyslu, potravinářství, polygrafii, apod. Modely s teplotním rozsahem od 200 do 2000°C s bohatou škálou příslušenství se používají pro ochranu před vlivy prostředí i v drsnějších provozech při tepelných úpravách kovů, válcování, kování, atd.“ [16] Senzor s rozlišením 320×240 px je schopen nahrávání sekvencí snímků s frekvencí 30 Hz. Kamery disponují ethernetovým rozhraním a RS-232C. Ceny kamer Raytek Pi20 se podle teplotního rozsahu a provedení objektivu pohybují od 490 000 Kč do 760 000 Kč. [11]

5.3 GUIDE

Firma Guide je čínská firma úzce zaměřená na termovizní techniku. Od roku 1999, stejně jako Flir, vyrábí kamery i pro komerční aplikace a armádu.

- **Řada GUIDIR** – tato řada stacionární termovizní techniky firmy Guide je primárně určena pro vyhledávání virů, jako je SARS nebo H1N1, na letištích, v přístavech nebo na jiných místech, kde se pohybuje mnoho lidí. Svým nechlazeným mikrobolometrickým čipem o rozlišení 384×288 px je schopna snímat sekvence o frekvenci až 60 Hz. Teplotní rozsah je omezený na 0–50°C s citlivostí 0,1 K.
- **Řada ThermoPro** – nejvyšší řada ručních termokamer pro průmyslové použití. Nechlazený mikrobolometrický čip o rozlišení 384×288 px je schopen snímat v teplotním rozsahu -20–600°C, respektive -20–800°C, s možností rozšíření až na 2000°C s citlivostí menší než 0,08 K. Standardem je i vestavěná běžná kamera, slot na SD kartu, 3,5" LCD displej, zaměřovací laser a provoz na akumulátory. Cena těchto kamer je přibližně 500 000 Kč.

- **Řada EasIR** – nerozšířenější a nejdostupnější řada ručních termokamer firmy Guide je vhodná pro jakoukoliv diagnostiku v terénu. Vestavěná běžná kamera, LCD displej a SD karta jsou samozřejmostí. Čip o velikosti 160×120 až 384×288 px snímá v teplotním rozsahu -20–250°C (upravitelný až na 350°C, respektive 1500°C) s citlivostí 0,1 K. Ceny termokamer EasIR se pohybují od 49 000 Kč do 129 000 Kč. [12]

5.4 CHINO JAPAN

Tokijská firma Chino vyrábí měřicí techniku už od roku 1936. Je nadnárodní společností, do jejíhož řetězce patří firmy jako Seiko nebo Asakawa Lens Works. Své prodejce a servisní střediska má po celém světě, nejbliže v Německu.

Od firmy Chino je na trhu k dispozici pouze jeden model termokamery, a sice stacionární termokamera TPL 260. Je vhodná pro měření teplot ve výrobě, vývoji, skladovacích prostorách, protipožární prevenci je možné ji využívat i pro kontrolu prostor před nevídanou návštěvou. Snímacím prvem je v tomto případě termočlávkové pole o přibližně 2000 px, schopné snímat 3 snímky za vteřinu. Rozsah měřitelných teplot je -20–300°C s citlivostí 0,5 K. Kameru lze připojit pomocí ethernetového rozhraní a v LAN síti ji lze připojit k internetu. Cena TPL 260 je velmi příznivá – necelých 40 000 Kč. [13]

5.5 THERMOTEKNIKX

Již od roku 1982 se britská firma Thermoteknix zabývá vývojem a výrobou termovizních zařízení, systémů a softwaru s nimi souvisejícím. Za svůj přínos získala v roce 2008 ocenění „Queen's Award for Enterprise (Innovation)“. Termovizní techniku pro průmyslové použití prodává pod značkou VisIR a Miricle.

- **Miricle** – miniaturní termokamery s nechlazeným čipem o rozlišení až 640×480 px, schopným pořizovat až 60 snímků za vteřinu v plném rozlišení. Kamery jsou specifické citlivostí 50 mK a velmi nízkou spotřebou. Komunikaci zajišťují USB a RS-232 rozhraní.
- **VisIR** – řada ručních termokamer vyšší třídy. S čipem 320×240, respektive 640×480 px dokáží pořizovat snímky frekvencí 60 Hz. Vedle termokamery

nechybí ani běžná kamera o rozlišení 1,3 Mpx a 5" dotykový displej na zadní straně. Výhodou je možnost použití kamery v nepříznivých podmínkách, protože je opatřena ochranou IP54. Teplotní rozsah $-20-500^{\circ}\text{C}$ s citlivostí 40 mK je dalším výborným parametrem. Vlastnosti těchto kamer odráží i jejich cena, která dosahuje 790 000 Kč. [14]

5.6 TESTO

Testo je německá společnost, zabývající se výrobou veškeré měřicí techniky, včetně termokamer. Má pobočky po celém světě a své oficiální zastoupení má dokonce i v České republice.

Firma Testo vyrábí výhradně ruční termokamery s mikrobolometrickými čipy o velikostech od 160×120 do 320×240 px, schopnými měřit teploty $-20-350^{\circ}\text{C}$ s citlivostí až 50 mK. Na tělech termokamer nechybí běžná kamera pro snímání scény ve viditelném spektru, LCD displej a konektor pro rozhraní USB. Ceny termokamer Testo se pohybují od 77 000 Kč do 203 000 Kč. [15]

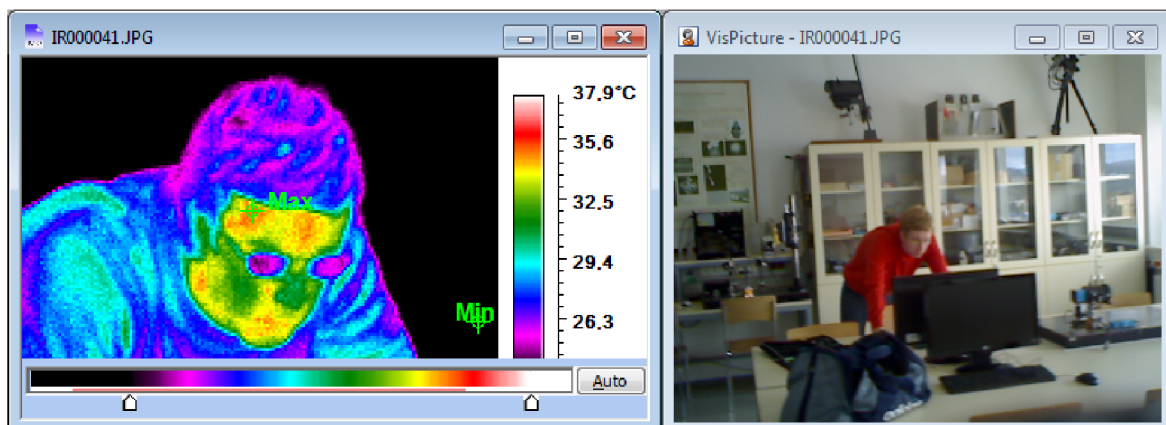
6. INFRAKAMERA GUIDE EASIR-4

Pro veškeré konkrétní ukázky použití a navrhované úlohy je zde používána termokamera GUIDE® EasIR-4.

Jedná se o kameru čínského výrobce Wuhan Guide Infrared Co., Ltd. V Tab. 6.1 jsou shrnuty její konkrétní specifikace. Kamera je dodávána s přídavným 30mm teleobjektivem, 7mm širokoúhlým objektivem a sluneční clonou na displej.

EasIR-4 disponuje bolometrickým snímačem, citlivým na infračervené záření, i klasickým CMOS senzorem, barevně snímajícím viditelnou část světelného spektra. Při snímání je tak možné získat 2 fotografie dané scény (viz Obr. 6.1).

Tuto kameru je možné připojit k PC přes rozhraní USB 2.0 a sledovat, příp. zaznamenávat její obraz v dodávaném software Guide IrAnalyser. Tento software umožňuje i základní úpravy obrázků, včetně aplikací různých filtrů. Umožňuje dokonce vkládání infračerveného obrázku do klasické fotografie scény.



Obr. 6.1: Dvojí snímání scény kamerou GUIDE® EasIR-4

Kamera umožňuje volbu manuálního nebo automatického ostření. Infračervený obrázek je možné reprezentovat v několika různých barevných paletách.

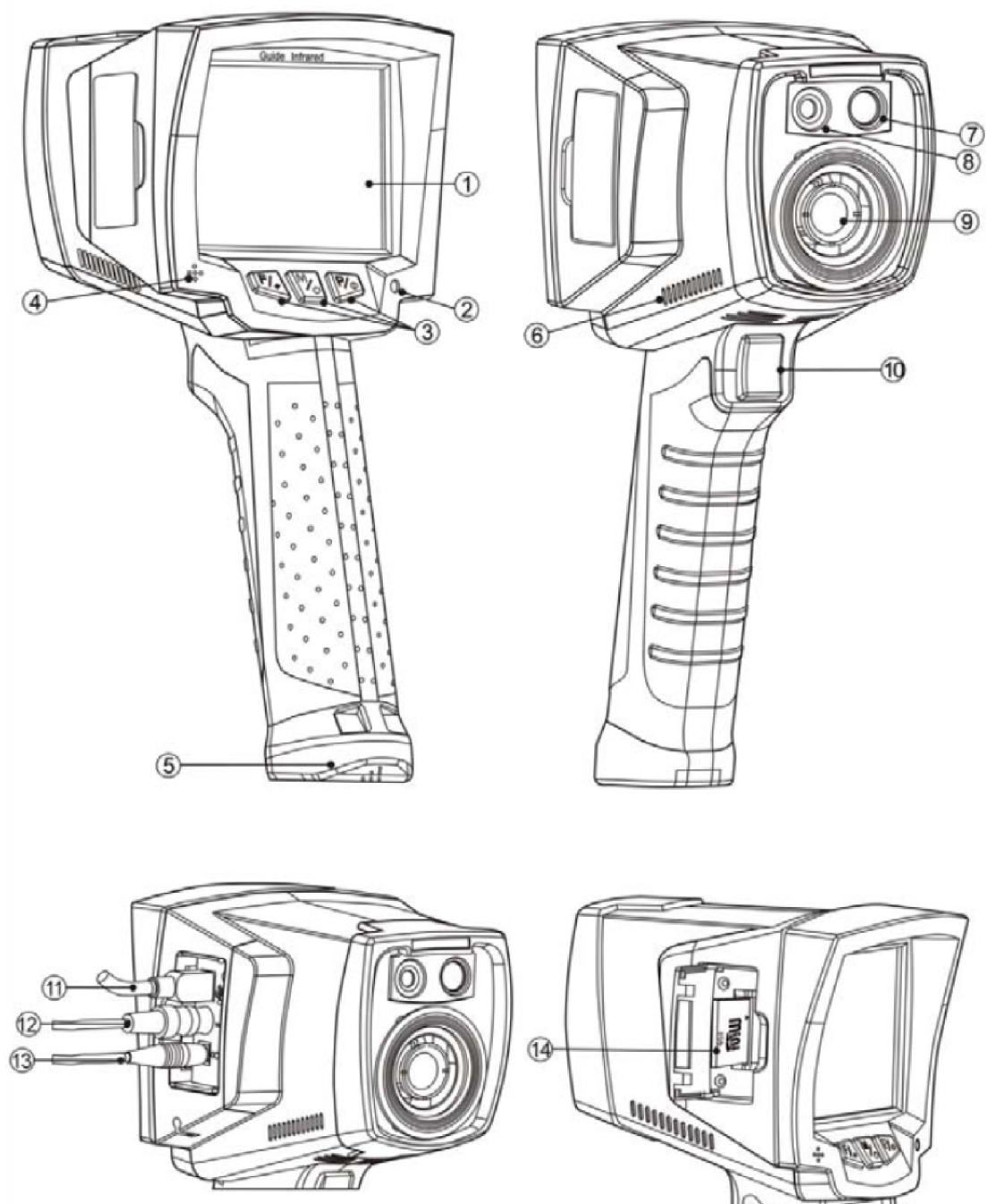
Velice užitečnou funkcí je volba emisivity v rozsahu od 0,01 do 1,00. Její změna se hodí při měření zvláštních typů objektů nebo k posílení citlivosti při nižších teplotách (v tomto případě se ale do obrazu vnáší silný šum).

Kromě emisivity je možné manuálně volit i hodnotu teploty okolí. Implicitně je její hodnota nastavena na teplotu senzoru. V případě speciálních scén, jako například obloha nebo sníh, je možné ji nastavit ručně.

Dalšími nastavitelnými parametry kamery jsou vzdálenost měřeného objektu (od 0,1 do 50 m) a relativní vlhkost (od 0 do 100 %).

Snímací prvky	
TERMÁLNÍ KAMERA	
Typ detektoru	Nechlazený FPA mikrobolometr, 160×120 px, 25 μm
Spektrální rozsah	8–14 μm
Teplotní rozsah	-20–250°C, rozšířitelný až na 350°C
Teplotní citlivost	≤100 mK při 30°C
Přesnost	±2°C nebo ±2 % (platí vyšší hodnota)
Korekce emisivity	od 0,01 do 1,00 (s krokem 0,01)
Zorné pole / Ohnisko	20,6°×15,5° / 11 mm
VIZUÁLNÍ KAMERA	
Senzor	CMOS senzor, 1600×1200 px, 2 ²⁴ barev
Prezentace snímku	
Displej	3,6" TFT LCD s vysokým rozlišením
Video output	PAL/NTSC
Ukládání snímku	
Typ	Vyjímatelná SD karta a vnitřní paměť
Formát souboru	JPG
Hlasová poznámka	Do 60 s
Laser	
Klasifikace	Polovodičová Al GaInP dioda
Napájení	
Baterie	4×AA monočlánek
Externí napájení	AC adaptér 110/220 VAC, 50/60 Hz
Podmínky prostředí při měření	
Operační teplota	-10–50°C
Teplota při skladování	-20–60°C
Relativní vlhkost	10–95 %
Další vlastnosti	
Komunikační rozhraní	USB 2.0
Hmotnost	0,73 kg (včetně baterií)
Rozměry (š×v×h)	111×240×124 mm

Tab. 6.1: Technické specifikace termokamery GUIDE® EasIR-4 [7]



Obr. 6.2: Termokamera GUIDE® EasIR-4 [7]

Popis částí kamery z Obr. 6.2: 1 – LCD displej, 2 – Indikace nabíjení, 3 – funkční tlačítka, 4 – mikrofon, 5 – kryt baterií, 6 – reproduktor, 7 – vizuální kamera, 8 – laser, 9 – IR čočka, 10 – spouštěcí tlačítko, 11 – rozhraní USB, 12 – rozhraní Video, 13 – AC adaptér, 14 – slot na SD karty.

7. NÁVRHY ÚLOH PRO PŘEDMĚTY POČÍTAČOVÉHO VIDĚNÍ

V této kapitole budou navrženy postupně tři úlohy. První dvě slouží spíše k nastínění, co je vše možné termokamerou měřit nebo pozorovat. Třetí úloha zahrnuje širší spektrum experimentů s termokamerou a je tudíž pro pracoviště termovize předmětů počítačového vidění nejvhodnější.

7.1 ÚLOHA Č. 1 – MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI POMOCÍ TERMOKAMERY

7.1.1 Zadání

Vzduch působí jako bariéra v cestě infračerveného záření. Se zvětšující se vzdáleností tedy roste útlum IR signálu. Proměřte závislost vzdálenosti předmětu od kamery na naměřené teplotě předmětu o známé skutečné teplotě. K měření použijte termokameru a předmět o známé teplotě, která je vyšší, než teplota vzduchu v místnosti. Poté z naměřené teploty stejného předmětu určete jeho vzdálenost od kamery. Určete přesnost měření a chybu měření.

7.1.2 Postup

1. Kamera může být nastavena ve dvou režimech snímání – buď je aktuální obraz zobrazován na displeji kamery, nebo je pomocí USB zobrazován přímo na monitoru počítače (k tomu slouží program Guide IrAnalyser). Zvolte si sami, který režim je pro vás vhodnější.
2. Pro tuto úlohu zvolte vhodný objektiv kamery (teleobjektiv s ohniskem 30 mm nebo širokoúhlý objektiv s ohniskem 7 mm). Kameru si nezapomeňte zkalibrovat (volba emisivity předmětu, teploty okolí, relativní vlhkosti).
3. Na co největším rozdílu vzdáleností (například na chodbě) proměřte závislost vzdálenosti na naměřené teplotě předmětu o známé skutečné teplotě. Vhodným objektem může být plechovka naplněná horkou vodou. Proveďte nejméně 5 měření, aby byl výsledek co nejpřesnější. Výsledky zakreslete do grafu a spočítejte rovnici regresní křivky.

4. Určete přesnost měření a chybu měření.
5. Výsledky si ověřte experimentem – postavte předmět do určité vzdálenosti od kamery a z jeho teploty určete vzdálenost.

7.1.3 Složení pracoviště

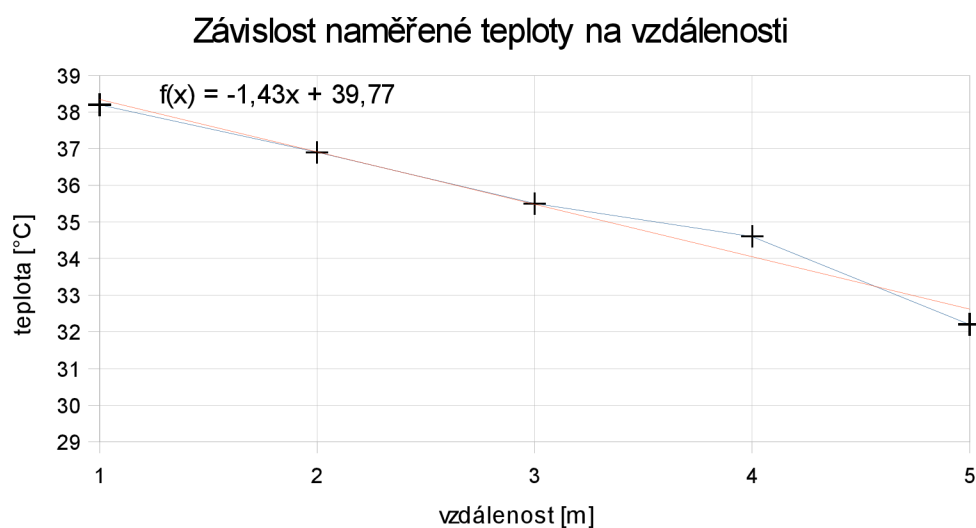
- termokamera GUIDE[®] EasIR-4 s příslušenstvím
- software Guide IrAnalyser
- prázdná plechovka
- pásmo na měření vzdálenosti

7.1.4 Řešení

Závislost vzdálenosti předmětu od kamery na naměřené teplotě předmětu je lineární. Z rovnice regresní přímky pak lze při známé naměřené teplotě snadno spočítat vzdálenost předmětu. Naměřené hodnoty teplot jsou uvedeny v Tab. 7.1. Graf a regresní přímka jsou zobrazeny na Obr. 7.1.1. Termosnímký plechovky v různých vzdálenostech od termokamery jsou v příloze č. 3.

Vzdálenost [m]	1	2	3	4	5
Teplota [°C]	38,2	36,9	35,5	34,6	32,2

Tab. 7.1: Naměřené hodnoty teplot plechovky v závislosti na její vzdálenosti od termokamery



Obr. 7.1.1: Závislost naměřené teploty na vzdálenosti (modrá) a její regresní přímka (červená)

Termokamera Guide EasIR-4 má citlivost $0,1^{\circ}\text{C}$. Termosnímek má 256 rozlišitelných úrovní, což při dané citlivosti odpovídá minimálnímu rozsahu přibližně 25°C . Při měření vzdálenosti se mezní teploty na snímcích pohybovaly kolem 22°C (teplota okolí, místnosti) a 38°C (nejteplejší bod nejbližší položené plechovky). Na tomto rozsahu 16°C může mít i při stále zachovaných 256 úrovních termokamera přesnost nejlépe $0,1^{\circ}\text{C}$.

Výpočet chyby měření:

$$\delta \vartheta = \frac{|\vartheta_R - \vartheta_N|}{\vartheta_R} = \frac{|34,05 - 34,6|}{34,05} = 0,016 = 1,6 \% \quad (7.1)$$

kde $\delta \vartheta$ [%] je maximální relativní chyba měření, ϑ_R [$^{\circ}\text{C}$] je teoretická (vypočtená) teplota a ϑ_N [$^{\circ}\text{C}$] je naměřená teplota.

7.2 ÚLOHA Č. 2 – SLEDOVÁNÍ TEPELNÝCH VLASTNOSTÍ OMÍTEK S POUŽITÍM TERMOKAMERY

7.2.1 Zadání

Pomocí termokamery sledujte ohřívání různých typů omítek na polystyrenové podložce. Seřadte vzorky omítek v jednotlivých řadách podle tepelné kapacity.

7.2.2 Postup

1. Kamera může být nastavena ve dvou režimech snímání – buď je aktuální obraz zobrazován na displeji kamery, nebo je pomocí USB zobrazován přímo na monitoru počítače (k tomu slouží program Guide IrAnalyser). Pro tuto úlohu zvolte zobrazování na displeji s ukládáním na SD kartu.
2. Nejprve pořídte termosnímky dostupných vzorků omítek v místnosti při stálé teplotě. Všechny materiály by měly mít stejnou (pokojevou) teplotu.
3. Pomocí dvou 500W halogenových reflektorů nahřejte omítky. Dbejte na to, aby byly ohřáté rovnoměrně – halogenové reflektory svítí jen jedním směrem. Průběh ohřívání monitorujte termokamerou.
4. Jakmile jsou omítky dostatečně ohřáté, vynesete je ven (na okno), aby byl zaručen relativně velký rozdíl teploty okolí a teploty omítek. Poté pořídte několik snímků termokamerou.
5. Pomocí USB připojte kameru k počítači a snímky přeneste na disk.
6. V programu Guide IrAnalyser snímky otevřete a změřte teploty jednotlivých omítek na pořízených snímcích.
7. Vysvětlíte rozdílný průběh ohřevu různých typů omítek. Řekněte, která omítka má nejvyšší a která nejnižší tepelnou kapacitu.

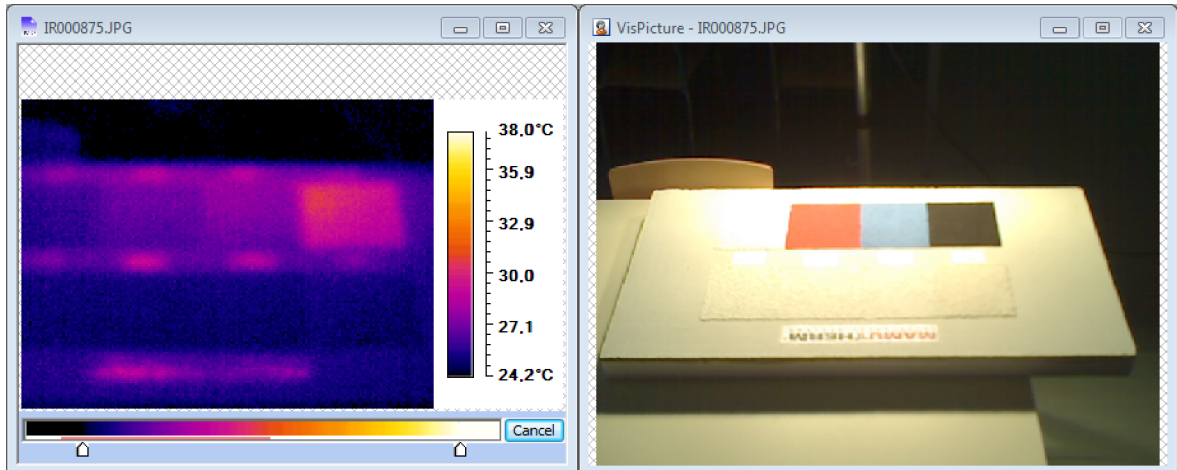
7.2.3 Složení pracoviště

- termokamera GUIDE® EasIR-4 s příslušenstvím
- software Guide IrAnalyser
- 2× 500W halogenový reflektor

- Polystyrenová deska se vzorky omítek od firmy MAMUT-THERM s.r.o.

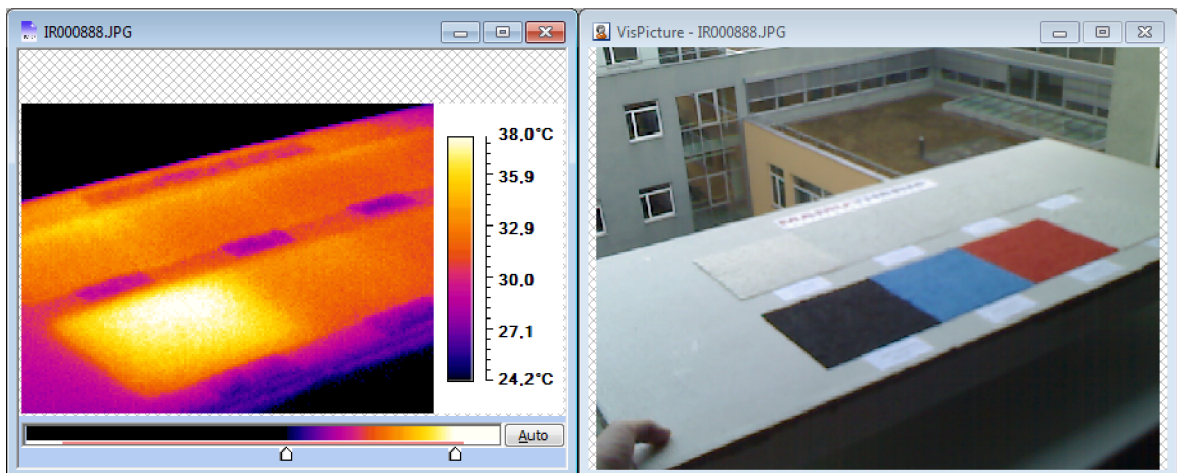
7.2.4 Řešení

Na Obr. 7.2.1 je snímek vzorků omítek pod halogenovými reflektory. Pokojová teplota při tomto pokusu byla 21°C.

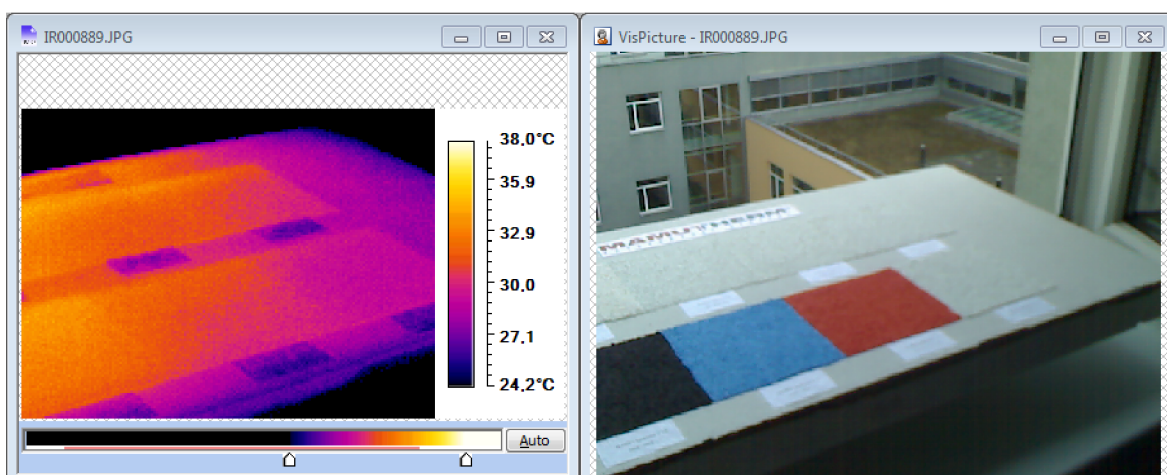


Obr. 7.2.1: Snímek vzorků omítek pod halogenovou lampou

Po nahřátí byla polystyrenová deska se vzorky omítek položena do otevřeného okna. Termokamerou zde byly pořízeny snímky Obr. 7.2.2 a Obr. 7.2.3.

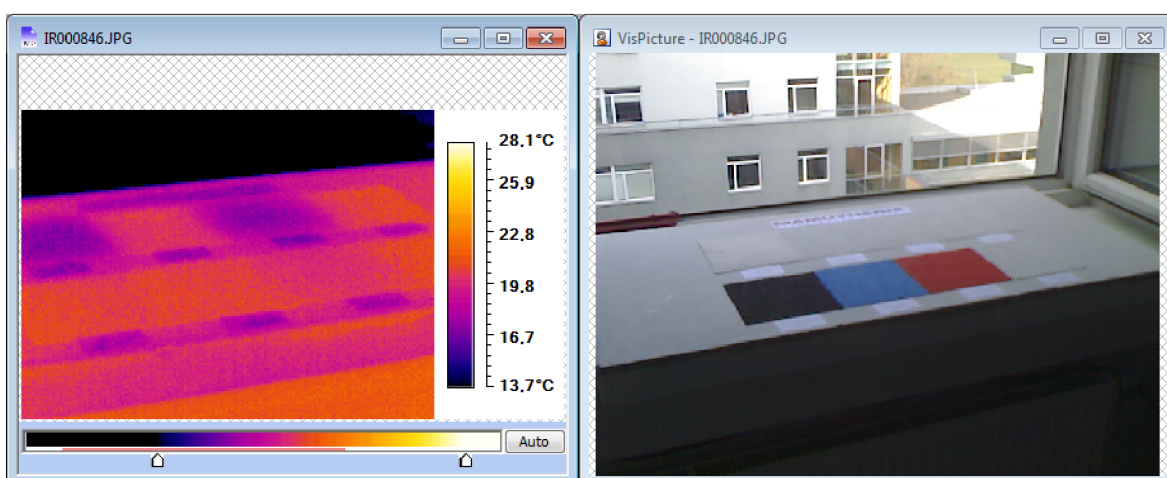


Obr. 7.2.2: Snímek vzorků omítek v otevřeném okně (levá část)



Obr. 7.2.3: Snímek vzorků omítek v otevřeném okně (pravá část)

Pro srovnání byl pořízen i snímek omítek, které byly bez předchozího nahřátí halogenovým reflektorem položeny do otevřeného okna (viz Obr. 7.2.4). V tomto případě byla venku mnohem nižší teplota než uvnitř místnosti. Před umístěním do okna měly všechny vzorky omítek stejnou teplotu, která se rovnala teplotě v místnosti (26,5°C).



Obr. 7.2.4: Snímek vzorků omítek bez předchozího nahřátí v otevřeném okně

Výpočet tepelných kapacit jednotlivých vzorků omítek byl proveden z následujícího vzorce:

$$C_i = \frac{Q}{\Delta \vartheta_i} = \frac{Q}{\vartheta_{O_i} - \vartheta_M} \quad [J \cdot K^{-1}] \quad (7.2)$$

kde $C_i [J \cdot K^{-1}]$ je tepelná kapacita omítky s pořadovým číslem i , $Q [J]$ je teplo přijaté omítkami (v našem případě byly omítky osvětlovány rovnoměrně, takže jej lze považovat u všech vzorků za shodné), $\vartheta_{oi} [K]$ je teplota konkrétního vzorku omítky v okně a $\vartheta_M [K]$ je teplota vzorku omítky před tepelnou výměnou (čili pro všechny vzorky omítek shodná s teplotou v místnosti).

Hodnoty tepelných kapacit jednotlivých vzorků v závislosti na přijatém teple jsou uvedeny na následujících řádcích:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \frac{Q}{33,5 - 21,0} = \frac{Q}{12,5} J \cdot K^{-1} & C_2 &= \frac{Q}{32,5 - 21,0} = \frac{Q}{11,5} J \cdot K^{-1} \\
 C_3 &= \frac{Q}{32,0 - 21,0} = \frac{Q}{11,0} J \cdot K^{-1} & C_4 &= \frac{Q}{31,0 - 21,0} = \frac{Q}{10,0} J \cdot K^{-1} \\
 C_5 &= \frac{Q}{38,0 - 21,0} = \frac{Q}{17,0} J \cdot K^{-1} & C_6 &= \frac{Q}{33,0 - 21,0} = \frac{Q}{12,0} J \cdot K^{-1} \\
 C_7 &= \frac{Q}{31,0 - 21,0} = \frac{Q}{10,0} J \cdot K^{-1} & C_8 &= \frac{Q}{29,0 - 21,0} = \frac{Q}{8,0} J \cdot K^{-1} \quad (7.3)
 \end{aligned}$$

Odečítané hodnoty teplot na okně (Obr. 7.2.2 a Obr. 7.2.3) jsou odhadnutými průměrnými hodnotami teploty jednotlivých vzorků. Pro určení vzorku s největší a nejmenší tepelnou kapacitou je tato přesnost postačující.

Pořadí tepelných kapacit v řadě bílých omítek o různých složeních je $C_1 < C_2 < C_3 < C_4$. Je tedy zřejmé, že čím větší zrnka, tím je tepelná kapacita omítky nižší.

V řadě omítek stejných složení o různých barvách je pořadí tepelných kapacit $C_5 < C_6 < C_7 < C_8$. Dle očekávání má největší tepelnou kapacitu bílá omítka. Černá barva totiž velmi dobře pohlcuje teplo z okolí a pod halogenovou lampou se tedy ohřála na nejvyšší teplotu.

7.2.5 Možnosti úpravy úlohy

Tato úloha by mohla být názorná i v případě, že by byly místo omítek použity vzorky kovových materiálů s různě natřenými či zkorodovanými částmi. Pokud by byly

použity matné i lesklé nátěry různých barev, bylo by možné pozorovat, případně i měřit, emisivitu jednotlivých kovů a nátěrů.

7.3 ÚLOHA Č. 3 – EXPERIMENTY S TERMOKAMEROU

7.3.1 Zadání

Tato úloha je složena ze čtyř experimentů s termokamerou:

1. Sledujte změny teploty lidského těla v klidu a při fyzické zátěži.
2. Pozorujte vliv emisivity na měření termokamerou.
3. Pozorujte vliv vzdálenosti měřeného objektu na měření termokamerou.
4. Sledujte prokrvování lidské ruky.

7.3.2 Postup

Kamera může být nastavena ve dvou režimech snímání – buď je aktuální obraz zobrazován na displeji kamery, nebo je pomocí USB zobrazován přímo na monitoru počítače (k tomu slouží program Guide IrAnalyser). Zvolte si sami, který režim je pro vás vhodnější. Zvolte i vhodné nastavení barevné škály kamery.

Nejprve proveďte všechna měření. Vyhodnocení snímků nechejte až na konec.

1. Sledujte změny teploty lidského těla v klidu a při fyzické zátěži.
 - I. Poříd'te snímek lidského obličeje v klidu.
 - II. Seběhněte po schodech do nejnižšího patra budovy a vyběhněte co nejrychleji zpět do učebny
 - III. Ihned po návratu do učebny poříd'te druhý snímek obličeje.
 - IV. V programu Guide IrAnalyser snímky otevřete, vyrovnejte jejich rozsahy (Image → Gauge Advance Setting...) a porovnejte rozdíly teplot v obličeji. Tyto rozdíly zdůvodněte.
2. Pozorujte vliv emisivity na měření termokamerou.

- I. Plechovku, do poloviny obalenou lepicí páskou, naplňte horkou vodou z vodovodu.
 - II. Pomocí termokamery sledujte rozdílnou teplotu obalené a neobalené části plechovky. Porovnejte hodnoty teplot z termokamery s hodnotami z kontaktních teploměrů, připevněných na plechovce. Rozdíly teplot vysvětlete.
3. Pozorujte vliv vzdálenosti sledovaného objektu na měření termokamerou.
- I. Pro tento experiment můžete použít plechovku s horkou z předchozí úlohy. Vhodným objektem může být ale cokoliv, co má přibližně stálou teplotu, která je vyšší, než teplota v místnosti.
 - II. Poříd'te několik snímků předmětu o známé teplotě v různých vzdálenostech od termokamery. Vysvětlete rozdíly v naměřené teplotě.
4. Sledujte prokrvování lidské ruky.
- I. Pro tuto úlohu je vhodné připojit kameru k PC pomocí USB kabelu a snímat obrázky automaticky v programu Guide IrAnalyser. Aby bylo možné kameru používat online připojenou k PC, musí z ní být vytažena SD karta a kamera musí mít nastavené ukládání do vnitřní paměti. Připojte tedy kameru k PC, spusťte program Guide IrAnalyser a otevřete online náhled pomocí menu File → Video → Device video...
 - II. Nastavte automatické snímání v menu Tools → Auto Capture → Setting... na 5 vteřin. Snímání spustíte zaškrtnutím položky Auto Capture v menu Tools → Auto Capture, ale zatím jej nespouštějte.
 - III. Připravte si kameru na stativ a podložku pod ruku (postačí dřevěná deska stolu).
 - IV. Nechejte svoji ruku zchladit pod proudem studené vody z vodovodu. Chlad'te rovnoměrně dlaň i prsty z obou stran po dobu přibližně dvou až tří minut.

V. Ruku co nejrychleji osušte a položte na podložku pod kameru. Ihned spusťte automatické snímání (Tools → Auto Capture → Auto Capture).

VI. Snímejte přibližně čtyři minuty. Poté automatické snímání vypněte.

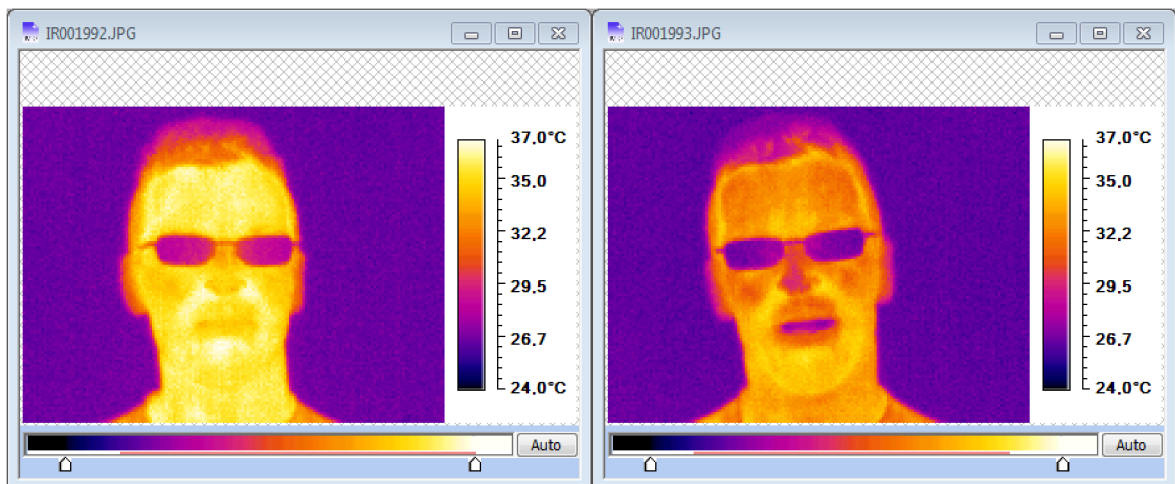
VII. Snímky z automatického snímání naleznete ve složce C:\Program Files\Guide IrAnalyser\Capture. Před vypnutím počítače své snímky smažte.

7.3.3 Složení pracoviště

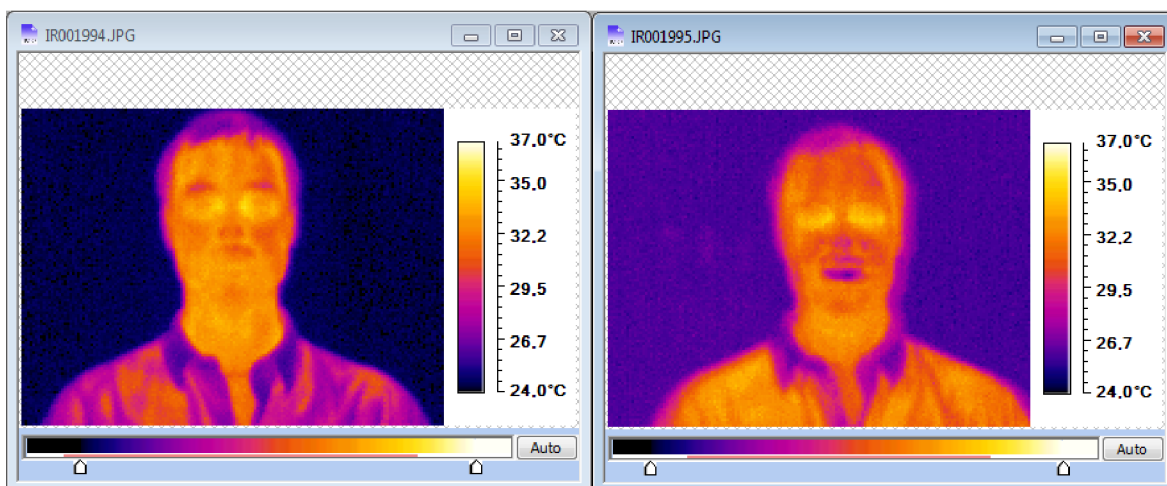
- termokamera GUIDE® EasIR-4 s příslušenstvím
- software Guide IrAnalyser
- hliníková plechovka, obalená do poloviny lepicí páskou
- 2 ks digitálních vpichovacích teploměrů DT-131
- stativ na termokameru

7.3.4 Řešení

1. Snímky pořízené před a po fyzické zátěži jsou na Obr. 7.3.1 a Obr. 7.3.2.



Obr. 7.3.1: Vlevo snímek v klidu, vpravo po fyzické zátěži (první figurant)



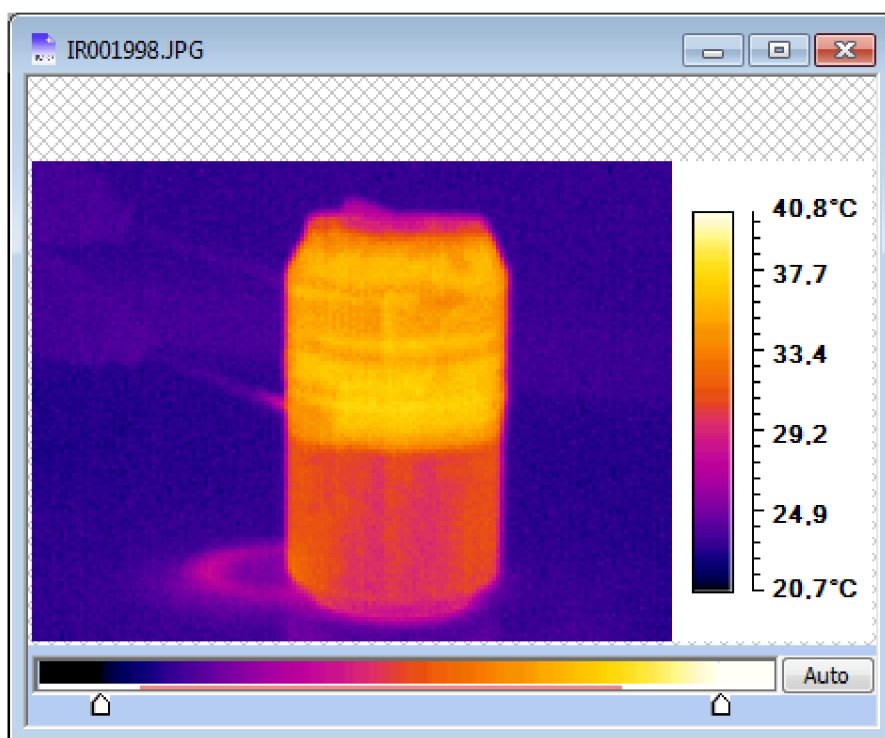
Obr. 7.3.2: Vlevo snímek v klidu, vpravo po fyzické zátěži (druhý figurant)

Ze snímků je patrné, že se lidský obličej po fyzické zátěži (sprintu) ochladí. Důvodem je fakt, že tělo potřebuje prokrvovat fyzicky namáhané části, hlavu proto zásobuje méně.

2. Na Obr. 7.3.3 je snímek plechovky naplněné horkou vodou z vodovodu, jejíž vrchní polovina je obalená lepicí páskou. Na odvrácené straně plechovky jsou za použití teplovodivé pasty připevněny dva digitální vpichovací teploměry DT-131.

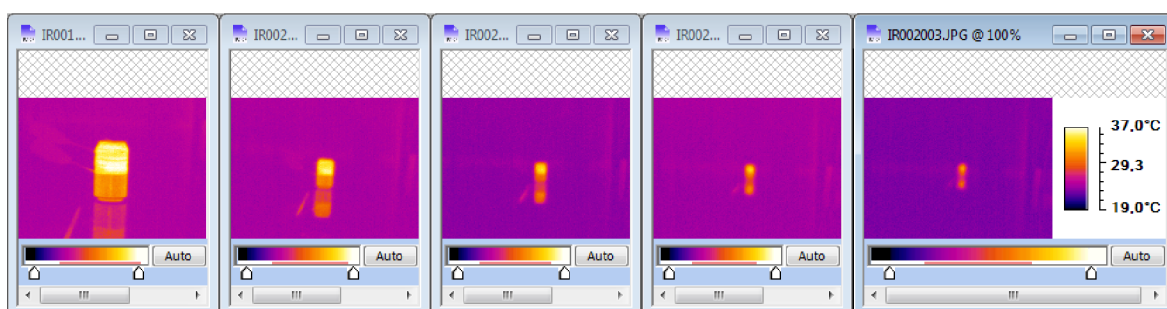
Důvodem rozdílných teplot zjištěných termokamerou na obou polovinách plechovky je rozdílná emisivita povrchových materiálů. Emisivita hliníku (spodní polovina plechovky) se pohybuje kolem hodnoty 0,05, čili v této části plechovky pozorujeme především odraženou teplotu okolí, která je nižší než skutečná teplota plechovky. Lepicí páska má emisivitu mnohem vyšší (přibližně 0,95). V této části plechovky je teplota plechovky lépe vyzařována o okolí, takže se na termokameře jeví jako teplejší.

Skutečné teploty obou polovin se liší jen mírně, přibližně o 0,5°C, přičemž skutečná teplota částí s lepicí páskou je vyšší. Tento rozdíl je naopak způsoben tím, že lepicí páska je při kontaktu horším vodičem tepla než hliník.



Obr. 7.3.3: Termosnímek plechovky, obalené do poloviny lepicí páskou a naplněné horkou vodou

3. Teplota viditelná termokamerou se vzdáleností klesá. Vzduch, jako přenosové médium, nepřenáší teplo ideálně. Dochází v něm k útlumu, podobně jako při průchodu tepla sklem. Snímky jsou na Obr. 7.3.4. Graf závislosti naměřené teploty na vzdálenosti je uveden na Obr. 7.1.1.



Obr. 7.3.4: Vliv vzdálenosti předmětu na měření termokamerou

4. Snímky a videosekvence k úloze sledování prokrvování rukou jsou v příloze č. 7.

8. NÁVRHY ÚLOH PRO BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

V této kapitole budou představeny složitější typy úloh než jaké byly představeny v kapitole 7. Navržené úlohy zde by měly být obtížností použitelné jako zadání bakalářské či diplomové práce.

8.1 DIPLOMOVÁ PRÁCE - DETEKCE HLAV A OSOB V OBRAZE Z TERMOKAMERY

Sledovací systémy jsou jedním z odvětví, kde se termovizní techniky využívá velmi hojně. Detekce hlav, obličejů, případně i celých osob v termosnímčích je proto potřebnou součástí vyhodnocovacích softwarů.

8.1.1 Zadání

Navrhnete algoritmus, který dokáže v termosnímku nalézt hlavy lidí. Rozšířte tento algoritmus o detekci celých těl osob.

8.1.2 Ověření řešitelnosti

Pro detekci hlav v obraze je možné využít různých metod. K ověření řešitelnosti této úlohy byla použita detekce za pomoci neuronové sítě. Konkrétní zpracování návrhu řešení je v příloze č. 4 této práce.

Algoritmus vyhodnocení obrazu se skládá ze dvou částí – učení neuronové sítě a vybavování, respektive předložení testovacího obrazu již naučené neuronové síti.

K učení bylo použito celkem 20 testovacích vzorů. Jedná se o termosnímky obličejů a jiných scén v šedotónové paletě. Snímky byly nejprve ručně předzpracovány na pevný rozsah teplot 23–38°C (tzn. černá barva odpovídá teplotě 23°C a nižší, bílá teplotě 38°C a vyšší). Každý trénovací vzor má kvůli velikosti neuronové sítě rozměr 20×30 pixelů. Samotná neuronová síť obsahuje 600 neuronů v první (vstupní) vrstvě, kde každý neuron odpovídá jednomu pixelu vstupního obrázku, 5 neuronů ve skryté vrstvě a 1 neuron ve vrstvě třetí (výstupní). Výstupní neuron udává informaci „ano, na snímku je hlava“ nebo „ne, na snímku není hlava“. Tato konfigurace neuronové sítě byla na základě

experimentu vybrána jako nejlepší, co do úspěšnosti predikce, tak i vzhledem k časové výpočetní náročnosti.

Učení probíhá v padesáti iteračních krocích systémem back-propagation, kdy jsou neuronové síti s implicitním náhodným rozvržením vah postupně předkládány všechny tréninkové vzory. Jakmile je neuronová síť naučena, dojde k vykreslení vývoje chyby a k uložení naučené neuronové sítě (respektive vah mezi jednotlivými neurony) do souboru.

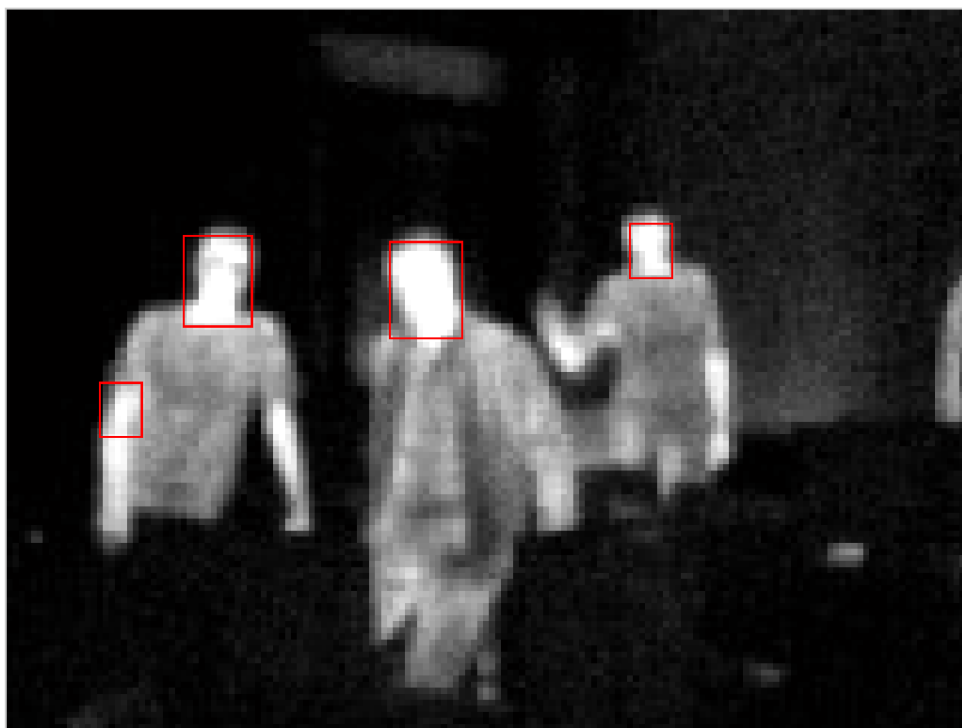
Celý proces učení trvá přibližně deset vteřin.

Detekce hlav v obraze probíhá jako proces vybavování, tedy předkládání testovacích vzorů již naučené neuronové síti.

Testovaný snímek, který musí být opět v šedotónové paletě, je nejprve upraven, aby jeho histogram zabíral celé šedotónové spektrum (0–255). Tím se nejteplejší místa obrázku, což se předpokládá, že je lidské tělo, posunou nejbližše bílé barvě. Takto upravený obrázek se do jiné proměnné uloží jako naprahovaný jedním pevným prahem, který byl experimenty zvolen jako nejvhodnější a který v obraze nechá pouze místa s teplotou blízkou teplotě lidského těla.

Z původního, ale již upraveného, obrázku se postupně vyjímá výřez o velikosti 30×45 pixelů. V první fázi se zkontroluje, jestli se ve výřezu již nenachází jiná hlava a jestli je ve výřezu alespoň 10 % lidského těla. Tímto je získán pouze takový výřez, který může obsahovat hlavu. Kvůli topologii neuronové sítě, je výřez zmenšen na velikost 20×30 pixelů a předložen neuronové síti jako testovací vzor.

Pokud neuronová síť vyhodnotí, že se ve výřezu nachází hlava s pravděpodobností vyšší než 50 %, postupuje se do fáze hledání hranic hlavy ve výřezu. Hranice se hledají od středu výřezu směrem k levému, pravému a hornímu okraji hlavy. Spodní hranice je vypočtena z přibližného poměru stran hlavy 3:4. Jakmile jsou hranice hlavy nalezeny, vykreslí se do obrázku (viz Obr. 8.1.1).



Obr. 8.1.1: Nalezené hlavy v obraze

8.1.3 Zhodnocení

Úloha je navrženým způsobem řešitelná, i když je zřejmé, že navržený algoritmus není 100% účinný. V některých případech považuje i jinou část obrazu za hlavu, což je zřejmé z Obr. 8.1.1, kde byla nalezena ruka levého figuranta. Algoritmus učení je citlivý na trénovací data. Jejich změnou by tedy bylo možné úspěšnost predikce vylepšit. Je ale potřeba brát v úvahu i množství trénovacích dat.

Úlohu je možné řešit i jinými způsoby. Lidskou hlavu, či tělo, lze popsat pomocí několika příznaků, které lze taktéž předkládat neuronové síti s počtem neuronů ve vstupní vrstvě, který by odpovídal počtu příznaků. Pro řešení je možné využít i obrázků z klasické kamery, která je součástí těla termokamery. Bohužel, takovýto snímek se od termosnímku liší nejen rozměry a přiblížením scény, ale i úhlem snímání a ostrostití.

Obtížností se jedná spíše o práci diplomovou, jelikož na bakalářském studiu nemají studenti žádnou znalost počítačového vidění.

8.2 BAKALÁŘSKÁ PRÁCE – SNÍMÁNÍ A DEFEKTOSKOPIE PLECHŮ S POUŽITÍM TERMOKAMERY

Hledání vad v různých materiálech je v průmyslu často používaná část výrobních procesů. Plechy jsou lesklé objekty, s nimiž může mít defektoskopie problémy. Termografie ovšem může při pozorování plechů pomoci i se zjišťováním jejich tloušťky, barvy a materiálu.

Cílem této úlohy je nalezení možných způsobů snímání defektů v plechu, klasifikace těchto vad a jejich měření. Dále je cílem zjištění možností detekce různých materiálů za použití termokamery.

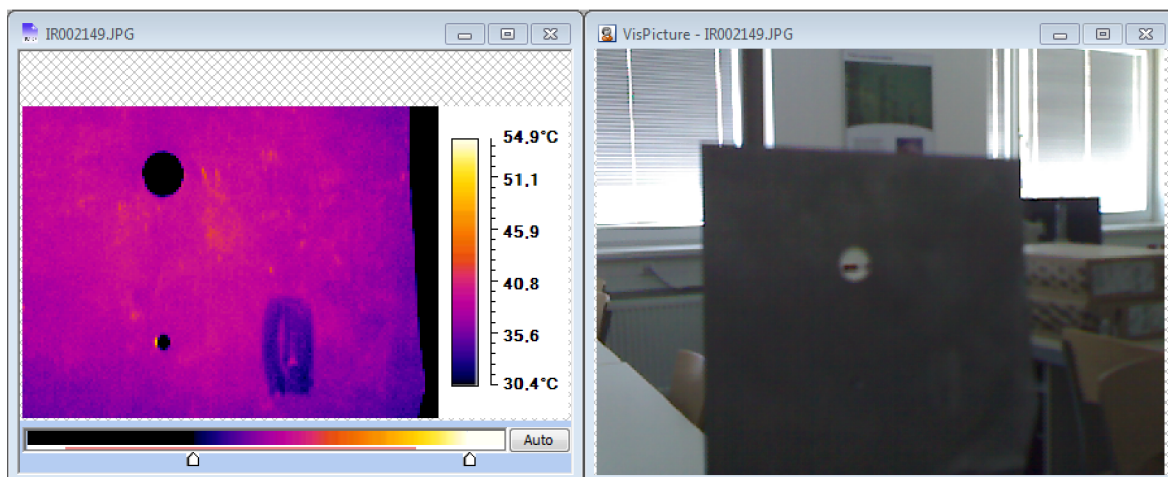
8.2.1 Zadání

- Nalezněte způsoby snímání defektů v plechu.
- Zhodnoťte způsoby osvětlení scény pro různé druhy snímání.
- Pokuste se detekovat vady uvnitř plechu, případně na odvrácené straně plechu.
- Nalezené defekty vyhodnoťte a zařaďte do několika tříd (škrábance, prohnutí, otvor).
- U defektů určete jejich rozměry.
- Navrhněte způsob zjišťování tloušťky plechu pomocí termokamery.
- Navrhněte možnosti detekce jednotlivých materiálů, případně barev pomocí termokamery.
- Srovnejte možnosti defektoskopie u různých druhů plechů (hliník, nerez, železo,...)
- Srovnejte možnosti defektoskopie u dalších materiálů (plast, sklo, keramika,...)

8.2.2 Ověření řešitelnosti

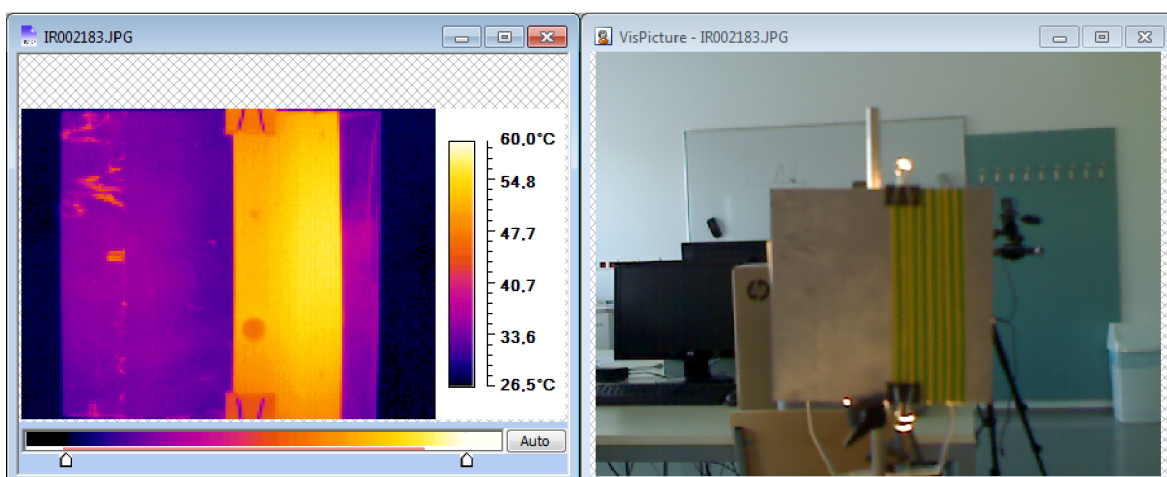
Vhodným ověřením řešitelnosti bylo experimentem vyzkoušet všechny možné varianty sledování různých vad, nasvícení scény, tloušťky plechu a různé kovové materiály. Výsledky těchto experimentů jsou na Obr. 8.2.1 až Obr. 8.2.6.

Na Obr. 8.2.1 je zobrazený nahřátý nerezový plech, v němž jsou vyražené dva otvory o různých průměrech a který má na povrchu plošný defekt způsobený poškrábáním ruční bruskou. Ačkoliv na snímku vpravo, pořízeném klasickým fotoaparátem přímo v těle termokamery, není malý otvor a škrábanec od ruční brusky téměř vidět, na obrázku z termokamery (vlevo) jsou všechny tři defekty velmi zřetelné.



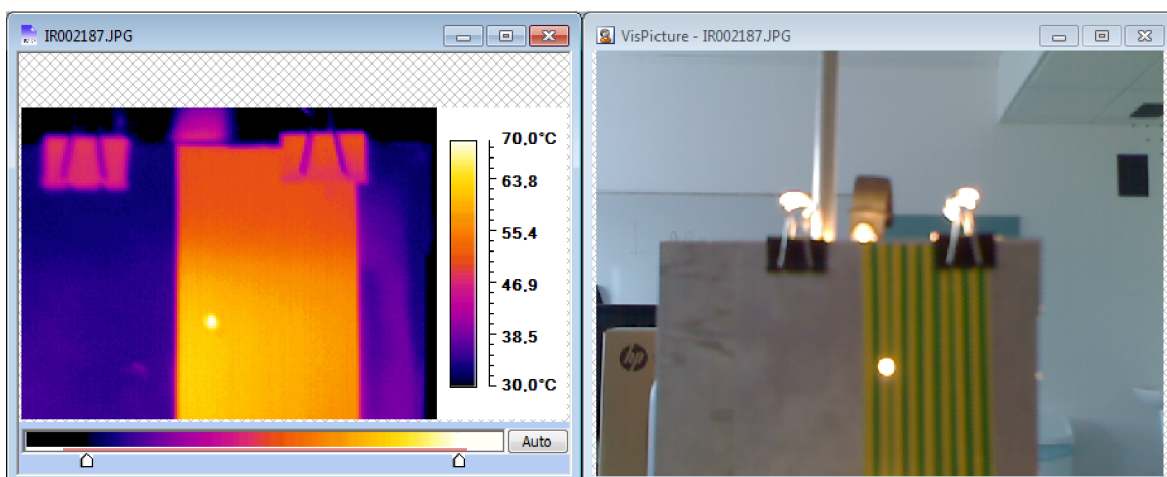
Obr. 8.2.1: Nahřátý nerezový plech s otvory a defektem od ruční brusky

Je jisté, že správným nasvícením scény by byly defekty viditelné i na klasické kameře. Důkazem lepší použitelnosti termokamery je Obr. 8.2.2. Zde jsou pořízené snímky nerezového plechu, který má otvory zakryté zezadu plátem plechu ze stejného materiálu a zepředu neprůhlednou lepicí páskou. Celá scéna je zezadu nasvícená halogenovým reflektorem o výkonu 500 W. Na snímku z klasické kamery (vpravo) není ani jeden z otvorů viditelný. Termokamera (levý snímek) ale otvory odhalí. Důvodem je vyšší teplota lepicí pásky v místě kontaktu s plechem, který je tepelně velmi dobře vodivý. V místech otvorů ke kontaktnímu vedení tepla nedochází, páska je zde chladnější.



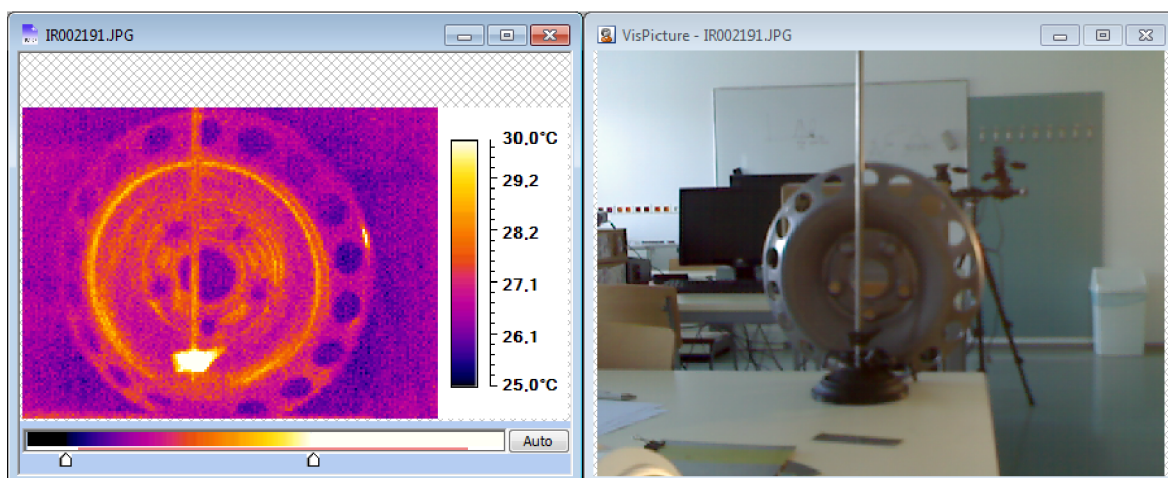
Obr. 8.2.2: Nerezový plech, nahříváný zezadu, se zakrytými otvory

Další možností využití termokamery je snímání tloušťky plechu. Takovouto schopnost zobrazuje Obr. 8.2.3. K nerezovému plechu jsou na odvrácené straně připnuté plátky plechu ze stejného materiálu. Tloušťka plechu je při horní hraně několikanásobně větší než níže. Na snímku z běžné kamery (vpravo) žádný rozdíl nepozorujeme. Pokud inkriminované místo překryjeme lepicí páskou, která má mnohem vyšší emisivitu než lesklý plech, můžeme na termosnímku (vlevo) rozdíl teplot pozorovat. Při zahřívání plechu z odvrácené strany dojde k rychlejšímu zahřátí přední strany části s menší tloušťkou. Lepicí páska tento efekt pouze znásobí tím, že lépe pozorujeme skutečnou teplotu plechu (povrch lepicí pásky na rozdíl od povrchu plechu téměř neodráží teploty z okolí).



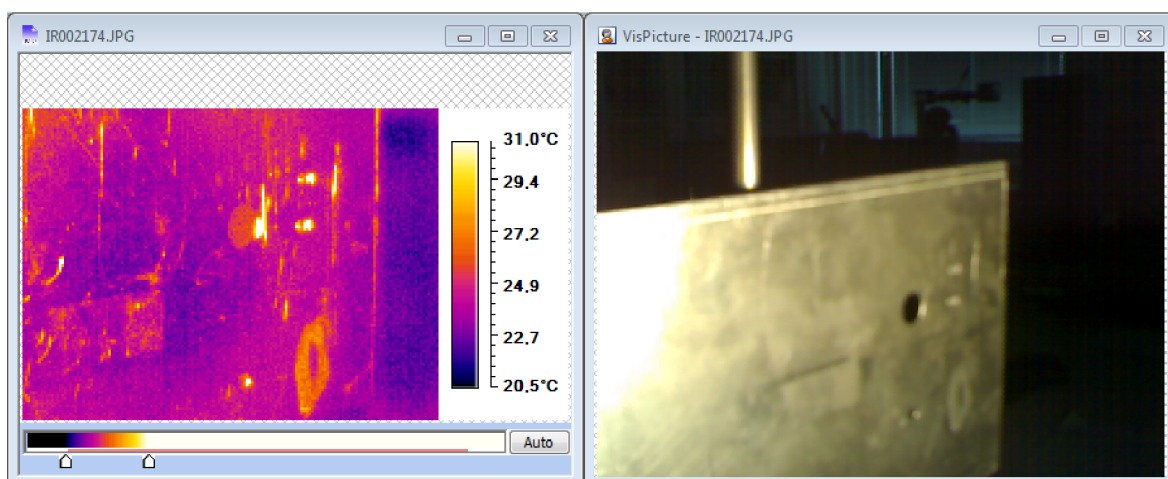
Obr. 8.2.3: Nerezový plech o různé tloušťce, nahříváný zezadu

Pozorování různých tlouštěk materiálů a případných vad lze provozovat například na odlitcích ráfků od aut (viz Obr. 8.2.4).



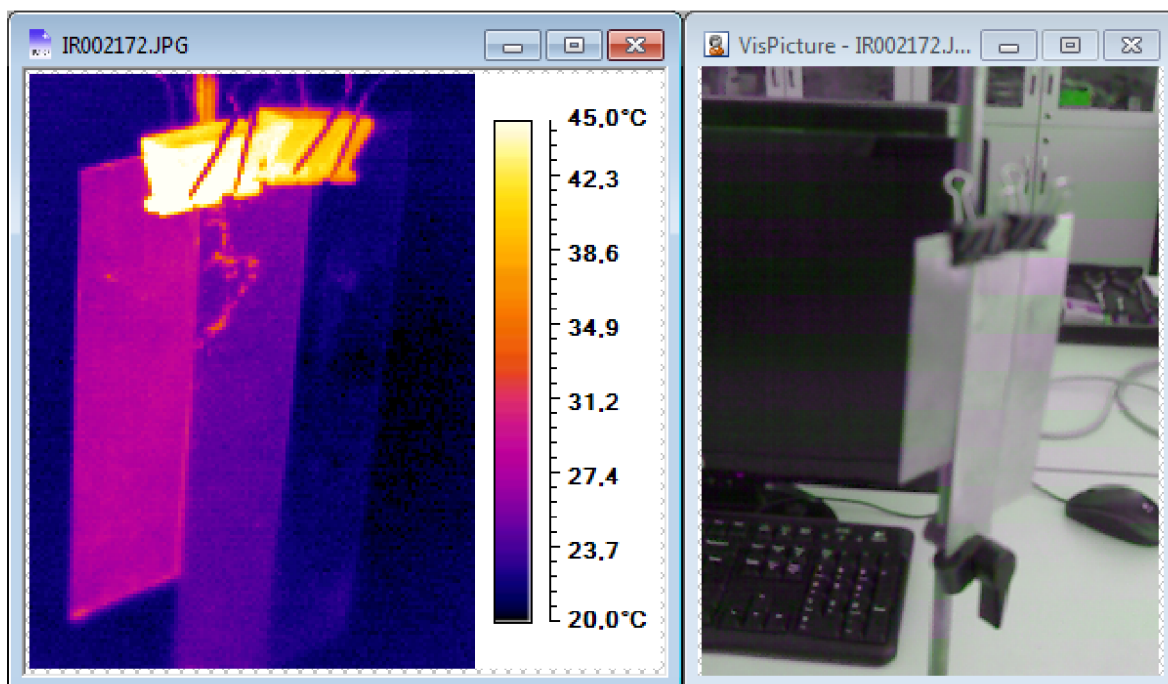
Obr. 8.2.4: Nahřátý automobilový ráfek

Na hliníkovém plechu z Obr. 8.2.5 můžeme při správném nasvícení pozorovat i různé defekty. Halogenový reflektor přitom nesmí plech nasvětlovat pod takovým úhlem, aby se teplo odráželo přímo do objektivu termokamery. Přesto je nastavení nasvícení scény pro pořízení termosnímku velice rychlý proces. Dá se předpokládat, že by tyto defekty byly pozorovatelné i na snímcích z běžných kamer. Bohužel je velmi pravděpodobné, že v takovém případě by bylo velmi náročné scénu dobře nasvítit.



Obr. 8.2.5: Hliníkový plech nasvícený zepředu pod úhlem, který neodráží teplo z reflektoru přímo do kamery.

Termokamerou lze mimo jiné i detekovat jednotlivé materiály. Na Obr. 8.2.6 je názorná ukázka, že tři stejně nahřáté plechy z různých materiálů se na termosnímku zobrazují různě. Mimo materiál lze zároveň sledovat i tloušťku, zde ovšem bez přímého zdroje tepla.



Obr. 8.2.6: Tři nahřáté plechy z různých materiálů (zleva nerez 0,6 mm, nerez 1,1 mm, hliník 0,9 mm)

8.2.3 Zhodnocení

Úloha je především experimentálního typu. Jedná se o průzkum veškerých možností, jaké nám termografie při snímání plechů, případně i jiných materiálů, nabízí. Na uvedených snímcích je patrné, že takováto úloha řešitelná je a že defekty v kovu jsou termokamerou pozorovatelné. Samozřejmě se nabízí otázka, jestli není lepší použít mnohokrát levnější klasickou kameru. Na některé typy defektů, jako jsou díry, běžná kamera vhodnější je, ovšem není možné s její pomocí snímat tloušťku materiálů, typy materiálů, či zakryté díry.

Obtížnost této úlohy odpovídá znalostem studenta bakalářského studia. Ačkoliv se v ní objevují prvky počítačového vidění, jejich obtížnost je pro bakalářskou práci adekvátní.

8.3 DIPLOMOVÁ PRÁCE - SLEDOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ PROKRVOVÁNÍ RUKOU Z JEJICH TERMOGRAMŮ

Použití termokamer v lékařství je stále častější. Dají se pomocí nich detekovat různé choroby a virová onemocnění.

Tato úloha je zaměřená na sledování prokrvování rukou prostřednictvím termokamery. V náznaku řešení úlohy je prezentován i konkrétní pozitivní nález zdravotního problému na ruce.

8.3.1 Zadání

- Navrhnete ideální způsob sledování prokrvování lidské ruky
- Eliminujte při sledování parazitní vlivy, jako i možné automatické přenastavování kamery
- Na základě získaných sekvencí snímků ruky zhodnoťte kvalitu prokrvování rukou, vyhodnoťte případná zranění.
- Část vyhodnocování zautomatizujte. Navrhnete algoritmus, který automaticky vyhledá klíčové body ruky (žíly, klouby, nehty, apod.) a sledujte průběhy jejich teplot.

8.3.2 Ověření řešitelnosti

Pro ověření řešitelnosti této úlohy bylo sestaveno pracoviště, které zobrazuje Obr. 8.3.1.

Při experimentu byla ruka ochlazená proudem studené vody, následně rychle osušena a položena na polystyrenovou desku pod termokameru.

Z pořízených snímků byly sestaveny celkem tři videosekvence (viz přílohu č. 7), zobrazující průběh prokrvování ruky. U první sekvence snímků (podadresář \left1) byla v Matlabu sestavena i sekvence 3D grafů, které byly následně vloženy do videa (video_grafy.wmv).

V příloze č. 7 je program v Matlabu, který zobrazí ve snímcích předem nadefinované významné body ruky (žíly na každém prstu a hřbetu ruky, místa bez žil,

klouby a nehty) a do grafů vynese průběhy teplot těchto jednotlivých bodů. U vybraných čtyř významných bodů zobrazí i grafy gradientů teploty.



Obr. 8.3.1: Pracoviště pro sledování prokrvování ruky

Ze všech přiložených souborů a generovaných grafů je vidět, že v některých okamžicích teploty poklesly. Zčásti byly poklesy způsobeny tím, že kamera si po určité době automaticky kalibruje rozsahy. Druhým důvodem je přítomnost silného šumu v obrázcích. Pro správné vyhodnocování sekvencí je ovšem potřeba oba tyto vlivy co nejvíce eliminovat.

8.3.3 Zhodnocení

Výše uvedeným experimentem je zaručena řešitelnost úlohy. Prokrvování lidské ruky je možné tímto způsobem snadno pozorovat i vyhodnocovat.

Na druhém videu (podadresář \left2\) je nasnímané prokrvování levé ruky se zraněním pod nehtem prsteníčku. Na videu je velmi dobře vidět, že s prsteníčkem není něco v pořádku, protože byl prokrvován nejrychleji a už od začátku měl znatelně vyšší teplotu než ostatní prsty. Při srovnání s prvním a třetím videem (podadresáře \left1\ a \right\) je velice dobře vidět, že takovéto snímání je při detekci zranění nebo chorob účinně použitelné.

Jelikož součástí zadání je požadavek na automatizaci celého procesu vyhodnocování sekvencí snímků, jsou potřebné hlubší znalosti z oblasti počítačového vidění a celý projekt je tak náročnější. Z tohoto důvodu se jedná o zadání vhodné pro diplomovou práci.

9. ZÁVĚR

Diplomová práce „Pracoviště termovize“ je sondou do termovizní techniky. V úvodu shrnuje základní pravidla a fyzikální zákony kolem tepelné výměny a snímání infračerveného záření. Dále jsou popsány nejběžnější oblasti, ve kterých se termovize využívá.

Druhá část práce nabízí průzkum trhu, kde jsou shrnuty vlastnosti konkrétních termokamer různých výrobců. Kamera, která byla pro diplomovou práci využívána (Guide EasIR-4) je v další kapitole rozebrána podrobně.

Ve třetí části jsou popsány návrhy několika úloh pro pracoviště termovize, které by byly vhodné pro předměty počítačového vidění. První dvě úlohy jsou spíše ukázkou, jak lze v laboratoři termokameru využít. Jedná se o měření vzdálenosti prostřednictvím termokamery a sledování různé tepelné kapacity několika vzorků omítek. Třetí úloha je experimentálně různorodá, a je tedy pro pracoviště termovize nejvhodnější. Skládá se ze čtyř experimentů – porovnání termogramů lidských obličejů v klidu a při fyzické zátěži, pozorování různé emisivity materiálů, sledování vlivu vzdálenosti předmětu na měření termokamerou a pozorování prokrvování lidské ruky. Ke každé úloze je na přiloženém CD průvodce úlohou pro studenty ve formátu PDF, DOC a ODT (viz přílohu č. 9).

V závěru práce jsou navrženy tři zadání pro bakalářské a diplomové práce. Tyto zadání svými obtížnostmi takovýmto pracem odpovídají. Navržená zadání jsou „Detekce hlav a osob v obraze z termokamery“, „Snímání a defektoskopie plechů s použitím termokamery“ a „Sledování a vyhodnocení prokrvování rukou z jejich termogramů“. Ke každé úloze je úspěšně proveden experiment, který ověřuje řešitelnost daného zadání.

Všechny snímky z termokamery a programy, které jsou v práci prezentovány, jsou v elektronické formě přílohami této diplomové práce.

LITERATURA

- [1] KAPLAN, Herbert. *Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment / by Herbert Kaplan. - 3rd ed.* Bellingham, Washington USA: SPIE PRESS, 2007. 166 pages. ISBN 978-0-8194-6723-2
- [2] Infrared Cameras Inc. *Infrared Cameras Inc - (IR) Infrared Camera & Thermal Imaging Infrared Solutions, Systems, & Thermography Training* [online]. 2010 [cit. 2010-05-07]. Dostupné na: <<http://www.infraredcamerasinc.com/>>.
- [3] TERMOVIZE s.r.o. *Termovize, termografická měření | Termovize* [online]. 2008 [cit. 2010-05-07]. Dostupné na: <<http://www.termovize.com/>>.
- [4] FLIR Systems, Inc. *FLIR SYSTEMS* [online]. 2010 [cit. 2011-05-17]. Dostupné na: <<http://www.flir.com/>>.
- [5] AFP. *AFP.com - International News, Photos, Videos, Graphics, World* [online]. 2009 [cit. 2010-05-07]. Dostupné na: <<http://www.afp.com/>>.
- [6] REUTERS. *Business & Financial News, Breaking US & International News | Reuters.com* [online]. 2009 [cit. 2010-05-07]. Dostupné na: <<http://www.reuters.com/>>.
- [7] Wuhan Guide Infrared Co., Ltd. *GUIDE® EasIR-4 Thermal Camera : User Manual*. China, 2009. 21 s.
- [8] NEWPORT ELECTRONICS, s.r.o. *Newport.cz* [online]. 1995–2005 [cit. 2011-01-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.newport.cz/techinfo/>>.
- [9] OptoTherm, Inc. *OptoTherm thermal imaging infrared camera systems* [online]. 2008 [cit. 2011-05-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.optotherm.com/>>.
- [10] SNELL, John; STUART, Michael. *Introduction to Thermography Principles*. USA : American Technical Publishers, Inc., Fluke Corporation, and The Snell Group, 2009. 68 s. ISBN 978-0-8269-1535-1.
- [11] Fluke Corporation. *Fluke electronics, Biomedical, Calibration and Networks* [online]. 2011 [cit. 2011-05-17]. Dostupné na: <<http://www.fluke.com/>>.

[12] Wuhan Guide. *Guide infrared* [online]. 2009 [cit. 2011-05-17]. Dostupné na: <<http://www.guide-infrared.com/>>.

[13] Termokamery.cz. *Termokamery* [online]. 2011 [cit. 2011-05-17]. Dostupné na: <<http://www.termokamery.cz/>>.

[14] Thermoteknix Systems Ltd. *Thermoteknix Systems Ltd Infrared Cameras* [online]. 2010 [cit. 2011-05-17]. Dostupné na: <<http://www.thermoteknix.com/>>.

[15] TESTO AG. *TESTO AG* [online]. 2011 [cit. 2011-05-17]. Dostupné na: <<http://www.testo.cz/>>.

[16] TSI System s.r.o. *TSI System* [online]. 2011 [cit. 2011-05-17]. Dostupné na: <<http://www.tsisystem.cz/>>.

SEZNAM ZKRATEK

AC – Alternating Current; střídavý proud

CMOS – Complementary Metal Oxide Semiconductor; druh obrazového senzoru

DPH – daň z přidané hodnoty

IR – infrared; infračervený

IRFPA/FPA – Infrared Focal Plane Array/Focal Plane Array; pole prvků citlivých na infračervené záření

LAN – Local Area Network; lokální síť

LCD – Liquid Crystal Display; displej z tekutých krystalů

PC – personal computer; osobní počítač

px – pixel

SD – secure digital; druh paměťových karet

USB – Universal Serial Bus; univerzální sériová sběrnice

SEZNAM PŘÍLOH

Všechny přílohy jsou pouze v elektronické podobě na přiloženém CD.

- Příloha č. 1: Termosnímky lidských hlav před fyzickou zátěží (IR001992.JPG, IR001994.JPG) a po fyzické zátěži (IR001993.JPG, IR001995.JPG). Složka na CD: `.\Behani_po_schodech\`
- Příloha č. 2: Termosnímky pořízené k hledání defektů v plechu. Složka na CD: `.\Defektoskopie\`
- Příloha č. 3: Termosnímky pro měření vzdálenosti pomocí terokamery. Složka na CD: `.\Mereni_vzdalenosti\`
- Příloha č. 4: Učící a testovací algoritmy v Matlabu; 20 termosnímků trénovacích a 11 termosnímků testovacích pro detekci hlav v obraze. Složka na CD: `.\Detekce_hlav\`
- Příloha č. 5: Termosnímky omítek. Složka na CD: `.\Omitky\`
- Příloha č. 6: Termosnímky plechovky, z poloviny obalené lepicí páskou. Složka na CD: `.\Plechovka\`
- Příloha č. 7: Tři sekvence termosnímků prokrvování rukou. Ke každé sekvenci je v Matlabu vytvořený algoritmus, který snímky vyhodnocuje. Každá sekvence je zpracována do videa (u první sekvence je formou videa zobrazen i průběh prokrvování v grafu). Složka na CD: `.\Prokrvovani_rukou\`
- Příloha č. 8: Porovnávací tabulky parametrů kamer firmy Wuhan (Guide), Fluke, Chino a Thermoteknix, dodané firmou Ahlborn, která spolupracuje na serveru www.termokamery.cz. Složka na CD: `.\Srovnani_termokamer\`
- Příloha č. 9: Zadání úloh pro cvičení z předmětů počítačového vidění ve formátech .odt, .doc a .pdf. Na CD se nachází v kořenovém adresáři.