



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

**INTELIGENTNÍ TERMOKAMERA S DETEKCI
NARUŠITELE**

INTELLIGENT THERMAL CAMERA WITH INTRUDER DETECTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

RÓBERT MYSZA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ GOLDMANN

BRNO 2018

Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií

Ústav inteligentních systémů

Akademický rok 2017/2018

Zadání bakalářské práce

Řešitel: **Mysza Róbert**

Obor: Informační technologie

Téma: **Inteligentní termokamera s detekci narušitele**

Intelligent Thermal Camera with Intruder Detection

Kategorie: Bezpečnost

Pokyny:

1. Seznamte se s problematikou termovize. Sumarizujte informace o principu fungování termokamer a vytvořte přehled dostupných termokamer na trhu. Zjistěte, které termokamery jsou vhodné pro nasazení do vestavěného systému.
2. Nastudujte, jak vypadá termogram člověka. Zaměřte se především na zjištění, které části lidského těla vykazují nízkou tepelnou variabilitu.
3. Navrhněte řešení postavené na mikrokontroléru, kameře, termokameře a wifi, které bude provádět detekci narušitele na základě termogramu. V případě detekce narušitele odešlete termogram a snímek z kamery na server.
4. Implementujte navržené řešení s důrazem na realizaci zařízení. Serverovou část pojměte jako jednoduchou aplikaci, která bude přijímat data.
5. Výsledné řešení otestujte a zhodnoťte úspěšnost detekce narušitele.

Literatura:

- CHIEN, Shih-Che, et al. Pedestrian characterization in infrared thermography imaging. In: *Advanced Robotics and Intelligent Systems (ARIS), 2016 International Conference on*. IEEE, 2016. p. 1-1.
- GOUBET, Emmanuel; KATZ, Joseph; PORIKLI, Fatih. Pedestrian tracking using thermal infrared imaging. In: *Proceedings of SPIE*. 2006. p. 797-808.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 a 2.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese

<http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva bakalářské práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap (20 až 30% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Goldmann Tomáš, Ing.**, UITS FIT VUT

Datum zadání: 1. listopadu 2017

Datum odevzdání: 16. května 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav inteligentních systémů
602 00 Brno, Božetěchova 2

doc. Dr. Ing. Petr Hanáček
vedoucí ústavu

Abstrakt

Technológia termovízie začína byť čoraz viac rozšírenou a používanou v monitorovacích a bezpečnostných aplikáciach. Táto práca rozoberá jej využitie na detekciu objektov a popisuje metódy a algoritmy k tomu uplatniteľné. Taktiež skúma faktory, ktoré majú vplyv na teplotu povrchu ľudského tela. Súčasťou práce je návrh zariadenia posielajúceho snímky na server, ktoré je schopné detekovať narušiteľa pomocou jeho teploty. Zariadenie posiela snímky na server. V poslednej časti sa zaoberám testovaním úspešnosti detekcie a jej zhodnotením.

Abstract

Thermovision technology is becoming more and more widespread in monitoring and security applications. This bachelor thesis deals with its usage for object detection and describes methods and algorithms capable to do this. I also studied factors, which effects the human skin temperature. The device, which sends images to the server and it's able to detect an intruder by his temperature is part of this thesis. The last chapter contains evaluation of tests for detection reliability.

Klíčové slová

termovízia, termografia, termogram, termokamera, termálne snímky, detekcia objektov, kamera s mikrokontrolérom, návrh zariadenia, bezpečnosť

Keywords

thermovision, thermography, termogram, thermocamera, thermal images, object detection, camera with microcontroller, device design, security

Citácia

MYSZA, Róbert. *Inteligentní termokamera s detekci narušitele*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Tomáš Goldmann

Inteligentní termokamera s detekci narušitele

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením pána Ing. Tomáša Goldmanna. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

.....
Róbert Mysza
21. mája 2018

Podakovanie

Veľmi rád by som sa chcel poďakovať za podporu vedúcemu práce Ing. Tomášovi Goldmannovi, ktorý ma dokázal dohnať k dokončeniu a spoločnými stretnutiami pomôcť pri realizácii, taktiež veľká vďaka patrí rodine a všetkým, ktorí ma podporovali.

Obsah

1	Úvod	2
2	Termovízia a termokamery	4
2.1	Vývoj termokamier	5
2.2	Moderné termokamery	9
3	Detekcia objektu v termograme	15
3.1	Faktory ovplyvňujúce detekciu	15
3.2	Teplota povrchu tela a vplyvy na jej zmenu	16
3.3	Zvierací narušiteľ	18
3.4	Algoritmy použiteľné na detekciu	19
4	Návrh zariadenia	22
4.1	Výber komponentov	22
4.2	Popis termokamery FLIR Lepton	24
4.3	Návrh a výroba plošného spoja	32
5	Implementácia softvéru	36
5.1	Program mikrokontroléra	36
5.2	Serverová časť	41
6	Testovanie	44
6.1	Testovacie prípady	45
6.2	Zhodnotenie úspešnosti detekcie	47
7	Záver	48
	Literatúra	50
A	Obsah CD	53

Kapitola 1

Úvod

Predstavme si nasledujúcu situáciu. Máme nejakú budovu, napríklad náš dom, ktorý by sme chceli nechať strážiť, aby sa nám doň niekto nevlámal, zatiaľ čo v ňom nie sme. Mohli by sme si najatť strážnika, ale tomu by sme museli pravidelne platiť. Preto sme sa rozhodli, že si zaobstaráme kamerový systém. Ak by sme chceli, aby fungoval plne automatizovane, musel by vedieť narušiteľa nejakým spôsobom detekovať. Dnešné kamery už obsahujú infračervené podsvietenie, čiže vedia fungovať aj za tmy. Lenže, problém nastáva, ak sa objaví zlé počasie, hmla alebo dym, cez ktorý bežná kamera nemá šancu snímať. Práve na takúto situáciu by bolo vhodné použiť termokameru. Tá vie snímať sledované prostredie aj za úplnej tmy, za zlého počasia, cez hmlu aj dym a vieme pomocou nej nájsť napríklad teplotný rozsah, ktorý by sa dal približne priradiť človeku. Pri jeho nájdení vieme spustiť alarm, ale lepším riešením je použiť ďalšiu prídavnú digitálnu kameru, ktorá by zrobila snímok a ten by bol spolu s termogramom poslaný pomocou Wi-Fi na server, cez ktorý si vieme vzdialene skontrolovať, či sa nejedná o planý poplach. A práve presne toto je účel, kvôli ktorému vznikla táto bakalárska práca spojená s takýmto zariadením, v ktorom sa nachádza termokamera, kamera a Wi-Fi modul.

Pri technológii termokamier sa stále jedná o pomerne drahé riešenia, ktoré si nemôže dovoliť každý. V posledných rokoch ale nastal menší rozkvet, ktorý môže súvisieť aj s rozširovaním kupovania elektroniky z čínskych internetových obchodov. Tie sa dostali do povedomia ľudí hlavne kvôli nízkej cene tovarov. V ich sortimente sa dajú nájsť aj cenovo priaznivé termokamery, ktoré ale aj tak začínajú na cene niečo málo 100€. Problémom je, že pre bežného človeka nemajú dostatočne presvedčujúce využitie. V zabezpečovacích systémoch kralujú rôzne digitálne kamery s infračerveným podsvietením, alebo postačujú aj lacnejšie teplotné PIR senzory. Termokamery by mohli byť využité napríklad pri hľadaní vlhkých miestach s tvorbou plesní v budove, alebo pri teplotných únikoch z budovy. Jedná sa ale o krátkodobé jednorázové použitie, na ktoré sa ju bežnému človeku neoplatí kupovať.

V mojej práci som sa na začiatku zaoberal základmi termovízie, definoval som niektoré základné pojmy súvisiace s infračerveným spektrom svetla, ktoré sa termovízia snaží detekovať. Načrtol som použiteľnosť termokamier a ich postupný vývoj, za ktorým stálo mnoho vedeckých objavov, cez ktoré sa dostali až do dnešnej podoby. Rozobral som ich princíp fungovania a typy, s ktorými sa môžeme stretnúť pri použiteľnosti na konkrétne úlohy. Bližšie som sa pozrel na jadrá termokamier, ktoré tvoria základ čipov použiteľných v spojení s mikrokontrolérom.

V ďalšej kapitole som skúmal, akým spôsobom je možné detekovať objekty v termograme. Detekciu ovplyvňujú rôzne faktory, od špecifických chovaní infračerveného svetla, až po teplotu tela, ktorá sa môže meniť v závislosti od viacerých vplyvov. Reč neostala len

pri ľuďoch, ale pozrel som sa aj na zvieratá, ktoré môžu byť taktiež nepríjemným narušiteľom objektu. Na konci kapitoly som sa pozrel na algoritmy, cez ktoré musí snímok prejsť, aby sme na ňom mohli uskutočniť detekciu, a zrobil som prehľad funkčných detekčných metód, postavených na prácach výskumníkov.

Nasledujúca kapitola sa už týka môjho návrhu a začína popisom postupu pri výbere komponentov, na ktorých bude postavené moje zariadenie. Značná časť kapitoly je venovaná konkrétnej vybranej termokamere, ktorá je súčasťou môjho návrhu a ktorej fungovanie bolo potrebné pochopiť, aby som ju vedel použiť a rozhodiť. Jedná sa hlavne o komunikačné protokoly na prenos videa a konfiguráciu, ale aj rôzne režimy kamery, ktoré majú vplyv na výsledný obraz a taktiež detekciu v ňom. Sekcia návrhu plošného spoja rozoberá, pomocou akých sériových protokolov a cez aké piny sú pripojené kamery a iné GPIO súčasti ku mikrokontroléru. Na tieto veci je braný ohľad pri návrhu, ktorého výsledkom je schéma plošného spoja. Tú treba prevteliť do fyzickej podoby. Môj postup výroby dosky plošného spoja je taktiež súčasťou.

Ako ďalšia dôležitá vec je implementácia softvéru pre mikrokontrolér. Popísal som všetky nástroje, ktoré som pri tom použil a načrtol som štruktúru môjho programu, spolu s rozdelením do komponentov. Zameril som sa hlavne na programovo dôležité, ale aj zaujímavé časti. Súčasťou je aj spôsob, ktorým je možné konfigurovať program. Následne som predstavil moje riešenie programu bežiaceho na serveri, akým spôsobom s ním komunikujú mikrokontrolér a webovú klientu, ktorým zobrazuje webové rozhranie.

Záverečnú časť práce tvorí otestovanie môjho výsledného riešenia a zhodnotenie úspešnosti detekcie, či má navrhnuté zariadenie reálny zmysel a je vhodné na použitie v reálnych podmienkach.

Kapitola 2

Termovízia a termokamery

Táto kapitola obsahuje základný prehľad o termovízii, o čo sa jedná a aké súvislosti sú s ňou spojené. Pozriem sa na vlastnosti termokamier a ich výhody oproti bežným kamerám. Postupným historickým vývojom sa dostanem až k dnešným moderným kamerám a ich princípu fungovania, ako sú tvorené. Dostanem sa k aktuálnemu prehľadu termokamier na trhu, konkrétne ku kompletným kamerovým riešeniam a aj ku modulom kamier použiteľných s navrhnutým elektronickým zariadením obsahujúcim mikrokontrolér.

Termovíziou sa dá nazvať technológia, ktorá sa snaží o detekovanie teplotných rozdielov medzi prostredím a objektmi v popredí obrazu. K tomuto účelu využíva techniky infračerveného zobrazovania, inak nazývaného aj termografia.

Termografia je rýchlo sa rozvíjajúci vedný obor, za čo môže vdačiť aj rozvoju mikroelektroniky a teda rozvoju mikročipov s infačervenými snímačmi. Zaoberá sa zachytením, spracovaním, analýzou a zobrazením tepelného žiarenia. Výsledkom je infračervený snímok nazývaný termogram. V podstate sa jedná o grafickú reprezentáciu tepla. Jej využitie je rôznorodé, používa sa jak pri výskume a vývoji, tak aj v rôznych odvetviach priemyslu, napríklad pri defektoskopii (nedeštruktívne testovanie výrobkov), monitorovaní podmienok, prediktívnej údržbe, znižovaní nákladov na energie v budovách, detekcii rôznych druhov plynov a podobne.

Ak hovoríme o teple, hovoríme o tepelnej energii, ktorú teleso prijíma alebo odovzdáva inému telesu. Prenos tejto energie nastáva len vtedy, ak je medzi nimi teplotný rozdiel. Dôležitý fakt je, že ak sa v skúmanom prostredí žiadny teplotný rozdiel nevyskytuje, nie je možné v zachytenom termograme pozorovať žiaden kontrast, ktorý by sme mohli ďalej interpretovať a analyzovať.

V princípe sa prenáša energia z teplejších na chladnejšie telesá a môže to prebiehať 3 spôsobmi:

- **vedenie tepla** (kondukcia) – pomocou fyzického kontaktu molekúl látky,
- **šírenie tepla** (konvekcia) – v kvapalinách alebo plynoch kvôli meniacej sa hustote látky vplyvom teploty,
- **žiarenie tepla** (radiácia, alebo inak aj sálanie) – bez fyzického kontaktu pomocou tepelného žiarenia.

Posledným spomenutým typom prenosu tepla sa termografia zaoberá. Spomenuté *tepelné žiarenie* je elektromagnetické žiarenie emitované každým objektom s teplotou vyššou ako absolútna nula ($-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$), ktoré je vytvárané pohybom nabitých častíc v látke.

Spektrum tohto žiarenia je teoreticky popísané pomocou žiarenia *absolútne čierneho telesa* v stave tepelnej rovnováhy, kedy neprebíha žiadna výmena tepla. Jedná sa o idealizovaný objekt, ktorý absorbuje všetok elektromagnetického žiarenie, ktoré naň dopadne. Žiarenie, ktoré tento objekt vyžiari, je popísané pomocou Planckovho zákona [40]. Príkladom tepelného žiarenia vyžiareného obyčajnou žiarovkou môžu byť vlnové dĺžky (λ):

- **viditeľné svetlo** (400 – 700 nm),
- **infračervené svetlo** (700 nm – 1 mm).

Viditeľné svetlo je jediný typ žiarenia rozoznateľný ľudským okom. Pre človeka je veľmi dobre známe, pretože bez neho by nebol schopný rozpoznať farby a teda ani vidieť. Farba v tomto zmysle predstavuje odraz svetla z povrchu objektov, na ktorého zaznamenanie stačí použiť bežne dostupné kamery.

Naproti tomu spektrum infračerveného (IR) svetla tvoria vlnové dĺžky vyššie než tie, ktoré je človek schopný rozoznať zrakom. Väčšina vyžarovaného tepelného žiarenia je práve IR. To samotné je ešte rozdelené do niekoľkých pásiem [12]:

- **NIR** – blízke IR žiarenie (0,75 – 1,4 μm),
- **SWIR** – krátkovlnné IR žiarenie (1,4 – 3 μm),
- **MWIR** – strednovlnné IR žiarenie (3 – 8 μm),
- **LWIR** - dlhovlnné IR žiarenie (8 – 15 μm),
- **FIR** – ďaleké IR žiarenie (15 – 1000 μm).

Na zaznamenanie týchto vlnových dĺžok je nutné použiť špecializované zariadenie. K toľto účelu sa používa termokamera.

2.1 Vývoj termokamier

Jedným zo spôsobov, ako zmerať teplotu objektu, môže byť pomocou jeho priameho kontaktom s teplomerom alebo podobným zariadením. To nemusí byť vždy úplne praktické. Iný spôsob môže byť použiť termokameru. Tá zaznamenáva infračervené žiarenie, ktoré je vyžarované do priestoru. Funguje teda bezkontaktné a na diaľku. Oproti bežnému teplomeru má aj ďalšiu výhodu, pretože vie zaznamenávať teplotné rozloženie celého snímaného priestoru. Tieto tepelné informácie sa dajú potom uložiť a zobrazit formou termogramu.

Svojím fungovaním sa dá termokamera porovnávať skôr s bežnou kamerou. Taktiež používa k zaznamenaniu obrazu nejaký druh šošoviek. Tie sú ale špecializované a doplnené aj o iné senzory (podrobnejšie v sekcii 2.2).

Výhody, ktoré poskytuje, sú [27]:

- Na zaznamenávanie obrazu nepotrebuje žiaden zdroj svetla a teda žiadne osvetlenie. Môže byť používaná za hocíjakých svetelných podmienok a teda aj za úplnej tmy. To môže byť výhodné na detekciu nežiadúcich osôb v blízkosti strážených budov počas noci.
- Dokáže detekovať objekty vyžarujúce teplo (človek, zviera, auto) aj na veľké vzdialenosti. Vysoký tepelný kontrast umožňuje širokouhlú detekciu cieľa, v najlepšom prípade až do vzdialenosti 50 kilometrov. Preto je výhodné pomocou nej sledovať napríklad ľudí na diaľku.

- Nerobí jej problém vidieť cez dym, prach alebo hmlu, keďže tepelná energia cez ne ľahko prejde. Kvôli tomu je používaná napríklad na zisťovanie lesných požiarov. Navyše, pomocou teplotných rozdielov dokáže odhaliť objekty pod povrchom iného materiálu, napríklad trámy poza stenou alebo predmety pod oblečením.
- Môžeme pomocou nej presne monitorovať teploty dôležitých zariadení a v prípade prekročenia teploty poslať upozornenie alebo spustiť alarm, napríklad vo výrobnom závode alebo v datacentre. Tým vieme zaručiť bezpečnosť a zabrániť nechcenným scenárom.

Napriek tomu, že má termokamera veľa výhod oproti bežnej kamere, je pár vecí, v ktorých sa jej kvôli určitým limitáciám nevyrovná [27]:

- Spolieha sa na kontrast teplôt narozdiel od kontrastu farieb, na ktorý je zvyknutý človek. Znamená to, že sa pomocou nej nedajú presne rozoznávať detaily objektu, ktorý má rovnomernú teplotu po celom povrchu. Rozpoznanie textu alebo hocikakého vizuálneho povrchu je vylúčené.
- Aj keď vieme ľudí ľahko detekovať, chýbajú nám detaily na to, aby sme ich vedeli presne identifikovať, o koho sa jedná.
- Pretože sklo emituje svoje vlastné teplo a čiastočne odráža tepelnú energiu, termokamery nevidia cez neho vidieť. Nevíme pomocou nich vidieť spoza okien do budov ani cez okná áut.
- Majú nižšie rozlíšenie oproti súčasným optickým senzorom. V súčasnosti je bežné maximálne rozlíšenie 640x480 pixelov.

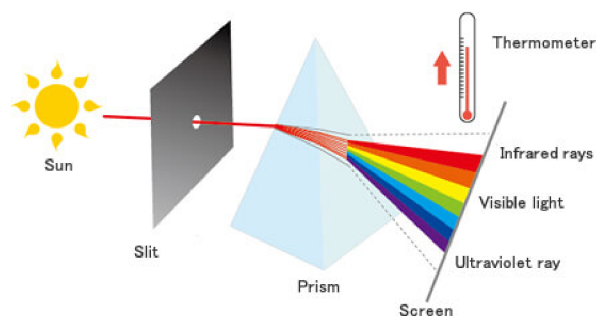
Historické aspekty vývoja

Tak ako každý technologický výtobytok dnešnej doby, aj termokamery si museli prejsť postupným vývojom. Infračervené žiarenie bolo pre ľudí neznáme až do 11. februára 1800, kedy astronóm Sir William Herschel uskutočnil experiment s teplomerom. Podstatou bol sklenený hranol, cez ktorý nechal prechádzať slnečné žiarenie, ktoré sa rozptýlilo do farebnej dúhy, tzv. farebného spektra (obrázok 2.1). Následným meraním teplôt každej farby zistil, že od modrej smerom k červenej farbe sa teplota zvyšovala. V oblasti za červenou farbou, kde už nevidel žiadnu farbu, bola teplota najvyššia. Znamenalo to, že tam musí byť iný, voľným okom neviditeľný, typ svetla. Ten sa stal známy ako infračervené svetlo. Slovíčko „infra“ bolo odvodené od latinského slova „nižšie“, spojeného s nižšou frekvenciou IR svetla [32].

Dôležité kroky vývoja IR detektorov sú spojené s *termálnymi detektormi*, ako napríklad bolometer a termočlánok, používanými dodnes. Ich výhodou je, že sú citlivé obvykle na všetky vlnové dĺžky z IR spektra a pracujú pri izbovej teplote.

Druhý typ detektorov, nazývané *fotónové detektory*, boli vyvíjané hlavne počas 20. storočia z dôvodu vylepšenia citlivosti a dobu odozvy. Ich rozsiahly vývoj začal od roku 1940, v období 2. svetovej vojny. Prvý IR detektor použiteľný v praxi, zložený zo sulfidu olovnatého (PbS), vedel zachytiť IR vlnové dĺžky s citlivosťou do približne 3 μm . Po skončení vojny pokračoval vývoj detektorov hlavne v oblasti vojenských aplikácií.

Objavenie premenlivého zakázaného pásu elektrónov (nachádza sa medzi vodivostným a valenčným pásom, jeho prekonaním sa látka stáva vodivou) v trojzložkovej zliatine HgCdTe



Obr. 2.1: Herschelov experiment. Známy príklad rozkladu svetla na jeho spektrum [4].

sa podarilo Lawsonovi a jeho spolupracovníkom v roku 1959 a započali tým novú éru IR technológií, ktoré boli neskoršie použité v astronómii.

Postupne začal rásť záujem o IR technológie aj v civilnej sfére. Mohol za to fakt, že použitím nových materiálov a technológií došlo k postupnému zníženiu ich ceny. Vznikol nový typ detektorov z názvom FPA. Používajú sa dodnes [36].

Termálne detektory

Ich základ bol položený v roku 1821, kedy Nemeč Thomas Johann Seebeck objavil, že spojením dvoch rôznych kovov na ich jednom konci a privedením tepla na ich druhé konce sa generuje malé elektrické napätie, ktoré závisí od použitých kovov a od rozdielu teplôt medzi spojeným a voľnými koncami. Tento prevod tepla na elektrické napätie sa nazýva Seebeckov jav, alebo aj termoelektrický jav.

V roku 1829 skonštruoval Nobili prvý termoelektrický článok na princípe termoelektrického javu [6]. Melloni prišiel s myšlienkou spojenia niekoľkých termočlánkov do série a tým vytvoril teplotné čidlo. To generovalo vyššie a teda merateľné výstupné napätie, lineárne sa zväčšujúce s počtom pripojených termočlánkov. Tie boli zložené z bizmutu a antimónu [7].

Bolometer, zariadenie na meranie elektromagnetického žiarenia, sa objavilo v roku 1880. Langley použil na jeho výrobu 2 tenké čierne pásiky platinovej fólie spojené tak, aby tvorili ramená Wheatstonovho mostíka, pripojené ku galvanometru a batérii. Jeden pásik bol radiácii vystavený, druhý bol voči nej tienený. Elektromagnetické žiarenie dopadajúce na vystavený pásik ho zahrieva a tým mení jeho odpor. Langley pokračoval vo vylepšovaní bolometra a jeho najnovší bol natoľko sofistikovaný, že vedel detekovať žiarenie z kravy vzdalenej štvrt míle. Umožňoval mu zachytiť rozdiely v teplote s presnosťou na $0,00001\text{ }^{\circ}\text{C}$, čím vedel rozoznať všetky hlavné Fraunhoferové čiary. [8]. Nikola Tesla navrhol Langleymu, ako by mohol bolometer vylepšiť pridaním veľmi malého rezistoru a osobne ho požiadal, či by mohol použiť jeho zariadenie na experimenty s prenosom elektrickej energie v roku 1892. Kvôli tomuto použitiu sa mu podarilo preniesť signál na vzdialenosť približne 30 míľ medzi West Point a jeho laboratóriom na Houston Street [3].

Fotónové detektory

Fotovodivosť prvýkrát spozoroval Smith v roku 1873. Tyče selénia, ktoré slúžili ako veľké odpory v obvodoch použitých na testovanie dlhých podvodných káblov, mali za prítomnosti svetla menší elektrický odpor. Jednalo sa o objav fotorezistoru, ktorý spustil vlnu výsku-

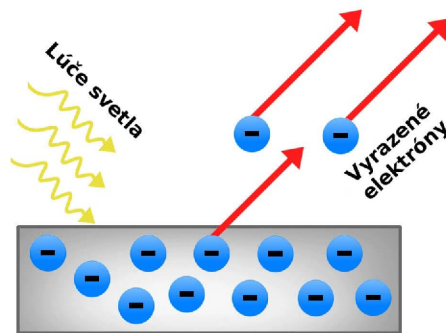
mov. Bolo vydaných nespočet článkov a patentov súvisiacich s fotocitlivým selénom, čo viedlo začiatkom 20. storočia k začatiu jeho používania na snímanie svetla a teda k rozvoju fotónových detektorov [14].

Pán Hertz v roku 1887 objavil, že pri vystavení určitých kovov ultrafialovému svetlu sú z nich vyrážané elektróny, ktoré sa potom voľne pohybujú v látke a zvyšujú jej vodičnosť. Tento princíp sa nazýva *fotoelektrický jav* a je ilustrovaný na obrázku 2.2. Neskoršie štúdie zistili, že sa dá dosiahnuť aj s viditeľným svetlom za použitia elektród vyrobených z alkalických kovov.

Prvý infračervený fotovodič s vysokou citlivosťou bol vyvinutý Caseom v roku 1917. Ten objavil, že zlúčenina sulfidu tálneho je fotovodivá. Neskôr zistil, že spektrálna citlivosť sa dá ešte zdvihnúť pridaním kyslíka [13].

V roku 1933 Kutzscher na University of Berlin objavil, že sulfid olovnatý, získaný z prírodného galenitu objaveného v Sardínii, je taktiež fotovodivý [14].

Počas 50. rokov 20. storočia boli IR detektory vyrábané primárne kvôli armádnemu účelu hľadania vzdušných rakiet. Najpoužívanejšie detektory boli polykrystalické a obsahovali základnú zložku octan olovnatý.



Obr. 2.2: Fotoelektrický jav. Svetlo dopadajúce na povrch kovu vyrazí z atómov látky elektróny.

Výroba detektorov

Základným problémom pri výrobe infračervených detektorov a celkovo všetkých polovodičových komponentov je nanosenie filmu na povrch substrátu. Film je tenká vrstva látky hrúbky od jedného atómu až po niekoľko mikrometrov. Pri infračervených detektoroch predstavuje film fotovodivú zlúčeninu reagujúcu na intenzitu žiarenia.

Na nanosenie existuje veľké množstvo metód, najčastejšie sa ale používajú techniky *vákuovej depozície*. Tá prebieha pod tlakom nižším ako je atmosférický tlak, napríklad vo vákuu.

Techniky rozdeľujeme na 2 metódy:

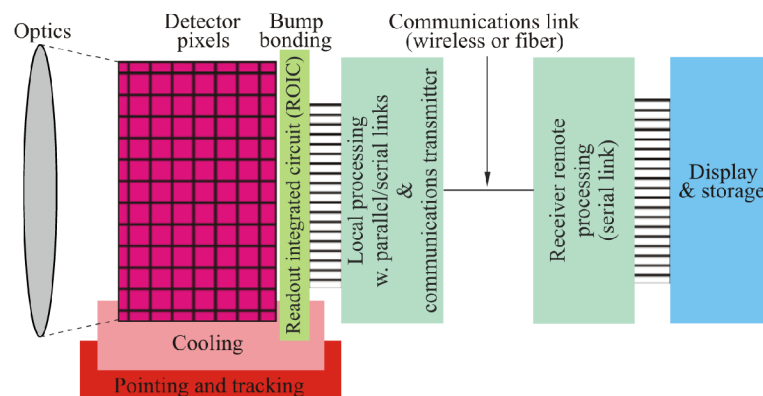
1. fyzikálna depozícia (PVD),
2. chemická depozícia (CVD).

Pri PVD je látka odstraňovaná zo zdroja odparovaním alebo odprašovaním, teda premieňa sa z kondenzovanej formy na plyn, a následne prenosom a nanosením na substrát skondenzuje späť do tuhého stavu. Najpoužívanejšou metódou je *vákuové naparovanie*.

CVD narozdiel od PVD prebieha vďaka chemickej reakcii. Substrát je za vysokej teploty vystavený tzv. prekursorom v plynnej forme, ktoré sa na jeho povrchu rozkladajú alebo vzájomne interagujú a vzniká tak žiadaná vrstva. Pri tomto procese vznikajú vedľajšie produkty, ktoré sú odstraňované prúdom plynu alebo vakuom. Existuje viacero metód, napríklad *CVD podporované plazmou* alebo *CVD atómových vrstiev* [9].

2.2 Moderné termokamery

V dnešnej dobe existuje nespočet technológií a typov termokamier, ktoré sa dajú použiť. Vývoj ide neskutočne rýchlo dopredu a je veľmi jednoduché sa v tom všetkom stratit. Pred vybraním toho správneho typu je potrebné zvážiť niekoľko kritérií. V prvom rade sa jedná o účel a prostredie použitia. Na čo daná termokamera bude potrebná? Môže byť univerzálna, vhodná na širokú škálu aplikácií. Alebo sa môže jednať o špecializovanú úlohu s konkrétnymi požiadavkami za špecifických podmienok, napr. zabezpečenie a detekcia narušiteľov, detekcia plynov, v zdravotníctve napr. na nájdenie nádorov, v priemyselných odvetviach alebo na vedecké a výskumné účely. Ďalšia otázka môže byť, či bude praktické si kameru kúpiť, nejakú si požičať alebo si najatť profesionála z oblasti termografie. S aktuálnymi cenami kamier sa stávajú čoraz viac dostupné a atraktívne aj pre bežných ľudí nepracujúcich vo vede a výskume. Avšak, ak bude potrebná na nejaký špecifický projekt riešiaci netriviálny problém, vhodnou voľbou je najatť si odborníka. Dôležitá otázka bude ale samozrejme cena. Podľa daného rozpočtu sa bude odvíjať aj vybavenie, ktoré bude možné za to nakúpiť.



Obr. 2.3: Schéma snímacieho systému zobrazujúca dôležité podsystémy [33].

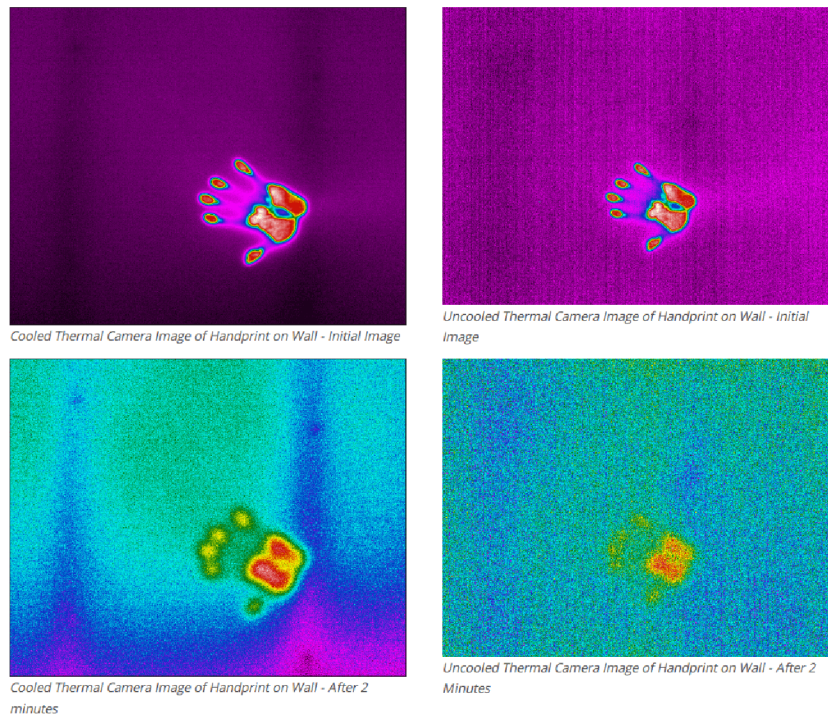
Princípy fungovania a typy kamier

Ako bolo naznačené v sekcii 2.1, dôležitým prvkom termokamery je infračervený detektor, čo je súčiastka zachytávajúca IR žiarenie. Ten tvorí ale len časť snímacieho systému, ktorý ešte zahŕňa optiku, chladienie, zameriavací a sledovací systém, elektroniku, komunikáciu, spracovanie a zobrazenie, vid' obrázok 2.3. Pomocou typu detektoru vieme určiť, s akým druhom termokamery budeme mať dočinenia. Najbežnejšie delenie je na fotónové a termálne detektory. Medzi termálne patria napr. termočlánok, PIR senzor alebo bolometer. Ďalšie delenie môže byť podľa toho, aký typ IR žiarenia sú schopné zachytiť. Jednotlivé typy sú

opísané na začiatku kapitoly. Samotné termokamery sa ešte dajú rozdeliť do 2 hlavných kategórií, a to podľa toho, či obsahujú chladený alebo nechladený IR detektor.

Chladené IR detektory poskytujú kvôli chladiacemu systému kvalitnejší obraz, v ktorom vedú redukovať šum spôsobený vnútornými komponentmi a samotným sensorom. Jedná sa väčšinou o chladené fotónové detektory, zložené napr. z antimonidu india (InSb). Výsledný obraz vedú zachytiť s vysokou snímkovaciu frekvenciou a s vysokou citlivosťou. Rozdiely v citlivosti oproti nechladenému senzoru je možné vidieť na obrázku 2.4. Medzi jednu z ich najväčších výhod patrí možnosť spektrálnej filtrácie. Umožňuje nám odfiltrovať si nežiadúce vlnové dĺžky z výsledného obrázku [21].

Nechladené IR detektory sú typickým predstaviteľom termálnych detektorov. Tie môžu byť zložené z oxidu vanadičitého alebo z amorfného silikónu. Ich výhodou je nízka spotreba energie a nízka cena. Na druhej strane majú ale nízku snímkovaciu frekvenciu. V dnešných dostupných termokamerách sa často používa technológia FPA (focal plane array). Jedná sa o zariadenie zložené z 2D poľa svetlocitlivých pixelov, ktoré sú používané aj u sensorov typu CCD a CMOS citlivých na viditeľné svetlo. Toto pole je skenované elektronicke za využitia čítacích integrovaných obvodov (ROIC), ktoré pre každý snímok vpúšťajú do každého z detektorov konštantné napätie a merojú zmenu v ich elektrickom odpore, ktorá je prevedená na digitálne hodnoty [22]. ROIC môže zabezpečovať funkciu odznačovania pixelov, antiblooming (ošetrenie pretečenia kapacity pixelov), výstupné predzosilovače a ďalšie iné. Bežne používaným v FPA je v dnešnej dobe špeciálny typ bolometra s názvom mikrobolometer [33].



Obr. 2.4: V ľavej časti chladený, v pravej časti nechladený senzor. Hore sú otlaky ruky na stene bezprostredne po ich vzniku, dole po 2 minútach [21].

Prehľad aktuálnych kamier

K roku 2018 prevláda na trhu termokamier spoločnosť FLIR Systems a preto bude väčšina uvedených kamier práve tejto značky. Vzhľadom na ich použitie by sme ich vedeli rozdeliť do viacerých kategórií. Jedným z nich sú ručné kamery so vstavaným LCD displejom, na ktorom sa dá v reálnom čase sledovať vizualizovaný termogram. Tie sú vhodné pre priemyselné aplikácie, napr. diagnostiku elektrických rozvádzačov, výrobných strojov, motorov a pre oblasť stavebníctva. Z tých jednoduchších je to napríklad FLIR TG165 s rozlíšením 80×60 px, ktorá vie ukladať dáta na SD kartu. Tie lepšie z rady FLIR Ex už obsahujú aj vnútornú pamäť na snímky, digitálny fotoaparát a rozlíšenie do 320×240 px. Najvyššia rada FLIR Exx obsahuje vyššiu teplotnú citlivosť a špeciálne meracie funkcie, ktoré zlahčujú analýzu snímkov.



Obr. 2.5: Ručná termokamera FLIR E40¹.

Ďalšou kategóriou sú kamery pre vedu a výskum. Predstaviteľom je napr. FLIR A655SC, ktorá obsahuje LWIR nechladený mikrobolometer s rozlíšením 640×480 px. Tie lepšie s chladeným detektorom, FLIR SC6000 a SC8300, snímajú MWIR frekvencie až do rozlíšenia 1344×784 px. Je pri nich kladený dôraz na teplotnú citlivosť i rýchlosť záznamu. Nachádzajú využitie v aplikáciách materiálového, biologického, lekárskeho i technického výskumu. Vo svete sú používané pri vývoji nových jadrových reaktorov aj na výskum a vývoj nových liekov a liečebných procesov.



Obr. 2.6: Vedecká termokamera FLIR SC8300².

¹<https://www.termokamery-flir.cz/termokamera-flir-e40-e50-e60/>

²<http://www.flir.eu/science/display/?id=45674>

Tie, ktoré obsahujú rozhranie Ethernet, sa používajú na streaming videa pri výrobe, predovšetkým na kontrolu kvality výrobkov alebo pri protipožiarnej bezpečnosti. Jedná sa o typy FLIR A315 a FLIR A615. Kvôli ich dobrej presnosti sú vhodné aj na meranie z väčšej vzdialenosti.



Obr. 2.7: IP termokamera FLIR A615³.

Stacionárne kamery sú vhodné pre bezpečnostné aplikácie. Obsahujú nepretržitú kontrolu sledovaného objektu a rýchlu detekciu útočníkov i za zlého počasia. Jedná sa o kamery tried FLIR TCX, SR, FC, F, a D. Najdrahšia PT-602CZ obsahuje senzor pre IR (optický zoom až 14x) aj viditeľné spektrum (optický zoom až 36x). Ľudskú postavu je schopná detekovať na vzdialenosť 4–5 km. Jej rozlíšenie činí 640 × 512 px.



Obr. 2.8: Stacionárna termokamera FLIR PT-602CZ⁴.

Ďalšia skupina kamier vie detekovať úniky plynu. Sú schopné sledovať dôležité rozvody plynu a používajú sa všade tam, kde je potreba únik plynu zaznamenať bezprostredne v okamihu, kedy k nemu dôjde. Ich predstaviteľmi sú napríklad FLIR G300, G300pt a A6604.



Obr. 2.9: Termokamera FLIR A6604 na detekciu plynu⁵

³<http://www.flir.eu/automation/display/?id=41330>

⁴<https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/flir-pt-602cz-datasheet.pdf>

⁵<https://www.termokamery-flir.sk/termokamera-flir-a6604-sk/>

Svoje použitie nájdú aj kamery vhodné na lov a pozorovanie prírody. Použiť sa dajú aj na miestach s hustým porastom (les, vysoká tráva, polia apod.). K dispozícii sú od najmensej a najľahšej FLIR Scout TK až po najväčšiu BHM-6X+.



Obr. 2.10: Vrecková termokamera FLIR Scout TK pre pozorovanie prírody a lov⁶.

Stacionárne kamery sa používajú aj pri lodnej doprave, kde pomáhajú pri navigácii, vyvarovaní sa kolíziám a pri záchranných akciách. Kvôli tomuto účelu majú vodeodolnú konštrukciu. Jedná sa o série FLIR MD, M, MU a MV.



Obr. 2.11: Námorná termokamera FLIR série MV-/MU-⁷.

Technológie termokamier zašli až tak ďaleko, že je ich možné jednoducho pripojiť aj k mobilnému telefónu. Jedná sa ale o jednoduché modely, ktoré vystačia len na osobné účely v domácnosti, na orientáciu, objavenie ľudí a zvierat za tmy apod. Zaujímavými sú nielen FLIR ONE 2, ale aj produkty od Seek Thermal s označením Compact, CompactXR a CompactPro, ktoré sú vodeodolné a najlepší z nich má rozlíšenie 320 × 240 px.



Obr. 2.12: Termokamera Seek Thermal CompactPRO pre smartfón⁸.

⁶<https://www.termokamery-flir.cz/termokamera-flir-scout-tk/>

⁷<https://www.termokamery-flir.sk/termokamera-flir-mu-mv/>

⁸<https://www.thermal.com/compact-series.html>

Toto všetko sú kompletne riešenia pripravené na okamžité použitie. Ak by sme ale chceli použiť termokameru ako súčasť nami zostaveného embedded systému, museli by sme siahnuť po inej variante. Použili by sme jadro termokamery, ktoré je navrhnuté na integrovanie do takejto zostavy. K dispozícii sú rôzne druhy podľa toho, aké frekvencie budeme chcieť snímať. Najbežnejšie používané sú práve nechladené jadrá zachytávajúce LWIR žiarenie. Jedná sa konkrétne napríklad o FLIR Boson, Muon, Lepton, Quark 2, Tau 2 a PathFindIR II. Všetky obsahujú práve senzory typu FPA mikrobolometer zložené zo zlúčeniny oxidu vanadičného. Líšia sa hlavne v rozsahu zachytávajúcej teploty, v spektrálnom rozsahu, rozlíšení, a v teplotnej citlivosti (viz tabuľky 2.1 a 2.2). Na zachytenie MWIR žiarenia sa používajú chladené jadrá FLIR Neutrino, μ Core-275Z a Mini-Core HRC, na krátkovlnné žiarenie je určený Tau SWIR. Tie ale bežný človek tak často nevyužije, väčšinou si postačí s bežnými LWIR jadrami, ktoré poskytujú komfort termálneho zobrazovania za prijateľnú cenu.

Kamera	Boson	Muon 640	Lepton 25°
Dynamický rozsah	140 – 500 °C	–	0 - 120 °C
Spektrálny rozsah	7.5 – 13.5 μm	7.5 – 15 μm	8 – 14 μm
Rozlíšenie	640 x 512	640 x 512	80 x 60
Veľkosť pixelu	12 μm	17 μm	17 μm
Snímkovacia frekvencia	9 Hz	50 – 59.94 Hz	8.6 Hz
Tepelná citlivosť	0.06 °C	0.06 °C	0.05 °C
FOV - horizontálny	4 – 95°	–	25°
FOV - vertikálny	4 – 95°	–	31.3°
Digitálny zoom	8x	–	–
Prevádzkový výkon	500 mW	450 mW	150 mW
Prevádzková teplota	-0 – 105 °C	-40 – 80 °C	-10 – 65 °C
Hmotnosť	15 – 396 g	5 g	0.55 g

Tabuľka 2.1: Porovnanie jadier termokamier, 1. časť⁹.

Kamera	Quark 2	Tau 2 640	PathFindIR II
Dynamický rozsah	-40 – 160 °C	-40 – 550 °C	-
Spektrálny rozsah	7.5 – 13.5 μm	7.5 – 13.5 μm	8 – 14 μm
Rozlíšenie	640 x 512	640 x 512	320 x 240
Veľkosť pixelu	17 μm	17 μm	–
Snímkovacia frekvencia	7.5 – 8.3 Hz	7.5 – 8.3 Hz	–
Tepelná citlivosť	0.05 °C	0.03 – 0.06 °C	–
FOV - horizontálny	18 – 69°	–	24
FOV - vertikálny	14 – 56°	–	18°
Digitálny zoom	2x, 4x, 8x	2x, 8x	-
Prevádzkový výkon	1W	1.2W	2W
Prevádzková teplota	-40 – 80 °C	-20 – 65 °C	-40 – 80 °
Hmotnosť	18.3 – 28 g	70 – 479 g	300 g

Tabuľka 2.2: Porovnanie jadier termokamier, 2. časť⁹.

⁹<http://www.flir.eu/cores/display/?id=51981>

Kapitola 3

Detekcia objektu v termograme

Technológia termovízie je použiteľná na širokú škálu úloh, pri ktorých nachádza svoje uplatnenie. Jedným z nich sú aj detekcia a sledovanie objektov v obraze. Predpokladom na to je, že daný objekt musí vyžarovať rozdielne množstvo tepelnej energie ako obsahuje jeho okolie, teda nesmie byť v stave tepelnej rovnováhy. Veľmi dobrým príkladom z reálnych podmienok je detekcia vozidiel a hlavne živých objektov (osoby, zvieratá). V tejto kapitole sú rozobrané faktory, ktoré majú vplyv na detekciu a taktiež vplyvy na zmenu teploty povrchu tela. Následne sa pozriem na použiteľné detekčné algoritmy a metódy.

3.1 Faktory ovplyvňujúce detekciu

Ak sa rozhodneme na realizáciu detekcie použiť niektorý z algoritmov, mali by sme zväžiť v úvahu niektoré vlastnosti, s ktorými sa pri tom môžeme stretnúť. Jednou z nich je správanie infračerveného svetla voči povrchu, na ktorý dopadá. Všeobecne pre všetky vlnové dĺžky vieme toto správanie rozdeliť na 2 formy, ktoré môžu byť v rôznom pomere v žiarení prítomné:

- odraz svetla,
- rozptyl svetla.

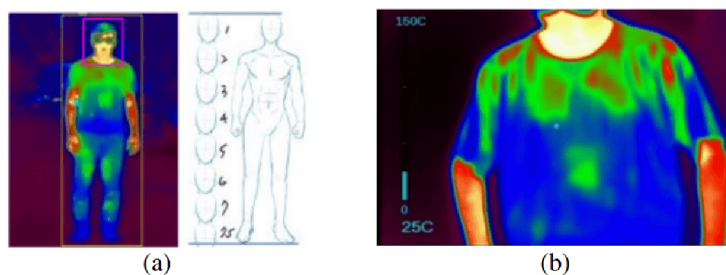


Obr. 3.1: Infračervené žiarenie ruky. V dolnej časti jeho odraz od dreveného stola.

Odrazová zložka je charakteristická tým, že svetlo je od povrchu odrazené pod tým istým uhlom, pod akým naňho dopadá zdrojové (incidentné) svetlo. Tento jav sa dá pozorovať na rovnom vyleštenom povrchu, najlepším príkladom je odraz od zrkadla. Pri rozptyle naopak dochádza kvôli nerovnostiam povrchu k odklonu svetla do viacerých uhlov. Práve tento rozptyl zapríčiňuje, že sme schopný pomocou zraku rozoznávať tvary a zakrivenia objektov, keďže viditeľné svetlo je naňho náchylnejšie. Infračervenému žiareniu ale kvôli jeho väčším vlnovým dĺžkam nevadia menšie nerovnosti povrchov a preto pri ňom dochádza viac k odrazu ako k rozptylu. Tento fakt musíme brať v úvahu, pretože môžu kvôli nemu vzniknúť chyby pri detekcii. Jedná sa o prípad, kedy odraz objektu bude dostatočne silný na to, aby sa na snímke javil ako druhý objekt (obrázok 3.1). Riešenie tohoto problému je využiť čiastočnú polarizáciu odrazeného svetla využitím polarizátoru [26].

Ďalšou vecou, ktorá sa dá pozorovať na termografických snímkoch, je tepelná oblasť, ktorá sa tvorí v okolí teplých objektov. Tá je zapríčinená prirodzeným tepelným vyžarovaním objektov.

V reálnych podmienkach býva na termograme zreteľne viditeľnými hlava a končatiny, ak berieme v úvahu človeka oblečeného do typického teplejšieho počasia (obrázok 3.2). Oblasť s oblečením vyžaruje spravidla menej tepla ako holá koža pod ním. Čím viac vrstiev alebo hrubšieho oblečenia subjekt obsahuje, tým menšiu teplotu zvonku nameriame.



Obr. 3.2: Príklad človeka na termograme: (a) celé telo, (b) horná časť tela [15].

3.2 Teplota povrchu tela a vplyvy na jej zmenu

Známym faktom je, že teplota človeka sa pohybuje typicky okolo $37\text{ }^{\circ}\text{C}$. Povrch kože má ale teplotu nižšiu, v rozmedzí približne $33,5$ až $36,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplejšie miesta sú v oblastiach svalov, kdežto šlahy a kosti sú chladnejšie. Znamená to, že kvôli hrubšej tukovej vrstve majú tučnejší ľudia nižšiu teplotu povrchu kože [11].

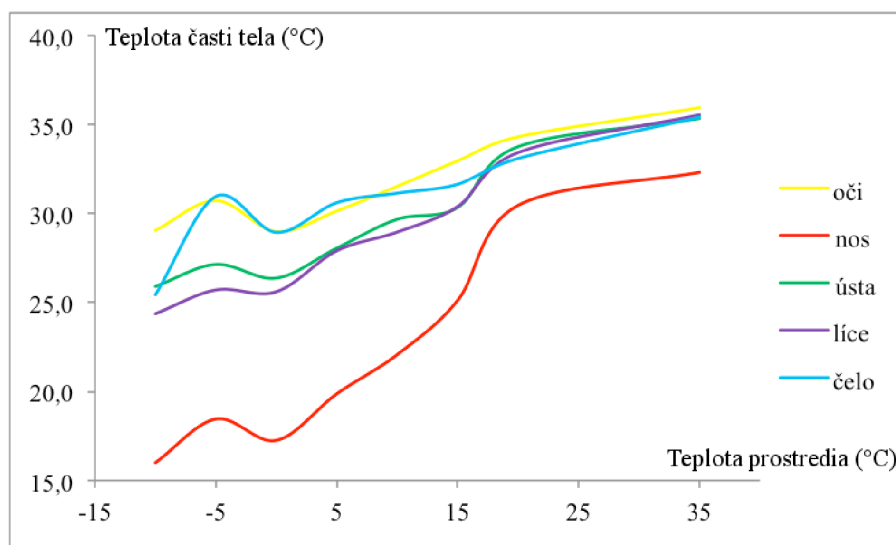
Teplota okolia

Väčšinou je teplota kože vyššia v porovnaní s okolitým prostredím v našich zemepisných šírkach. Vplyv teploty prostredia môže byť dosť výrazný, napríklad pri dlhšom pobyte v chladnejšom počasi bude mať aj sledovaný subjekt zníženú teplotu. To nás môže priviesť k skúmaniu oblastí tela, na ktorých teplotnú zmenu badať čo najmenej a ktoré teda bude jednoduchšie detekovať. To znamená, že majú tzv. nízku tepelnú variabilitu. Detailný rozbor teplôt tela je obsiahnutý v tabuľke 3.1. Z nej vyplýva, že pri nižšej teplote je značný rozostup v teplotách jednotlivých častí tela, kdežto zvyšujúcou sa teplotou okolia sa tento rozdiel pomaly vytráca. Najväčší skok zaznamenávajú ukončenia končatín (chodidlo, ruka),

Teplota okolia (°C)	15	20	25	30	35
Chodidlo	17,4 ± 2,4	21,7 ± 0,9	27,1 ± 0,8	31,6 ± 1,0	35,5 ± 0,3
Holeň	22,3 ± 1,8	25,8 ± 1,0	28,9 ± 1,0	32,7 ± 0,7	35,3 ± 0,2
Stehno	23,2 ± 2,2	27,9 ± 1,5	30,5 ± 1,1	33,4 ± 0,6	35,0 ± 0,4
Brucho	29,1 ± 2,3	30,7 ± 1,7	33,5 ± 0,4	34,7 ± 0,8	35,1 ± 0,6
Chrbát	30,1 ± 2,4	31,3 ± 1,1	32,7 ± 1,5	34,4 ± 0,8	35,4 ± 0,4
Hruď	29,9 ± 2,2	31,9 ± 1,1	32,8 ± 0,9	34,5 ± 0,8	35,9 ± 0,3
Rameno	26,2 ± 1,3	28,0 ± 0,8	30,8 ± 2,0	33,4 ± 0,8	36,0 ± 0,2
Predlaktie	27,0 ± 2,0	27,7 ± 0,7	30,3 ± 1,3	33,6 ± 0,6	35,7 ± 0,3
Ruka	19,7 ± 2,7	24,0 ± 1,3	25,4 ± 2,1	32,9 ± 0,9	35,8 ± 0,2
Čelo	29,7 ± 2,1	32,9 ± 0,9	33,9 ± 0,4	34,8 ± 0,7	35,8 ± 0,6
Stredná hodnota	25,7 ± 1,2	28,2 ± 0,8	30,6 ± 0,9	33,4 ± 0,5	35,7 ± 0,2

Tabuľka 3.1: Priemerné teploty častí ľudského tela [34].

ktoré mali pri teplote 15 °C najnižšiu teplotu a pri ktorých sa menila ich teplota približne rovnakým prírastkom ako okolná. Naopak, najmenej na zmenu reagovali väčšie súvislé plochy na tele, ako je brucho, hruď, chrbát a čelo, ktoré si pomerne dobre držali svoju teplotu. Pri zmene prostredia o 20 °C sa ich teplota zmenila približne len o 6 °C. Až na čelo sú všetky tieto časti väčšinou zakryté oblečením, čo by mohlo indikovať, že spoľahlivá detekcia môže byť ukrytá práve v tvárovej časti. Ak sa na ňu pozrieme bližšie, zistíme, že najlepšiu tepelnú variabilitu má okolie očí (obrázok 3.3).



Obr. 3.3: Priemerné teploty tvárových častí vzhľadom na zmenu teploty prostredia [38].

Fyzická záťaž

Ďalším faktorom, ktorý môže meniť teplotu tela, je fyzická záťaž organizmu. V nasledujúcej štúdií boli sledovanými časťami horné končatiny a hrud. Pri ľahkej až stredne ľahkej záťaži klesla ich teplota o 1 až 3 °C a po pár minútach sa priblížila k počiatkovej. Tento pád je spôsobený termoregulačným mechanizmom, pri ktorom telo vylučuje na pokožku pot počas aktivity. Stredné ťažké až ťažké cvičenie spôsobilo väčší pád kvôli vylučovaniu potu na viacerých miestach, no po skončení cvičenia teplota znova rapídne vystúpala [31].

Ďalšie vplyvy

Teplota človeka kolíše v priebehu dňa, typicky niekde medzi 35,5 ráno až 37,7 °C večer. Teplota je vytváraná metabolizmom a kontrakciou svalov a následne je šírená telom pomocou cirkulácie krvi [28]. O podobný prípad môže ísť aj pri chorobách, napríklad pri horúčke a rôznych ďalších, pri ktorých telo zareaguje zvýšením teploty. Pri zimnici sa jedná o opak.

3.3 Zvierací narušiteľ

Pri detekcii narušiteľa sa naskytá otázka, čo sa vlastne dá za narušiteľa považovať. Určite sa jedná o človeka, no pokojne to môže byť aj nejaké zviera, ktoré nechceme, aby sa nám dostalo do zabezpečenej oblasti. Podľa tabuľky teplôt najbežnejších zvierat v našich končinách (tabuľka 3.2) je badateľné, že ich priemerná teplota je o niečo vyššia ako teplota ľudského tela. Z dostupných dát sa dá usúdiť, že čím väčšie dané zviera je, tým nižšiu teplotu môže mať. Najteplejším zvieratom zo skúmaných je sliepka s teplotou 43 °C. Vyplýva to aj zo štúdie, podľa ktorej majú vtáky jasne vyššiu teplotu ako cicavce. U cicavcov narastá teplota od kategórie vtákozobcov, vačkovcov až po najteplejšie placentovce. Jej záverom je zhodnotenie, že nedokázali ani u cicavcov ani vtákov nájsť jednoznačný faktor, podľa ktorého by sa dala charakterizovať ich teplota [16].

Sliepka	40.6 – 43.0 °C
Zajac	38.6 – 40.1 °C
Ovca	38.3 – 39.9 °C
Prasa	38.7 – 39.8 °C
Koza	38.5 – 39.7 °C
Pes	37.9 – 39.9 °C
Dojná krava	38.0 – 39.3 °C
Mačka	38.1 – 39.2 °C
Krava na mäso	36.7 – 39.1 °C
Kôň	37.3 – 38.2 °C

Tabuľka 3.2: Teploty najbežnejších zvierat zoradené od najvyššej v rozsahu [35].

3.4 Algoritmy použiteľné na detekciu

Pri detekcii existuje niekoľko spôsobov, ktorými sa dá realizovať. Používajú sa pritom najmä techniky počítačového videnia a spracovania obrazu. Postup pred a pri ich aplikovaní je nasledovný [25]:

1. Získanie obrazových dát,
2. Predspracovanie – vyfiltrovanie šumu, upravenie kontrastu, prípravenie obrazu na jednoduchšie spracovanie,
3. Detekcia/segmentácia objektov – rozčlenenie obrazu na dáta reprezentujúce jednotlivé objekty,
4. Extrakcia charakteristických rysov – získanie štruktúry dát popisujúcich objekt (deskriptor); jedná sa o hrany, rohy a oblasti objektu,
5. Spracovanie na vyššej úrovni – porovnanie deskriptoru s našim modelom (verifikácia), najčastejšie pomocou klasifikátoru natrénovaným na množine dát,
6. Vykonalenie rozhodnutia – či objekt odpovedá/neodpovedá vyhľadávanému objektu.

Nás bude konkrétne zaujímať všetko od 3. fázy, teda na vstupe už máme obrazové dáta, ktoré sú vhodným spôsobom upravené, aby bola následná detekcia o niečo jednoduchšia. V mojej práci bude implementovaná len samotná časť detekcie/segmentácie.

Segmentácia termosnímků

Cieľom segmentácie obrazu je vymedzenie tzv. oblasti záujmu (Region of interest - ROI), v ktorých sa nachádza nami sledovaný objekt. K tomu môže používať vlastnosti objektov, ako sú jeho hrany, textúra, rôzna intenzita pixelov vo vnútri objektu, tvar, veľkosť a orientácia [24]. Jej výsledkom je nová reprezentácia obrázku vhodná na rýchlejšiu analýzu.

Prahovanie

Segmentácia pomocou prahu (thresholding) je vhodná na objekty, ktoré vytvárajú dostatočný kontrast teplôt s pozadím. Jedná sa o jednoduchú metódu, ktorá aplikuje na všetky pixely fixné kritérium [20]. Pozostáva z výberu adekvátneho prahu T , ktorého aplikovaním dostaneme binárny obrázok, v ktorom hodnota „1” zodpovedá objektu a hodnota „0” pozadiu. Termálny obrázok môže byť definovaný ako funkcia $f(x,y)$ bodov so súradnicami x a y , pričom výsledný obrázok po prahovaní $g(x,y)$ môže byť definovaný ako:

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{pre } f(x,y) > T \\ 0 & \text{pre } f(x,y) \leq T \end{cases} \quad (3.1)$$

Detekcia hrán

Tento typ segmentácie sa snaží o zachytenie objektu vzhľadom na jeho obrysy. Okrem nich detekuje aj hranice medzi objektmi a pozadie obrázka. Výsledkom transformácie je obrázok zvýrazňujúci hrany [2], ktoré v našom prípade tvoria prechody medzi teplotnými oblasťami. Používajú sa k tomu rôzne obrazové filtre, napr. Sobelov, Robertsov, Prewittovej, Laplaceov alebo Cannyho.

$$h_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$h_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Sobelov filter, h_1 je vertikálna, h_2 horizontálna maska

Segmentácia na základe regiónov

Hojne využívanou metódou je segmentácia rozvodím (watershed). Jej myšlienka pochádza z geografie. Povrch obrazu začne byť postupne zaplavovaný od najnižších hodnôt pixelov. Deliace hranice medzi segmentmi tvoria akési hrádze s vyššou hodnotou, ktoré oddelujú homogénne regióny [5], v našom prípade teplotné.

Prehľad metód na detekciu človeka

Pri termosnímkoch môže detekcia prebiehať obdobne ako pri snímkoch z digitálnej kamery, ale pretože pracujeme s rozdielnymi dátami, ktoré v našom prípade reprezentujú teplotu, môžeme použiť aj iné spôsoby.

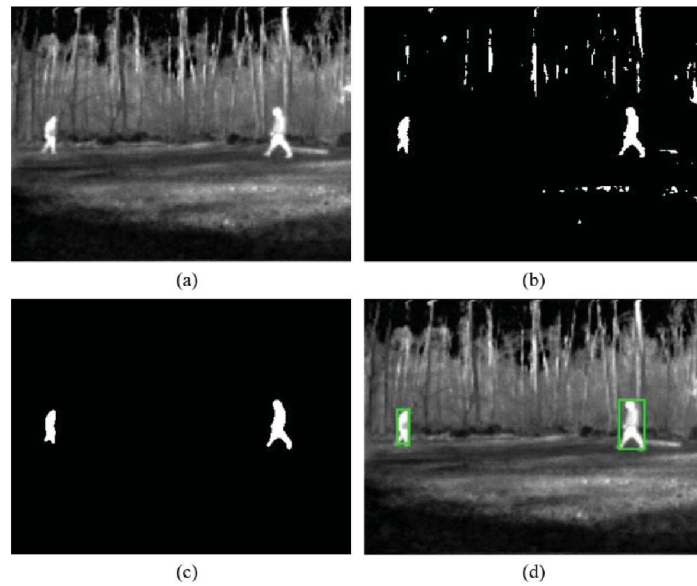
Jedným z algoritmov, ktorý sa používa, je *histogram orientovaných gradientov* (HOG). Je založený na vektorom popise objektu. Pán Zhu spolu s ďalšími spolupýskumníkmi ho použili pri rýchlej detekcii človeka [41]. Dá sa použiť aj v kombinácii s prvotným prahovaním na základe teploty, pomocou ktorého odstránime pozadie a dostaneme presnú pozíciu a tvar objektov [30].

Metóda, ktorú predstavil pán Bertozzi a jeho spolupracovníci, je súčasťou asistenčných systémov vo vozidlách [10]. Jej nevýhoda je, že človek musí byť teplejší ako prostredie. Algoritmus je rozdelený do 3 častí:

- Generovanie kandidátov – vo vstupnom termograme sú pomocou tepla lokalizované symetrické objekty so špecifickou veľkosťou a pomerom strán,
- Filtrovanie kandidátov – odstránenie falošne pozitívnych objektov (značky, budovy) analyzovaním tvaru vertikálneho histogramu každého vyhľadávacieho okna (oblasť ohraničujúca výšku a šírku objektu),
- Validácia kandidátov – morfologické charakteristiky človeka sú extrahované do modelu. Ten je následne porovnávaný s validačným modelom.

Páni Davis a Sharma predstavili metódu založenú na obrysoch [18]. Ako prvý je pri nej použitý *algoritmus odčítania prostredia* na segmentáciu. Ten jednoducho od zachyteného pozadia odčíta aktuálny snímok. V ďalšej fázy sú získané ľudské obrysy vytvorením *obrysovej mapy charakteristických rysov* (Contour Saliency Map, CSM). Tá reprezentuje pixely patriace obrysovým hranám človeka. Ako posledné je vyplnením obrysov vytvorená silueta.

S vylepšením vyššie spomenutej metódy prišiel jej tvorca Davis spolu s pánom Keckom [17]. CSM je doplnená o rozpoznávací algoritmus *AdaBoost* (Adaptive Boosting), ktorý overuje, či boli oblasti s výskytom človeka určené správne. Ten pri rozpoznávaní používa metódu strojové učenia. Pred jeho použitím je potrebné natrénovať jeho klasifikátory na množine dát.



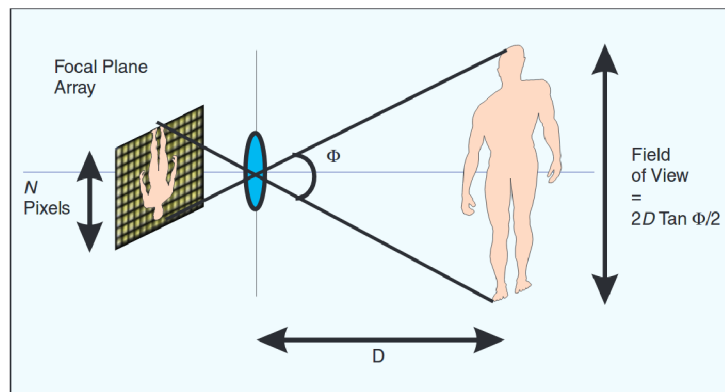
Obr. 3.5: Príklad metódy na detekciu, vstupný snímok (a), binárny snímok po prahovaní (b), vyfiltrovaný snímok (c) a výsledok detekcie (d) [30].

Ďalšia metóda navrhnutá pánmi Arensom a Jünglingom je založená na detektore človeka na základe lokálnych kľúčových bodov [29]. Na tento účel je použitý algoritmus extrakcie charakteristických rysov *SURF* (Speeded Up Robust Features).

Wang a jeho spolupracovníci predstavili metódu na detekciu osôb, ktorá je založená na Shape context deskriptore (SCD) spolu s AdaBoost klasifikátorom [39].

Abuarafah spolu so svojim tímom zašli ešte ďalej a techniku termografie použili na monitorovanie a odhad veľkosti davu v reálnom čase. Cieľom výskumníkov bolo monitorovanie davu počas moslimskej púte do Mekky (Hadždž), na ktorú každoročne prichádza približne 3 milióny moslimov. Počas presúvania obrovského počtu ľudí je potrebné robiť okamžité rozhodnutia a zabrániť davovým nešťastiam. Na tento účel bol vytvorený softvér na analýzu termálneho videa v reálnom čase [1].

Príklad, ako môže vyzeráť detekcia človeka, je na obrázku 3.6. Dôležitú rolu hraje jeho vzdialenosť od kamery. Ak sa nachádza dostatočne blízko, aby sa nezmestil celý do záberu, detekčné algoritmy postavené na tvare a obrysoch človeka môžu v tomto prípade zlyhať.



Obr. 3.6: Príklad detekcie človeka [28].

Kapitola 4

Návrh zariadenia

Táto kapitola obsahuje popis postupu, ktorým si je potrebné prejsť pri vytvorení elektronického zariadenia. Pozostáva z výberu správnych komponentov, ktoré sú vhodné na daný typ využitia. Do značnej miery sa venujem termokamere FLIR Lepton, ktorú som použil a ktorej fungovanie som potreboval pochopiť na to, aby som ju mohol používať. Konkrétne sa jedná o moduly v kamere, režimy, ktoré obsahuje a ktoré majú vplyv na výsledný termogram, komunikačné rozhranie CCI, cez ktoré sa dá konfigurovať, ale hlavne komunikačný protokol VoSPI postavený na paketoch, pomocou ktorého prenáša obraz. Pri návrhu plošného spoja som riešil sériové protokoly, pomocou ktorých komunikujem s kamerami a cez aké piny sú pripojené spolu s LED diódami a tlačítkom ku mikrokontroléru. Všetky tieto údaje sú brané v ohľad pri návrhu schémy plošného spoja. Na konci je detailne popísané, ako som postupoval pri výrobe dosky plošného spoja, aké technické postupy bolo potrebné vykonať a ako to celé prebiehalo.

4.1 Výber komponentov

Základnou jednotkou, ktorá bude celé zariadenie ovládať, je mikrokontrolér (MCU). Jedná sa o najdôležitejšiu časť zariadenia, keďže sa stará o celkový chod. Je v ňom nahratý kompletný kód. Jeho úlohou je v mojom prípade starať sa o obsluhu oboch kamier, čo znamená komunikáciou s nimi pomocou sériového rozhrania, vyčítanie snímok, analýzu termálneho snímku, obsluhu prerušovacieho systému a zabezpečenie a obsluhu Wifi spojenia. Vzhľadom na jeho dôležitú rolu je potrebné byť o to pozornejší pri jeho výbere.

Mikrokontrolér

Na trhu sa vyskytuje viacero výrobcov, ktorý sa zaoberajú práve výrobou mikrokontrolérov a ponúkajú ich pre širokú verejnosť. Najbežnejšie vyskytujúcimi sa sú tie postavené na architektúre RISC (procesory s jednoduchou sadou inštrukcií). Je to kvôli ich jednoduchosti a priaznivej cene, pretože vedia efektívnejšie využiť plochu na danom čipe. Na ich fungovanie teda stačí menej tranzistorov, čo sa prejavuje na ich zložitejšom ovládacom softvéri.

Jedná sa napríklad o produkty firmy Atmel (v roku 2016 skúpená spoločnosťou Microchip), od ktorej pochádza veľmi známa rodina mikrokontrolérov AVR. Najbežnejší z nich je napríklad model ATmega328P¹, ktorý je hojne používaný v platforme Arduino. Jedná

¹<http://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328p>

sa o jednoduchý 8-bitový mikroprocesor, ktorý je vhodný na použitie do jednoduchých IoT zariadení.

Ako ďalšiu môžem spomenúť francúzsko-talianskú spoločnosť STMicroelectronics a ich 32-bitové mikrokontroléry STM32, rozdelené do kategórii podľa typu použitia na obyčajné (mainstream), vysokovýkonné (high performance), úsporné (ultra-low power) a bezdrôtové (wireless – obsahujúce Wi-Fi). Obsahujú preverené a mnoho knižnicami podporované procesory založené na architektúre ARM².

Na procesoroch ARM je postavená aj platforma Raspberry Pi. Jedná sa v podstate už o vreckový počítač, ktorý je kvôli obrovskej užívateľskej komunite ľahko použiteľný na veľkú škálu činností, no je pri ňom potrebné zvážiť, či sa nejedná o zbytočne drahé a mohutné riešenie na jednoduchú úlohu.

Zlatý stredom, ktorý kombinuje výhodnú cenu a skvelý výkon, sú mikrokontroléry od spoločnosti Espressif. Najznámejším je ESP8266, na ktorý existuje na internete veľké množstvo knižníc. Jeho veľkou výhodou je integrovaný Wi-Fi modul a jednoduchosť, ktorou sa dá programovať aj cez prostredie Arduino IDE. Ja osobne som si ale pre účel mojej práce vybral jeho nástupcu, výkonnejší model **ESP32**. Jedná sa o pomerne nový model (uvedený v roku 2016), ktorý okrem Wi-Fi obsahuje navyše aj Bluetooth a vylepšený dvojjadrový procesor. Má celkom prešperkované periférie, toto je časť z jeho špecifikácií [19]:

- Dvojjadrový 32-bitový procesor Xtensa®, 240 MHz,
- 448 kB ROM,
- 520 kB RAM,
- Wi-Fi (802.11 b/g/n) – do 150 Mbps,
- Bluetooth v4.2, BLE (low energy),
- 34 × programovateľných GPIO,
- 4 × SPI, 2 × I²S, 2 × I²C, 3 × UART,
- 10 × kapacitné dotykové vstupy.

Jedná sa o veľmi zaujímavý, cenovo dostupný kúsok a očakávam, že sa pre neho začne vyvíjať nespočet aplikácií a v budúcnosti by mohol byť vo veľkej miere rozšírený. Konkrétne som použil jeho variantu **ESP-WROOM-32**, ktorá je umiestnená na vývojovej doske **ESP32-DevKitC** s vyvedenými konektormi. Tá obsahuje navyše tlačítka na zresetovanie systému, na nahrávanie programu a LED diódu indikujúcu napájanie. Obsahuje taktiež USB rozhranie, ktoré zabezpečuje jednak napájanie a aj komunikáciu medzi MCU a počítačom pri nahrávaní programu alebo monitorovaní sériového portu. Schéma dosky je k dispozícii tu³.

VGA kamera

V predaji na internete dominujú tie, ktoré obsahujú snímacie CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) senzory od spoločnosti OmniVision⁴. Z ich širokej ponuky som si

²<http://www.st.com/en/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>

³https://dl.espressif.com/dl/schematics/ESP32-Core-Board-V2_sch.pdf

⁴<http://www.ovt.com/image-sensors>

všimol zopár, ktoré sú často k videniu napríklad na známych čínskych stránkach, napríklad 0.3 megapixelové typy OV7670, OV7725 a 2 megapixelový OV2640. Častokrát sú osadené na doskách s vysokým počtom pinov, čomu som sa chcel vyhnúť. Siahol som preto po variante kamery so senzorom **OV2640 ArduCAM Mini Camera Shield**⁵. S maximálnym rozlíšením 1600 × 1200 px sa jedná o HD kameru s kompaktnými rozmermi. Jej názov môže evokovať použitie len s Arduinom, no môže byť použitá s ľubovoľnou platformou, ktorá podporuje SPI a I²C rozhrania.

Termokamera

Rôzne modely termokamier, ktoré sú použiteľné v spojení s MCU, sú porovnané v tabuľkách 2.1 a 2.2. Dôležité parametre, ktoré by nás mohli zaujímať, sú napríklad rozlíšenie snímača (obvykle dosť nízke, max. do 640 × 480 pixelov), spektrálny rozsah (akú veľkú časť spektra je schopná zachytiť), FOV (zorné pole – veľkosť priestoru, ktorý je schopná zachytiť), ale aj spôsob, akým budeme s kamerou komunikovať (sériová zbernica). Realita je ale taká, že samotné ceny kamier začínajú na hodnote 200€ a so zlepšujúcimi sa parametrami enormne stúpajú. Ak teda máme obmedzené financie, pri výbere budeme zohľadňovať tento fakt najviac. Preto sa potom uskromníme aj s jednoduchším modelom, nebažiac po lepších parametroch. Tým je napríklad **FLIR Lepton** [22], schopný zachytávať frekvencie v LWIR spektre. Je zaujímavý kvôli svojej veľkosti a pokojne ho môžeme pomenovať prívlastkom „micro“. Váži len 0,55 gramov. Jedná sa o jeho prvú verziu bez uzávierky (shutterless), s FOV 25° a rozlíšením 80 × 60 pixelov. Ja konkrétne používam variantu **FLIR Lepton Breakout Board v1.4**⁶ so zasadeným kamerovým čipom v päťici na doske. Samotná doska zabezpečuje kamere napájanie, obsahuje 25MHz oscilátor a konektory na zapojenie. Schéma je k nazretiu sem⁷.

4.2 Popis termokamery FLIR Lepton

Termokamera FLIR Lepton sa skladá z niekoľkých základných častí. Jej komunikačné rozhranie kamery je tvorené 2 typmi sériových zberníc:

1. SPI (Serial Peripheral Interface) – prenos obrazu,
2. I²C (Inter-Integrated Circuit) – konfigurácia, vyčítanie nastavení.

Veľká časť informácií z tejto sekcie je čerpaná z dokumentácie ku kamere [22]. Popis jej základných častí kamery a jednotlivých modulov je v sekcii 4.2, popis rozhrania pomocou ktorého je možné komunikovať s kamerou a konfigurovať ju obsahuje sekcia 4.2, protokol, pomocou ktorého posielajú obrazové snímky, je v sekcii 4.2.

Architektúra kamery

Šošovky sústreďujú IR žiarenie scény do poľa o veľkosti 80 × 60 detektorov. Kamera obsahuje nechladený IR senzor opísaný v kapitole 2.2, kde každý z detektorov je mikrobolometer, ktorého teplota sa mení od veľkosti dopadnutého žiarenia. Zmena teploty mení jeho odpor. Pole mikrobolometrov je vyčítavané pomocou ROIC vpúšťaním časovaného konštantného napätia a odmeriavaním prúdu. To všetko je súčasťou FPA.

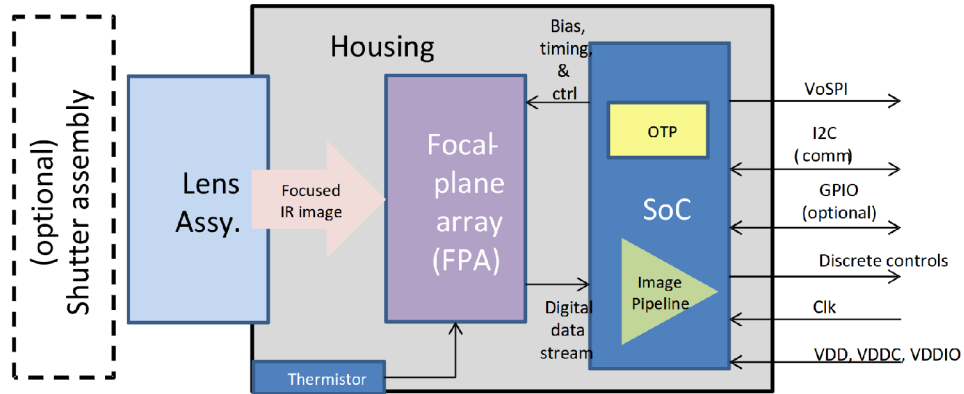
⁵<http://www.arducam.com/arducam-mini-released/>

⁶<https://www.sparkfun.com/products/13233>

⁷<https://files.groupgets.com/lepton/LeptonAdaptorSchematic.PDF>

Prídavná uzávierka by mala možnosť zablokovať priechod žiarenia, čo by umožnilo korekciami vylepšiť kvalitu obrázku. Je to vhodné pri statickom použití kamery, ktoré sa viacmenej týka mojej práce. Moja kamera ale uzávierku neobsahuje.

Dátový tok z FPA prijíma SoC (systém na čípe), ktorý signál spracuje a posieľa ho ako výstup pomocou SPI. Komunikovať zvonka zo SoC sa dá pomocou I²C. Schéma architektúry sa nachádza na obrázku 4.1.

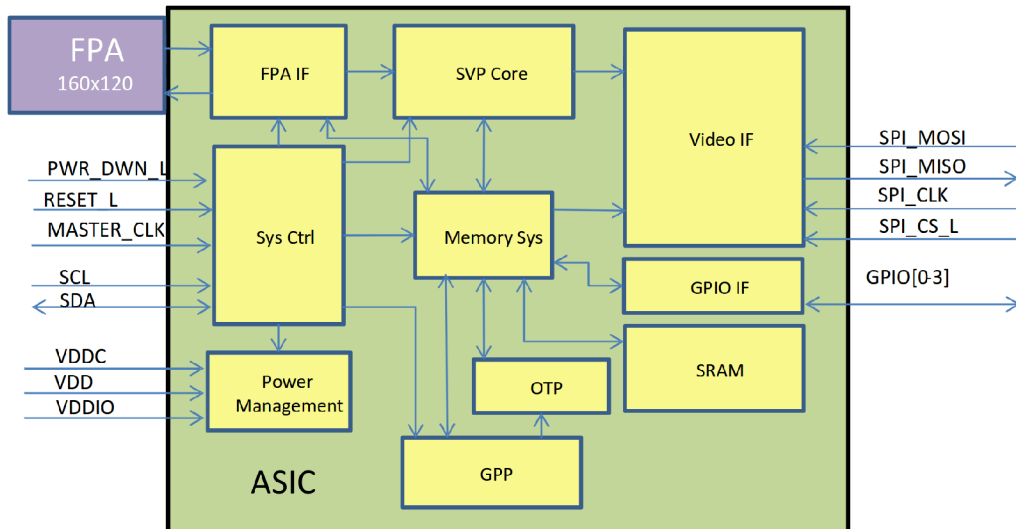


Obr. 4.1: Architektúra kamery Lepton [22].

Popis modulov

Hlavná elektronická časť kamery, ktorú tvorí SoC, obsahuje niekoľko modulov. Ich blokový diagram je na obrázku 4.2. Každý z nich má svoju funkcionálnosť:

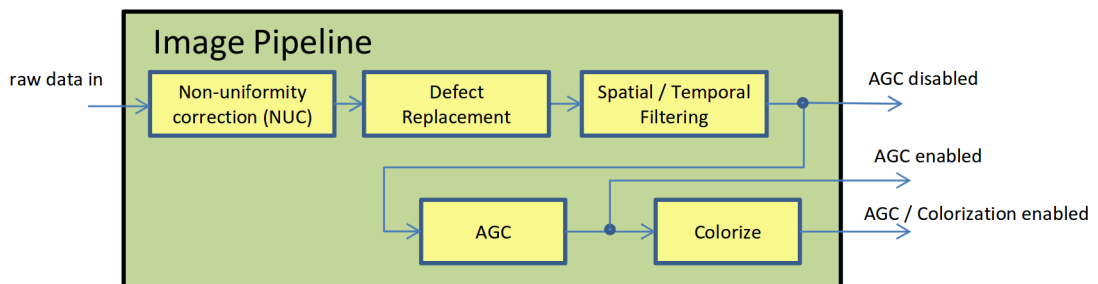
- *FPA Interface Module* – generuje časovacie a riadiace signály, prijíma dátový tok z FPA,
- *System Control (Sys Ctrl) Module* – zabezpečuje synchronizáciu signálov (aby boli v rovnakej fáze), generuje hodinový, resetovací signál, časovač watchdogu a ďalšie,
- *Power Management Module* – kontroluje napájanie
- *Software-based Video Processing (SVP Core) Module* – asymetrický viacjadrový digitálny signálny procesor, zabezpečuje zretazené spracovanie videa,
- *Memory System (Memory Sys) Module* – rozhranie k prístupu k pamätiam SRAM a OTP,
- *General Purpose Processor (GPP)* – procesor, zabezpečuje CCI príkazy, inicializuje a konfiguruje zretazené spracovanie, spravuje napájanie a ďalšie,
- *Video Interface Module (Video IF)* – formátuje dáta pre VoSPI,
- *One-Time Programmable Memory (OTP)* – nevolatilná 384 kB read-only pamäť, obsahuje firmvér a kalibračné dáta,
- *Static Random-Access Memory (SRAM)* – volatilná pamäť, obsahuje registre,
- *GPIO Interface Module (GPIO IF)* – stará sa o konfigurovateľné GPIO piny.



Obr. 4.2: Blokový diagram modulov kamery Lepton [22].

Zreťazené spracovanie videa

Princíp je ten, že surové dáta musia prejsť na svojej ceste cez rôzne bloky, v ktorých sú nejakým spôsobom postupne spracovávané (obrázok 4.3). Ako prvé ich na ceste čaká *NUC* (non-uniformity correction), ktoré zabezpečuje, aby bol výsledný obraz uniformný a zbavený rôznych väd, napríklad, aby nebol zrnitý. Ďalej nasleduje *Defect Replacement*, ktorý počas štartu detekuje chybné pixely, ktoré pomocou algoritmu nahradzuje hodnotou susedných pixelov. *Spatial / Temporal filtering* obsahuje niekoľko obrazových filtrov na odstránenie šumu. Toto sú základné úpravy, ktoré absolvuje každý snímok. Dodatočnou konfiguráciu môžu byť povolené aj ďalšie: *AGC* a *zafarbenie*.



Obr. 4.3: Zreťazené spracovanie obrazu, blokový diagram [22].

Režimy kamery

Kamera obsahuje rôzne režimy (módy), ktorými vieme meniť stávajúci obraz, alebo z nej vychytávať dodatočné informácie. Spôsob, akým sa nastavujú, je popísaný v kapitole 4.2.

AGC

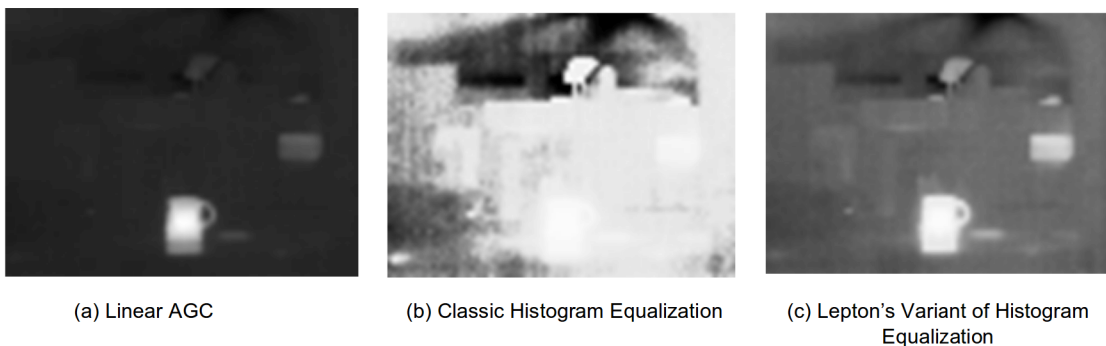
Algoritmus AGC sa stará o to, aby boli snímky s veľkým dynamickým rozsahom prevedené do rozsahu, ktorý sa bude lepšie zobrazovať na zobrazovacom zariadení. Konkrétne pri Leptone sa jedná o konverziu zo 14 na 8 bitov. Pri najjednoduchšom lineárnom AGC sú hodnoty lineárne namapované. Jeho nevýhoda sa prejaví pri obrázkoch, v ktorých scéna obsahuje teplé aj chladné miesta. Tie sa namapujú zväčša na minimálne a maximálne hodnoty, napríklad úplne čierne alebo biele pixely, s malým využitím hodnôt medzi nimi. Vzniknutý obrázok bude mať vysoký kontrast, no nemusia byť na ňom viditeľné detaily.

Vylepšenou verziou je algoritmus AGC založený na histogramoch. Najprv sa spočíta počet pixelov, ktoré obsahujú konkrétne hodnoty. Z toho sa vytvorí histogram podľa počtu výskytov. Skupinám hodnôt s väčším výskytom sa priradí širší rozsah výstupných hodnôt. Je dôležité si uvedomiť, že daný rozsah pre skupinu je pridelovaný pomerovo k celku. Napríklad, obrázok zo 60% tvorený oblohou si zaberie 60% z rozsahu hodnôt, ktoré budú odpovedať odtieňom oblohy. Problém je, že širší rozsah je pridelovaný práve pozadiu, pretože tvorí väčšinou väčšiu plochu. Pri tomto sa stráca kontrast medzi popredím a pozadím, aj v prípade, že majú o dosť rozdielne teploty.

Lepton tieto problémy rieši a vylepšuje klasické histogramové AGC o 2 parametre:

- `clip limit high` – maximálny počet pixelov, ktoré sa môžu nachádzať v jednej skupine,
- `clip limit low` – pridáva konštantnú hodnotu všetkým nenulovým skupinám v histograme.

Vysoká hodnota `clip limit high` bude znamenať výsledky ako pri klasickom histograme, kdežto nízka hodnota sa bude správať ako lineárne mapovanie. Pri `clip limit low` to bude fungovať presne opačne. Rozdiely v algoritmoch AGC sú na obrázku 4.4.



Obr. 4.4: Porovnanie AGC algoritmov, zľava: lineárne mapovanie, klasický histogram, histogramová varianta Leptonu [22].

Pri generovaní histogramu nás nemusí zaujímať celý obrázok, ale len nejaká jeho časť. To sa dá nastaviť pomocou AGC ROI (**r**egion of **i**nterest), kde všetko mimo tejto oblasti bude mapovacou funkciou ignorované.

Výstupný video formát, zafarbenie

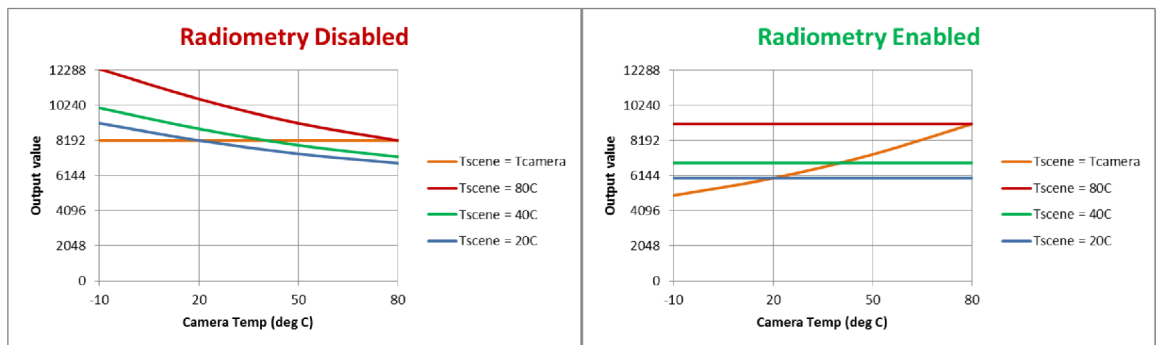
Novšia verzia kamery Lepton podporuje výstupný formát RGB888, ktorý zafarbuje obrázok pomocou jednej z farebných paliet. Moja verzia má ale podporu len pre predvolený formát RAW14. Každý pixel je pomocou neho reprezentovaný jednou 14-bitovou hodnotou.

Telemetria

Jedná sa o mód, pri ktorom kamera zasiela dodatočné informácie, ktoré má k dispozícii. Tie sú posielané ako súčasť prenosu snímok cez protokol VoSPI popísaný v kapitole 4.2. Jedná sa napríklad o čas od spustenia, teplotu senzora, aktuálne nastavenia AGC parametrov alebo výstupného formátu.

Rádiometria

Podstatou rádiometrie je to, aby teplota scény (vstup IR snímača) a digitálny výstup boli v tom istom pomere a ktorý bude nezávislý od iných vplyvov. Znamená to, že pomocou nej vieme presne určiť teploty jednotlivých pixelov. Bez nej toto nie je možné, pretože na meranie má vplyv aj teplota IR snímača. Pri vypnutej rádiometrii sa výstup kamery pohybuje niekde v strede 14-bitového rozsahu (cca hodnota 8192). Závislosť výstupu je taká, že pri zvyšovaní teploty prostredia sa zvýši jeho hodnota, no pri zvyšovaní teploty snímača sa zas bude znižovať (obrázok 4.5). Pri zapnutej rádiometrii by mal byť vypnutý AGC, pretože inak nám jeho algoritmus spôsobí jej neúčinnosť, ako keby bola vypnutá. Moja verzia kamery rádiometrický modul neobsahuje.



Obr. 4.5: Hypotetický výstup kamery voči zmene teploty senzora, naľavo s vypnutou rádiometriou, vpravo so zapnutou [22].

CCI/TWI rozhranie príkazov

Kamera Lepton podporuje dvojvodičové rozhranie (TWI), skoro totožné ako I²C. Cez neho prebieha ovládanie kamery pomocou rozhrania príkazov CCI (command control interface). Pozostáva z niekoľkých 16-bitových registrov, čo znamená, že komunikácia prebieha vždy po 16 bitoch rýchlosťou 100, 200 Kbaudov alebo 1 Mbaud. Zahajuje sa odoslaním 7-bitovej adresy zariadenia (ID), ktorá je 0x2A. Ako ďalšie sa podľa adresy vyberie register, s ktorým budeme pracovať. Všetky registre sú v tabuľke 4.1.

Následné sa doňho zapíšu dáta s tým, že usporiadanie bajtov je vo formáte big-endian. Pri posielaní príkazu ich štruktúra vyzerá ako na obrázku 4.6. Obsahujú ID modulu, ktorého sa týka daný príkaz, ID príkazu, ktorý sa ma vykonať a typ príkazu (**Get** – prečítaj dáta, **Set** – zapíš dáta, **Run** – spusti metódu). Moduly zapuzdrujú určité elementy (atribúty a metódy) subsystémov kamery. ID príkazu potom identifikuje konkrétne elementy. Jednotlivé moduly sú:

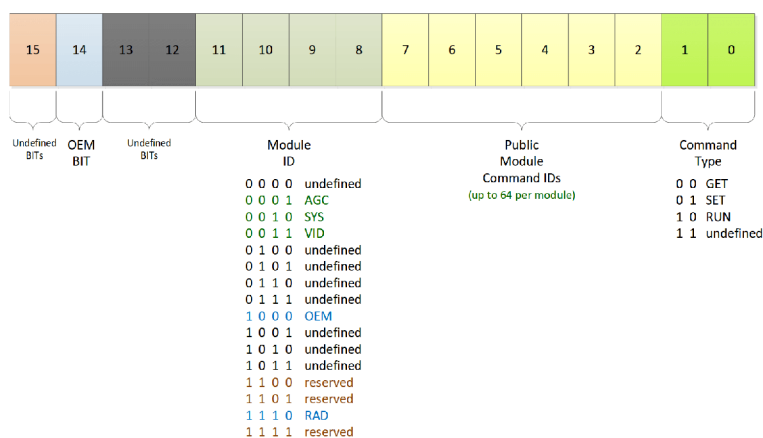
- AGC (automatic gain control) – nastavenia obrazu,

- SYS – systémové informácie,
- VID – spracovanie videa,
- OEM – konfigurácia kamery výrobcom,
- RAD – rádiometria.

Adresa registra	Register
0x0000	Power on/off register,
0x0002	STATUS register,
0x0004	COMMAND register,
0x0006	DATA length register,
0x0008 – 0x0026	COMMAND data registre.

Tabuľka 4.1: Registre CCI/TWI rozhrania.

Pri zápise príkazov do COMMAND registra musíme najprv kontrolovať BUSY bit v STATUS registri, či nie je kamera momentálne zaneprázdnená. V DATA length registri sa nachádza veľkosť dát, ktoré chceme vyčítať / zapísať. V COMMAND data registroch sa potom nachádzajú dáta na vyčítanie, resp. doň uložíme hodnoty, ktoré chceme uložiť pre konkrétne nastavenia. Pomocou CCI rozhrania vieme nastavovať módy zo sekcie 4.2 a rôzne ďalšie možnosti, popísané v samostatnom dokumente [23].



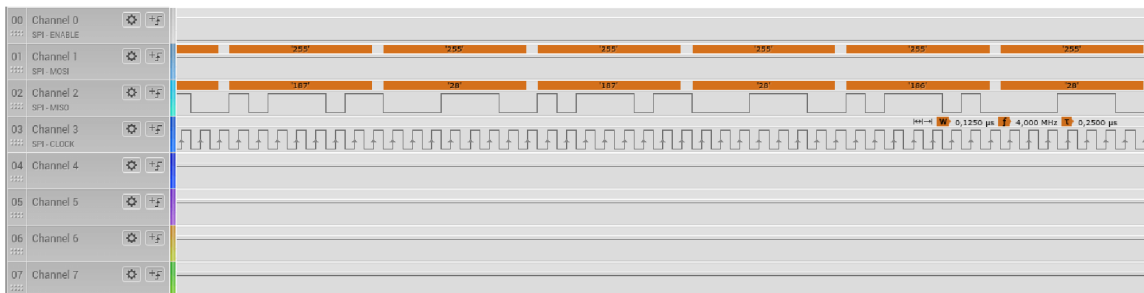
Obr. 4.6: Formát dát pri posielaní príkazu [23].

VoSPI

Jedná sa o protokol fungujúci cez SPI zbernicu, pomocou ktorého sú prenášané video snímky (Video over SPI) [37]. Kamera vysielať obrazové dáta (stream) je označená ako VoSPI slave, prijímajúce zariadenie sa nazýva VoSPI master. Používa bežné signály ako SPI (SCK, CS, MISO), až na MOSI, ktoré tu nie je, keďže sa jedná o jednosmerný prenos videa. Implementácia protokolu je obmedzená na master a slave v počte 1. CS je aktívny v logickej „0“. Master musí pre zariadenie slave generovať hodinový signál SCK. Lepton používa SPI v móde 3, v ktorom:

1. Polarita hodinového signálu CPOL = 1, SCK v logickej „0” znamená aktívny stav
2. Fáza hodinového signálu CPHA = 1, dáta sú posielané na zostupnej hrane a vzorkované by mali byť na nábežnej hrane SCK

Nastavením frekvencie SCK si vieme zvoliť, ako rýchlo nám bude kamera posielat dáta. Podporovaný rozsah je od 2 po 20 MHz. Samotné dáta sú prenášané v big-endian poradí, najvýznamnejší bit ako prvý. Signály zachytené z mojej kamery sú zobrazené na obrázku 4.7.



Obr. 4.7: Signály rozhrania SPI kamery Lepton, SCK = 4 MHz.

Vyššia vrstva protokolu je založená na posielaní **paketov**. Sekvencia niekoľkých paketov tvorí **rámec** (frame). Súvislá sekvencia rámcov potom vytvára **tok** (stream). Jednotlivé pojmy budú opísané pre môj typ Lepton kamery s rozlíšením 80×60 a výstupným video formátom Raw14. Vyššia verzia obsahuje určité rozdiely.

Paket

Paket je najmenšia jednotka, ktorá je posielaná medzi zariadeniami master a slave. Jeho veľkosť je 164 bajtov, z toho 4 bajty tvorí hlavička paketu a zvyšných 160 bajtov jeho telo (obrázok 4.8). Prvé 2 bajty hlavičky obsahujú 12-bitové ID paketu, ktoré identifikuje paket v danom rámci. Po poslaní celého rámcu začína jeho číslovanie na počiatkovej hodnote. Ďalšie 2 bajty obsahujú CRC kontrolný súčet (cyclic redundancy check) vypočítaný z celého paketu, s tým, že bity hlavičky sú nastavené na 0. Pri zistení chyby v CRC sa odporúča obnoviť synchronizáciu s kamerou.

Dátový obsah paketu je tvorený údajmi o konkrétnych hodnotách pixelov, ktoré majú veľkosť 2 bajty. V jednom pakete sa teda nachádzajú informácie o 80 pixeloch, ktoré tvoria 1 riadok výsledného snímku.

ID	CRC	Dátový obsah
2 bajty	2 bajty	160 bajtov

Obr. 4.8: VoSPI paket.

Rámec (frame)

Rámec obsahuje pakety zo všetkých 60 riadkov, ktoré vytvárajú výsledný snímok. Tie prichádzajú v poradí od navrchnejšieho riadku. Počet paketov rámca môže byť väčší ako 60 v prípade, že máme zapnutú telemetriu. Tá je posielaná v 3 paketoch buď na začiatku, alebo na konci rámca (konfigurovateľné cez CCI). Znamená to, že rámec môže mať veľkosť až 63 paketov. Rámec s nastavenou telemetriou na konci ako zápätie, ktorý používam ja, je na obrázku 4.9.

Poradie paketu	Obsah paketu
Paket 1	1. riadok snímku
Paket 2	2. riadok snímku
Paket 3	3. riadok snímku
...	...
Paket 60	60. riadok snímku
Paket 61	Linka telemetrie A
Paket 62	Linka telemetrie B
Paket 63	Linka telemetrie C

Obr. 4.9: Pakety v rámci, telemetria je nastavená ako zápätie.

Tok (stream)

Rámce sú v toku posielané snímkovacou frekvenciou približne 27 Hz. Efektívna snímkovacia frekvencia je ale 7 Hz, pretože unikátne snímky sú len v každom treťom rámci. Ostatné rámce obsahujú tzv. *discard* pakety, ktorých ID je hexadecimálne $x\text{Fxxx}$ (x značí ľubovoľnú hodnotu). Tie môžeme zahadzovať.

Pre správne vyčítanie snímok v toku je na začiatku potrebné nadviazať **synchronizáciu** s kamerou. Tá je nadväzovaná nasledovne:

1. Deaktivujeme CS a privedieme SCK do stavu nečinnosti aspoň na 185 ms.
2. Znova aktivujeme CS aj SCK.
3. Zahadzujeme *discard* pakety, až pokým nám nepríde prvý video paket.
4. Vyčítame celý rámec a pozrieme sa, či sedia ID paketov.
5. Ak nie, opakujeme celý postup.

Pri nadväzovaní synchronizácie sa môžeme stretnúť s viacerými problémami, ktoré môžu viesť aj k jej strate:

- pomalé časovanie – nestihneme vyčítať celý rámec predtým, než príde ďalší,
- dlhý čas medzi rámci – ak deaktivujeme CS na príliš krátku dobu, resp. nedeaktivujeme vôbec, nestihneme prečítať nasledujúci paket.
- nevyčítame žiaden ďalší rámec.

Protokol je navrhnutý tak, že nepotrebuje žiadne dodatočné časovacie signály. Pomocou CCI sa ale dá nakonfigurovať dodatočný signál na časovanie rámcov.

Typ zbernice	Typ pinu	Pin	Popis
I ² C	SDA	21	Datový vodič
I ² C	SCL	22	Synchronizačný vodič
VSPI	MISO	19	Obrazové dáta z ArduCAM
VSPI	MOSI	23	Nepoužíva sa
VSPI	SCK	18	Synchronizácia prenosu
VSPI	SS	5	Výber zariadenia (slave)
HSPI	MISO	12	Obrazové dáta z FLIR Lepton
HSPI	MOSI	13	Nepoužíva sa
HSPI	SCK	14	Synchronizácia prenosu
HSPI	SS	15	Výber zariadenia (slave)

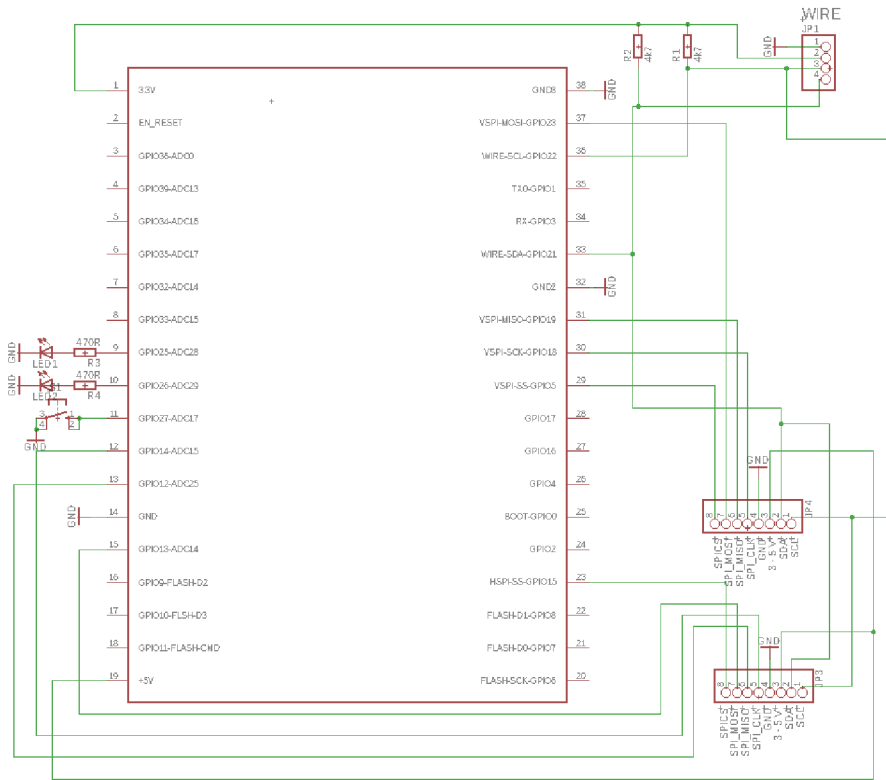
Tabuľka 4.2: Použité sériové piny na ESP32-DevKitC a ich význam.

Nakreslenie schémy plošného spoja som uskutočnil pomocou softvéru Eagle. Výsledná schéma a návrh sú na obrázkoch 4.11 a 4.12.

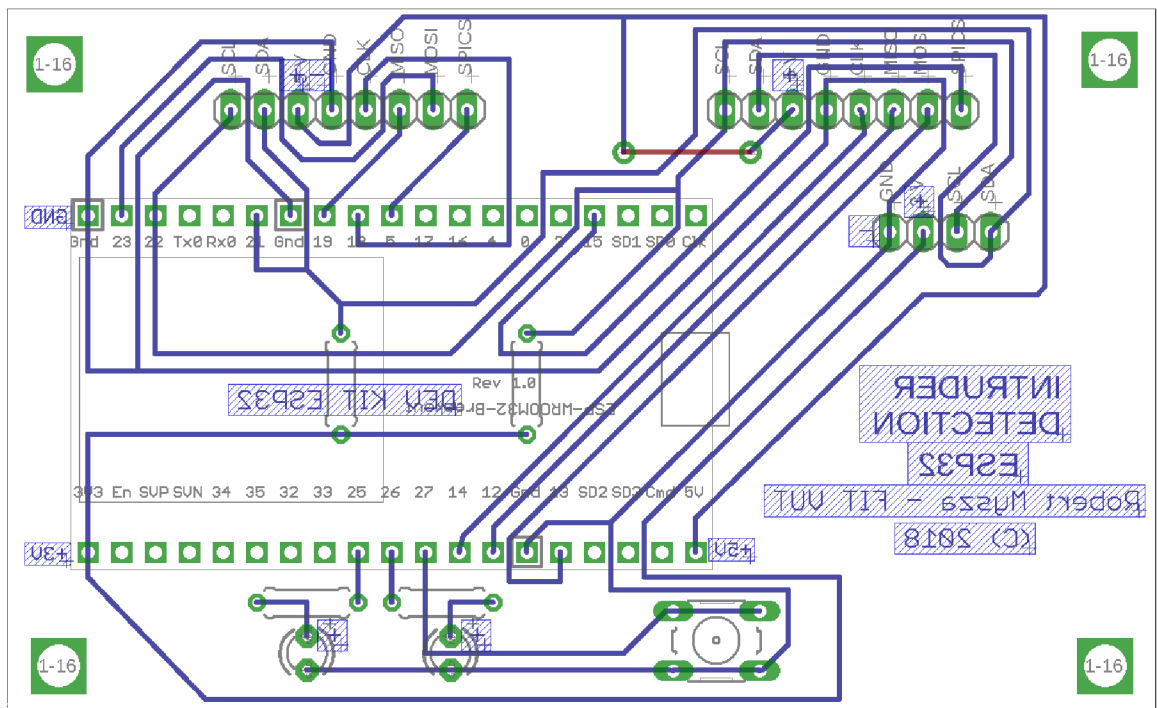
Ďalším krokom bola výroba dosky. Tú som realizoval technikou fotocesty. Na cuprextitovú dosku, na jednej strane pomedenú, som naniesol fotocitlivý lak Positiv 20. Ten funguje tak, že vytvorená vrstva sa rozpustí vo vývojke len v prípade, ak bola osvetlená UV svetlom. Neosvetlené časti tam ostanú. Schnutie prebieha na tmavom mieste, aby sa nám potom nezmyla celá vrstva. Na zaschnutú vrstvu laku sa priloží predloha vytlačená na priehľadnú fóliu a dosku necháme osvietiť vyše minútu pod zdrojom UV svetla, konkrétne som použil horské slnko. Osvietenú dosku som vyvolal v roztoku líhu, ktorý je priehľadný a dá sa v ňom rozoznať, či sa už doska vyvolala. Po vyvolaní ju bolo potrebné vyleptať v roztoku chloridu železitého. Dosku som potom umyl a očistil v liehu. Po vyvrtaní dier, nanosení pájateľného laku a napájkovanií súčiastok bola po následnej kontrole doska plošných spojov hotová.

Prvá verzia, ktorú som následne chcel otestovať, obsahovala chybu s vymenenými SPI pinmi. Na chybu som prišiel až keď bola doska vyrobená, čiže bolo kvôli tomu potrebné prekresliť schému a znova vyrobiť. Finálna verzia zariadenia je na obrázku 4.13.

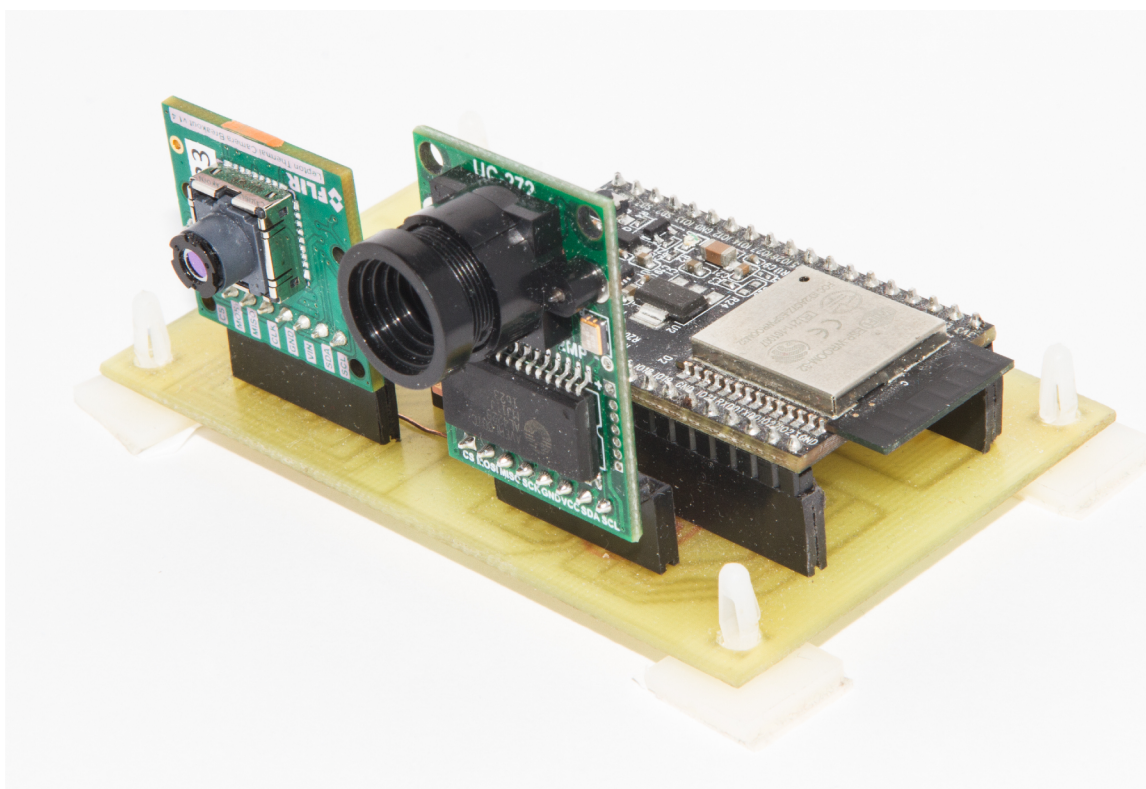
ESP 32



Obr. 4.11: Schéma plošného spoja.



Obr. 4.12: Návrh plošného spoja.



Obr. 4.13: Finálne zariadenie s obomi kamerami.

Kapitola 5

Implementácia softvéru

Táto kapitola bude venovaná programovému riešeniu mojej práce. Popíšem nástroje a externé knižnice, ktoré som použil pri vývoji. Následne sa zameriam na štruktúru môjho programu, ktorá je spätá s použitým frameworkom. Popíšem moje rozdelenie programu do komponentov a logické spojenia jednotlivých častí, akým spôsobom spolu komunikujú. Budem sa venovať aj spôsobu, akým je možné konfigurovať program pomocou mnou navrhnutých konfiguračných nastavení. Na konci predstavím moje riešenie programu bežiaceho na serveri, akým spôsobom je implementovaný, akým spôsobom komunikuje s mikrokontrolérom a webovými klientmi a ako vyzerá webové rozhranie na strane klienta.

5.1 Program mikrokontroléra

Na to, aby sme vedeli, ako budeme postupovať pri tvorbe programu, musíme poznať, čo všetko nám dovoľuje použiť daný mikrokontrolér, aké sú jeho obmedzenia. ESP32 beží na odľahčenom operačnom systéme **FreeRTOS**. Patrí do skupiny tzv. operačných systémov reálneho času (RTOS), ktoré musia byť schopné veľmi rýchlo reagovať na udalosti a vstupy, ktoré doň prídu. Veľmi často sú používané práve v mikrokontroléroch, ktoré musia zvládať jednu špecifickú úlohu. Nie je pri nich až tak dôležitý ich výpočetný výkon, ako to, aby sa dal určiť presný čas, ktorý im bude trvať vykonanie danej úlohy. Tento čas by sa mal približovať reálnemu času, pretože neskorá reakcia by mohla mať aj fatálne následky, napr. opozdené strelenie airbagu pri autonehode.

Na ESP32 existujú 2 metódy, ktorými sa dá programovať. Slúžia čisto len na tvorbu programu a nie je nimi nijako menený firmvér s operačným systémom. Prvou metódou je použitie Arduino jadra¹, ktoré v sebe integruje knižnice k ESP32 a vytvára nad nimi API (programové rozhranie), ktoré je do veľkej miery kompatibilné s Arduino zariadeniami. Jedná sa o jednoduchšiu metódu, pretože sme zbavený rôznych implementačných detailov a k Arduino je na internete k dispozícii nespočet zdrojových kódov a knižníc. Môžeme pritom využívať prostredie Arduino IDE na nahrávanie programu a monitorovanie sériového portu.

Druhá metóda, ktorú som zvolil ja, je použitie **Espressif IoT Development Frameworku**² (ESP-IDF), ktorý obsahuje sadu open-source knižníc a nástrojov na uľahčenie vývoja. Oproti knižniciam Arduina pracuje na nižšej úrovni a bude teda o niečo rýchlejší. Preloženie a nahrávanie programu prebieha pomocou ESP32 toolchainu. ESP-IDF potom obsahuje samotné knižnice a skripty, ktoré obsluhujú toolchain.

¹<https://github.com/espressif/arduino-esp32>

²<https://github.com/espressif/esp-idf>

Štruktúra programu

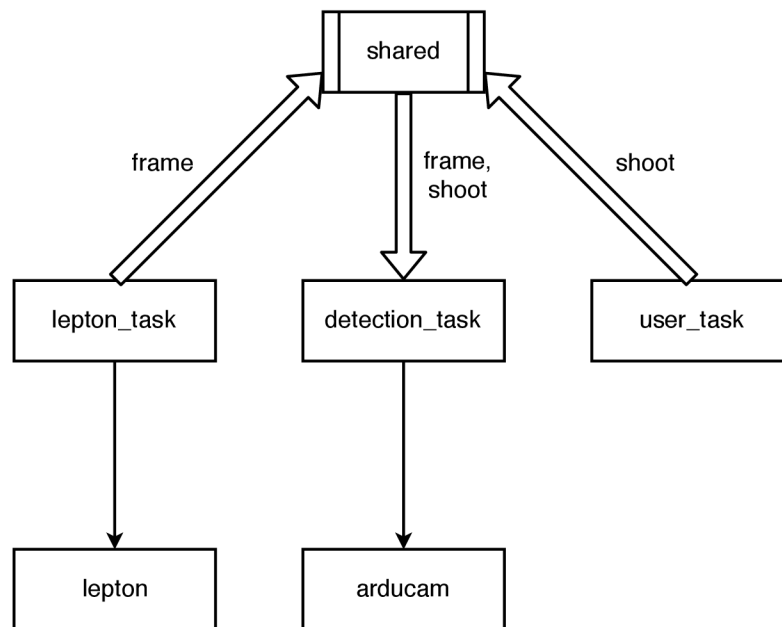
Samotný framework nie je zahrnutý v štruktúre programu. Funguje to tak, že súbor `Makefile` obsahuje len adresu jeho umiestnenia. Obecná štruktúra programu postaveného na ESP-IDF je zložená z komponentov, ktoré predstavujú určité celky. Je tvorená hlavným (`main`) a ostatnými komponentmi. Každý z nich obsahuje súbor `component.mk`, ktorý ESP-IDF Makefile hľadá a podľa nich potom spája závislosti v programe.

Štruktúra môjho programu zodpovedajúca ESP-IDF frameworku je v prílohe na obrázku [A.1](#).

Hlavná časť programu

Pri navrhovaní programu som použil FreeRTOS vlákna (tasks). Dôvod bol hlavne ten, že udržanie synchronizácie s termokamerou je celkom zložité a vlákna napomáhajú tomu, aby vyčítavanie z kamery nebolo ničím spomaľované. Vlákno `lepton_task` preto ukladá snímky do zdieľanej štruktúry `shared`, z ktorej si ho následne vyberá vlákno `detection_task`.

Na multivláknovú synchronizáciu je použitý semafor. Ten sa spolu s aktuálnym snímkom (`frame`) a príznakom na vykonanie snímku (`shoot`) nachádza v zdieľanej štruktúre `shared`. Základné rozloženie programu je na obrázku [5.1](#).



Obr. 5.1: Diagram hlavnej časti programu.

Vlákno `lepton_task`

Inicializuje I²C a SPI rozhranie termokamery Lepton a používa funkcie z komponentu `lepton` na prácu s kamerou. Na začiatku vyčíta prvý snímok (rámeč) z kamery pomocou funkcie `transfer_frame()` (algoritmus [1](#)). Podľa neho zistí, či je kamera zosynchronizovaná tak, že sa pozrie, či sedia ID paketov. Ak nie je, aplikuje postup na synchronizáciu, ktorý je opísaný v kapitole [4.2](#). Ak je semafor uvoľnený, aktuálny snímok uloží do štruktúry `frame` v zdieľanej štruktúre. V opačnom prípade ho zahodí, aby bola udržaná synchronizácia (algoritmus [2](#)).

Algoritmus 1: Vyčítanie jedného rámca z termokamery

```
repeat
|   prečítaj paket;
until ID paketu ≠ 0xF;
prečítaj ďalšie pakety rámca;
while je paket v rámci do
|   uprav poradie bajtov na big-endian;
|   prejdi na ďalší paket;
end
```

Algoritmus 2: Synchronizácia s termokamerou, aktualizácia snímku

```
while 1 do
|   vyčítaj rámec;
|   if ID 20. packetu ≠ 20 then
|       deaktivuj CS;
|       počkaj 200ms;
|       continue;
|   end
|   if semafor je voľný then
|       aktualizuj snímok;
|   else
|       zahod' snímok;
|   end
end
```

Vlákno `detection_task`

Na začiatku čaká na uvoľnenie semaforu. Následne si nakopíruje aktuálny snímok, aby nezdržoval predošlé vlákno (znamenalo by to zahadzovanie snímkov) a aby mohol uvoľniť semafor čo najrýchlejšie. Snímok je tvorený paketmi obsahujúcimi nepotrebné hlavičky, ktoré zahodí. Taktiež obsahuje údaje o telemetrii, konkrétne sa jedná o linku telemetrie A, ktorú si uloží. Pre nás podstatný údaj v nej je teplota FPA senzora. Výsledné obrazové dáta sú poslané na analýzu funkcie `detection()`. Problém, ktorý musí vyriešiť je, že nemá k dispozícii presnú teplotu daných pixelov, ale len nejaké hodnoty (kapitola 4.2). Tie si prevediem na teplotu v stupňoch Celzia T pomocou vzorca

$$T = a * raw + T_{fpa} - k, \quad (5.1)$$

kde raw je hodnota pixelu, T_{fpa} teplota senzora kamery v stupňoch Celzia, a a k sú konštanty, ktoré sa dajú zistiť experimentálne. Prebieha to tak, že pred kameru umiestnime predmet s nami dopredu známou teplotou a odmeriame výstupné surové dáta. Zrobíme aspoň 2 merania, s ktorých vieme dostať 2 rovnice s 2 neznámymi a ich korene vypočítame nejakou známou matematickou metódou. Mne osobne sa overilo použitie konštánt z tohto zdroja³ ($a = 0,0465$, $k = 349,44$). Teploty mi približne sedeli, no neviem presne povedať, na koľko veľmi sú presné.

³<https://groups.google.com/forum/#!topic/flir-lepton/MhCsyeY4HY0>

Samotná detekcia prebieha segmentáciou objektu pomocou algoritmu **Sliding Window** (posuvné okno) [25]. Jej hlavnou myšlienkou je vytvorenie vyhľadávacieho okna na základe vstupných údajov, ktoré sa postupne posúva a vyhodnocuje sa, či sa v jeho oblasti nachádza nami hľadaný objekt. Implementačne sa jedná o štyri vnorené cykle, dva na presun okna v horizontálnej a vertikálnej rovine, dva na iterovanie všetkých pixelov v okne. Pre každý pixel skúmame, či jeho teplotná hodnota spadá do nami nastaveného rozsahu teplôt. Prejdeme celé okno a spočítame počet pixelov splňujúcich našu podmienku. Ak je väčší ako nami nastavená prahová hodnota, vyhodnotíme detekciu za úspešnú (narušiteľ je detekovaný), rozsvietime červenú LED diódu a pošleme výsledný termogram na server. Z komponentu `arducam` zavoláme funkciu `arducam_capture()`, ktorá zrobí snímok z druhej kamery a ten taktiež odošle na server.

Vlákno `user_task`

Toto vlákno inicializuje nami použité GPIO na vstup tlačítka a výstupy 2 LED diód. Jeho úlohou je potom obsluhovať prerušenia, ktoré môžu vzniknúť stlačením tlačítka. Tie sa ukladajú do fronty, s ktorej si ich vyberá a spracováva. Podstatou tlačítka je okamžité odoslanie snímok z oboch kamier. Vlákno nastavuje premennú `shoot` v zdieľanej štruktúre, z ktorej si ju potom vyberá predošlé vlákno a nehladiac na detekciu vykoná odoslanie na server. Zelená LED dióda indikuje pripojenie na server, červená detekovanie narušiteľa.

Subkomponenty

Jedná sa o programové celky, u ktorých som usúdil, že dáva zmysel dať ich mimo hlavnej časti. Dôležitým je komponent `lepton`, ktorý bol už v podstate opísaný v sekcii 5.1. Jeho úlohou je vytvoriť API nad VoSPI rozhraním termokamery. Rýchlosť SPI prenosu nastavuje na 4MHz.

Ďalším komponentom je `lepton_cci_interface`. Ten taktiež vytvára rozhranie medzi termokamerou, ale nad jej CCI rozhraním pre posielanie príkazov. K tomu používam pre-robené Lepton SDK, konkrétne sa jedná o Arduino knižnicu⁴. Pomocou neho deaktivujem AGC (malo by byť predvolene vypnuté) a povolím telemetriu.

Na komunikáciu s prídavnou kamerou slúži komponent `arducam`. Jedná sa o oficiálnu knižnicu od tvorcov kamery⁵, ktorá je určená na zariadenia Arduino. Pre účely mojej práce som ju mierne upravil a zakomponoval do môjho kódu. Zvonka pracujem s komponentom pomocou funkcie `arducam_capture()`. Kamera snímky posiela vo formáte JPEG a ukladá si ich do FIFO fronty. Keďže tento formát má premenlivú veľkosť snímok pri danom rozlíšení, pred vyčítaním je potrebné si zistiť veľkosť fronty. Následne z nej môžeme vyčítať snímok, ktorý odošleme na server. Rýchlosť SPI nastavujem na 4MHz a rozlíšenie kamery na 800×600 px.

Komponent `wifi_socket` slúži na komunikáciu mikrokontroléra cez Wi-Fi a vytvorenie spojenia zo serverom pomocou TCP socketov. Zvonka je volaný funkciou `send_data()`, ktorá ako parametre dostáva typ kamery, obrazové dáta a dĺžku dát. Ako prvé kontroluje spojenie so serverom a v prípade potreby ho nadviaže. Ako prvé posiela na server HTTP GET dotaz pomocou knižnice `esp-request`⁶. Súčasťou dotazu je dotazovacieho reťazca (query string) obsahujúci ako parameter typ kamery, ku ktorej patria dáta („flir” alebo

⁴<https://github.com/NachtRaveVL/Lepton-FLiR-Arduino>

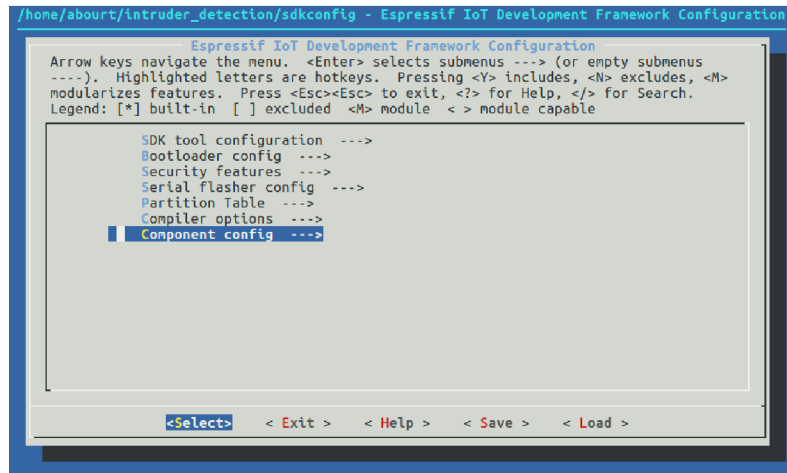
⁵https://github.com/ArduCAM/ArduCAM_ESP32S_UNO

⁶<https://github.com/tuanpmt/esp-request>

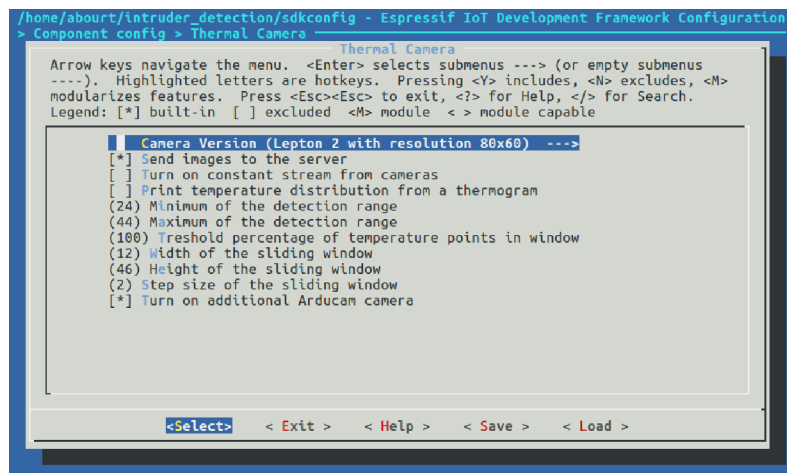
„arducam”) a dĺžku dát v bajtoch, ktoré má server prijať. Ak sa mu to podarí poslať a dostane odpoveď, cez TCP protokol mu následne pošle obrazové dáta.

Konfigurácia programu

Framework ESP-IDF obsahuje rozšírené možnosti konfigurácie mikrokontroléra. Okrem toho poskytuje možnosť vytvoriť si vlastné konfiguračné makrá, ktoré si je možné nastaviť pred prekladom programu. Na to všetko slúži konfiguračný nástroj kernelu **menuconfig**. Spúšťa sa príkazom „make menuconfig”. Jeho rozhranie je na obrázku 5.2.



Obr. 5.2: Konfiguračný nástroj kernelu menuconfig.



Obr. 5.3: Obrazovka s mnou definovanými konfiguračnými nastaveniami.

Súbor `sdkconfig` v zdrojovej zložke môjho programu obsahuje nástrojom vygenerovanú konfiguráciu. V zložkách komponentov sa potom môžu nachádzať súbory `Kconfig`, v ktorých je pomocou rovnako pomenovaného jazyka⁷ možné definovať databázu konfiguračných možností. V hlavnom komponente som si vytvoril vlastnú, ktorá obsahuje:

⁷<https://www.kernel.org/doc/Documentation/kbuild/kconfig-language.txt>

- voľbu typu termokamery (môj program podporuje len verziu s rozlíšením 80×60 px),
- či chceme posielat snímky na server,
- zapnutie neustáleho posielania snímok (stream),
- povolenie výpisu rozloženia teploty cez sériový port,
- minimum a maximum z rozsahu detekcie,
- prahovú hodnotu počtu teplotných bodov,
- šírku a výšku posuvného okna
- zapnutie prídavnej ArduCam kamery.

V menu na nastavenie servera a Wi-Fi sa zadáva názov a heslo Wi-Fi siete, IP adresa, HTTP a TCP port servera. Výsledná obrazovka s mojimi nastaveniami je na obrázku 5.3.

5.2 Serverová časť

Mikrokontrolér posielal snímky z termo a VGA kamery na server. Ten je implementovaný v Javascripte pomocou frameworku **Node.js**. Beží na 2 rôznych portoch.

Port 8043 je pridelený TCP službe, na ktorú sú posielané konkrétne obrazové dáta. Výstupným formátom digitálnej kamery je JPG, v ktorom sú uložené aj na serveri. Dáta z termokamery sú prevedené na obrázok vo formáte PNG. Všetky snímky sú uložené v podzložkách `camera/` a `thermal/` v zložke `captures/`, ktoré sa vytvárajú pri štarte servera, ak ešte nie sú vytvorené. V nich sa dá skontrolovať história detekcií.

Na porte 3000 beží HTTP služba, ktorá prijíma HTTP GET dotazy od mikrokontroléra s informáciami o posielaných dátach (typ kamery, veľkosť dát) v parametroch dotazovacieho reťazca. Je to z dôvodu, že snímky z kamier sú posielané samostatne, aby bolo možné posielat napr. len snímky z jednej kamery. Server by taktiež inak dopredu nevedel, akú majú veľkosť. Okrem toho HTTP server obsluhuje požiadavky zo strany klientov (webové prehliadače). Výsledné snímky sú im posielané pomocou javascriptovej sieťovej knižnice `socket.io`⁸. K tomu používa vlastný protokol podobný *Websockets*. Funguje na spôsobe priameho spojenia medzi serverom a klientom. Nie je preto potrebné neustále sa dotazovať na server. Novopripojenému klientovi sa najprv odošlú najnovšie snímky, ktoré sú uložené na serveri. Všetky ďalšie sú mu posielané v momente, keď prídu z kamier. Spolu s nimi je posielaný aj čas najnovšieho snímku.

Zobrazenie termosnímků

Termokamera posielala dáta snímok ako 14-bitové hodnoty jednotlivých pixelov. Tie je potrebné previezť na farebnú reprezentáciu. Robí sa to namapovaním hodnôt na určitú škálu farieb. Pred mapovaním si zistím hodnoty najmenšieho a najväčšieho pixelu. Následne pomocou vzorca

$$value_{pixel} = \frac{raw - min}{range} * 255, \quad (5.2)$$

získam 8-bitovú hodnotu pixelu ($value_{pixel}$). Hodnota *raw* značí 14-bitové surové dáta, *min* hodnotu najmenšieho pixelu a *range* rozdiel hodnôt najväčšieho a najmenšieho pixelu.

⁸<https://socket.io/>

Namapovaná hodnota predstavuje index do poľa, v ktorom mám uložené jednotlivé RGB zložky farieb v palety. Z neho sa vyberú a priradia konkrétnemu pixelu. Na vygenerovanie palety farieb som použil program Palette Generator⁹. Vygeneroval som v ňom niekoľko paliet (obrázok 5.4), predvolene je v programe použitá tá s názvom Fusion. Jej pomenovanie pochádza od spoločnosti FLIR. Jedná sa o najbežnejšie používanú farebnú paletu pri termogramoch.

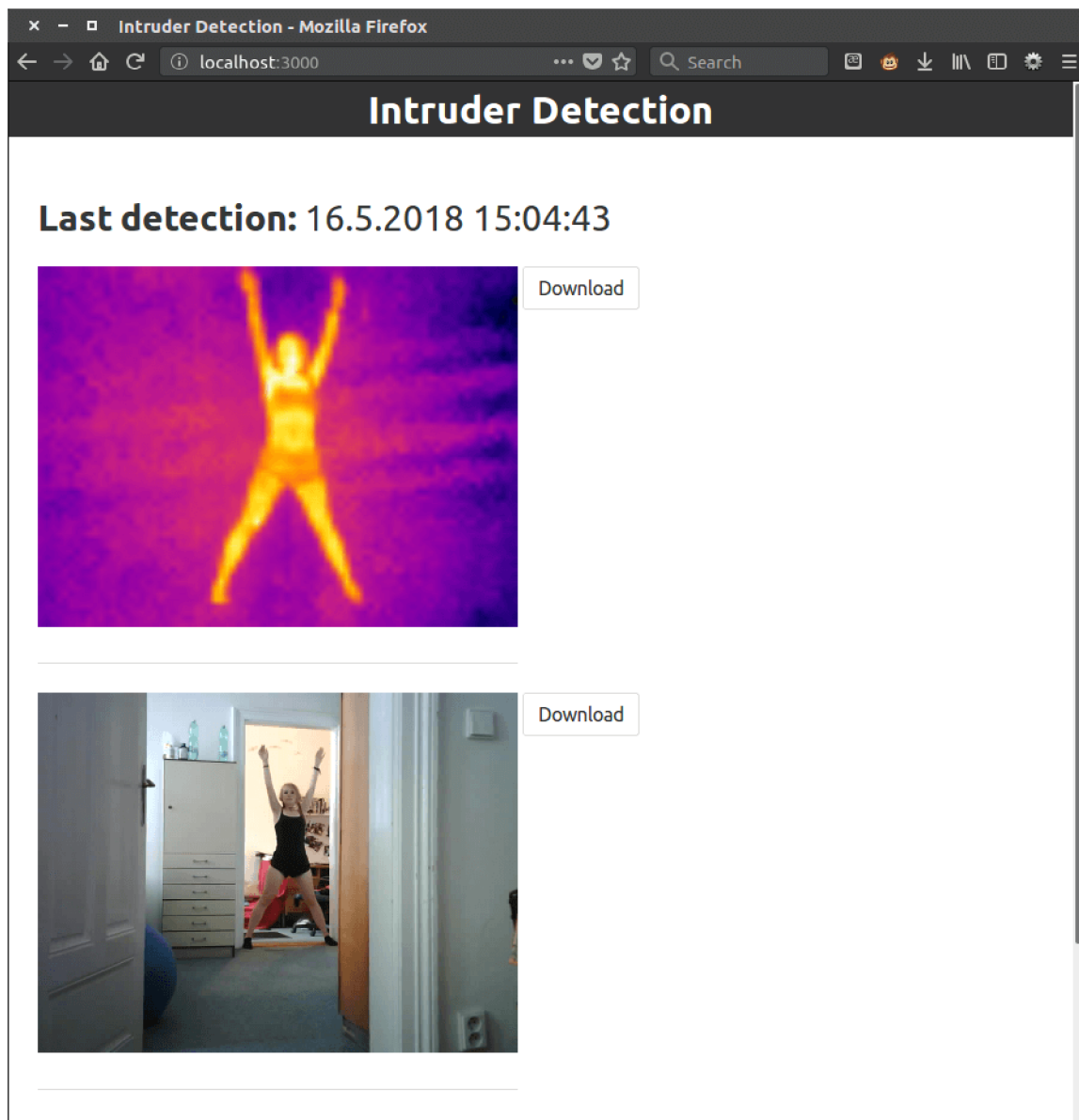


Obr. 5.4: Vygenerované palety farieb pre termogram.

⁹<https://bitbucket.org/napalmy/palette-generator-binary/downloads/>

Webové rozhranie

Pomocou webového prehliadača sa vieme pripojiť na vzdialený server. Z neho nám sú posielané snímky, ktoré sú zobrazené pomocou HTML5 canvasu¹⁰. Poskytuje nám možnosť vykreslovať snímky v reálnom čase a teda vytvoriť video obraz. Aktuálne snímky si vieme uložiť pomocou tlačítka.



Obr. 5.5: Webové rozhranie na zobrazenie snímok narušiteľa.

¹⁰https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Canvas_API

Kapitola 6

Testovanie

Na testovanie výsledného riešenia bolo potrebné kameru umiestniť do prostredia, v ktorom sa nachádzajú objekty predstavujúce nášho potenciálneho narušiteľa. V našom prípade sa bude jednať o postavu človeka. Pri testovaní nebude zaujímavá VGA kamera, tá bude slúžiť len na pomocné zobrazovanie snímok prostredia. Podstatným komponentom je pre nás termokamera. Neustálym snímaním prostredia bude vytvárať termogramy, ktoré budú podliehať analýze v mikrokontroléri. V termograme budeme pomocou algoritmu *Sliding Window* hľadať oblasti, ktoré obsahujú možného narušiteľa (popis v sekcii 5.1). Naším cieľom je zistiť úspešnosť detekcie a zhodnotiť jej obmedzenia a pokúsiť sa nájsť prípady, v ktorých nefungovala.

Najdôležitejšiu časťou pre správnu funkciu detekčného algoritmu je nastavenie parametrov. Jedná sa najmä o parameter percentuálneho prahu počtu pixelov v posuvnom okne, ktoré spadajú do nami vymedzeného teplotného rozsahu. S parametrom súvisí aj nami zvolená veľkosť posuvného okna. Šírku a výšku okna som určil experimentálne. Osoba sa postavila do fixnej vzdialenosti. Z termogramu som určil šírku a výšku osoby v pixeloch, podľa vzdialenosti jej protihľých teplotných bodov vzhľadom na horizontálnu a vertikálnu os osoby. Rozmery osoby odpovedajú veľkosti zvoleného okna.

Detekčný teplotný rozsah som určil podľa hodnôt, ktoré môžu odpovedať narušiteľovi. Jedná sa o problematickú časť, pretože na veľkosť teploty vplyvajú rôzne faktory, ktoré je potrebné brať v úvahu (sekcia 3.2). Kvôli nepresnostiam merania mojhou termokamerou (sekcia 4.2) sa jedná len o približné rozmedzie a v niektorých prípadoch som zaznamenal, že mnou meraná teplota bola nižšia oproti reálnej aj o viac ako 5 °C. Najväčší problém tvorí určenie dolnej hranice detekčného rozsahu. V teplejšom prostredí (viac ako cca 26 °C) sa teplota pozadia začína približovať teplote človeka, čo môže predznamenať falošné detekcie. Naopak v prípade príliš vysoko položenej hranice nemusí dôjsť k detekcii vôbec, hľadiac na to že, človek môže mať na sebe oblečených viac teplotných vrstiev zabraňujúcich teplotnému vyžarovaniu tela. Hornú teplotnú hranicu som určil podľa najteplejšieho narušiteľa, ktorý sa nachádza v časti zvieracej ríši vyskytujúcej sa bežne v našich končinách, konkrétne sa jedná o sliepku (sekcia 3.3). Presný percentuálny prah teplotných pixelov v okne som určoval testovaním. Čím vyšší zvolíme prah vo fixnej veľkosti okna, tým sa znižuje schopnosť úspešnej detekcie.

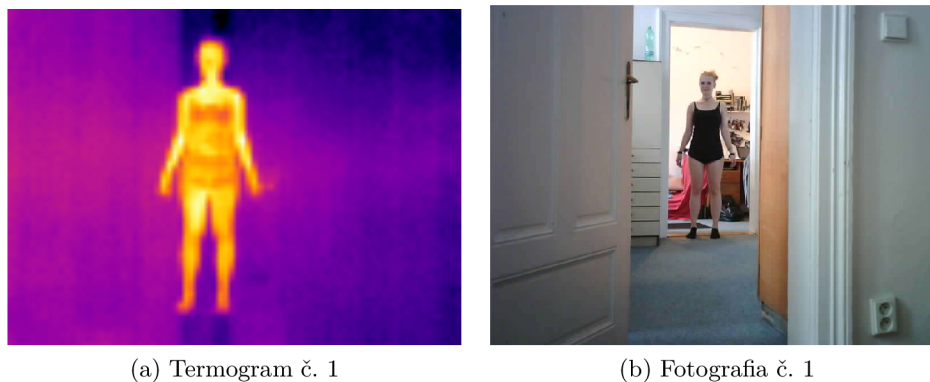
6.1 Testovacie prípady

Narušiteľ stál vo všetkých prípadoch vo vzdialenosti 6 až 7 metrov od zariadenia. Podľa tejto vzdialenosti som určil šírku a výšku posuvného okna. Veľkosť prahu som skorším testovaním určil na približne 60%, dá sa ňou ale pokojne pohybovať smerom dole. Parametre detekcie sú v tabuľke 6.1.

Minimum detekčného rozsahu (°C)	24
Maximum detekčného rozsahu (°C)	43
Prah teplotných bodov (%)	60
Šírka posuvného okna (px)	12
Výška posuvného okna (px)	40

Tabuľka 6.1: Nastavené parametre detekcie počas testovania.

Prvý test obsahoval detekciu vzpriamenej vyrovnanej postavy, ktorá mala ruky pri tele a bola otočená priamo ku kamere (obrázok 6.1). Nemala na tele žiaden objekt, ktorý by mohol narušiť detekciu. Obrysy postavy zodpovedali veľkosti posuvného okna, čiže detekcia prebehla bez problémov.



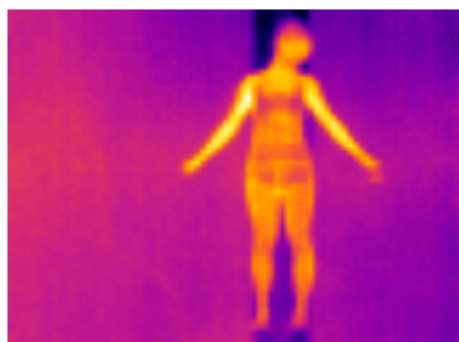
Obr. 6.1: Testovací prípad č. 1.

Pri druhom teste mala osoba rozpažené ruky (obrázok 6.2). Malo to vplyv na to, že sa nezmestila kompletne celá do veľkosti okna. Detekciu to ale nijak nenarušilo.

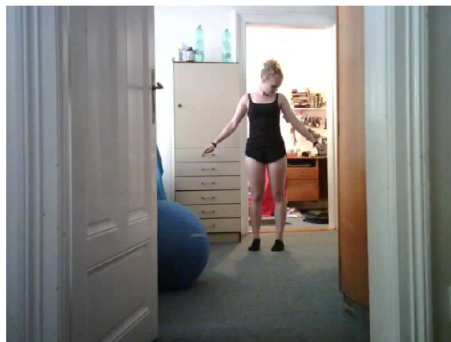
V treťom teste sa vyskytovali dve osoby, ktoré boli posunuté trochu ďalej od kamery (obrázok 6.3). Počet osôb nemá na detekciu žiaden vplyv, keďže teplotný prah v okne je prekročený tak či tak. Ba naopak, pri vyššom počte osôb, ktoré sú umiestnené blízko seba, sa zvyšuje pravdepodobnosť detekcie.

Navolená veľkosť okna má väčšiu výšku ako šírku, pretože bola určená podľa vzpriamenej postavy. Preto v prípade, ak je osoba v polohe ľahu, nedôjde k detekcii, pretože sa z veľkej časti nezmestí do okna (obrázok 6.4). Na úspešnú detekciu by sme mohli obrázok analyzovať naviac aj s našim oknom natočeným o 90°. Inak dopadol tento test neúspešne.

V poslednom teste držal subjekt v rukách zrkadlo (obrázok 6.5). Na začiatku bol prah navolený dostatočne veľký na to, aby došlo k detekcii bez zrkadla, ale jeho umiestnenie pred subjekt už znamenalo neúspešnú detekciu. Tento prípad ilustruje dôležitosť nakonfigurovania dostatočne nízkeho prahu, pretože hodnota zodpovedajúca úspešnej detekcii v ideálnych podmienkach môže byť ľahko narušená v reálnych podmienkach.

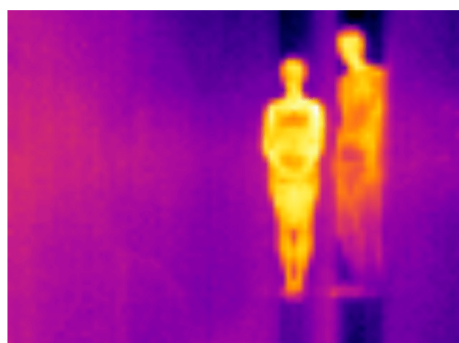


(a) Termogram č. 2

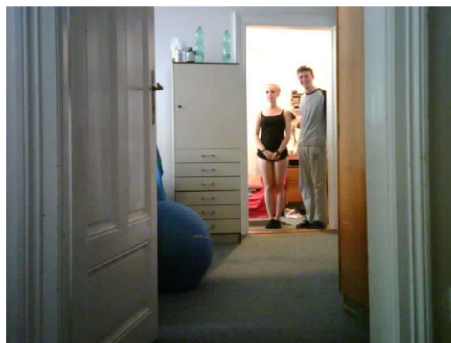


(b) Fotografia č. 2

Obr. 6.2: Testovací případ č. 2.

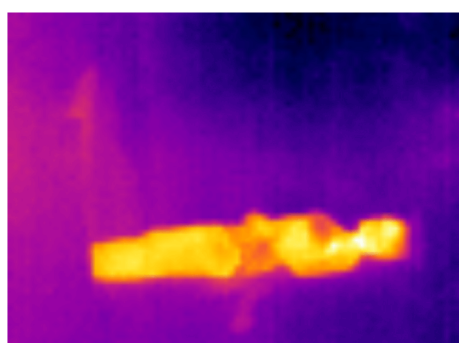


(a) Termogram č. 3

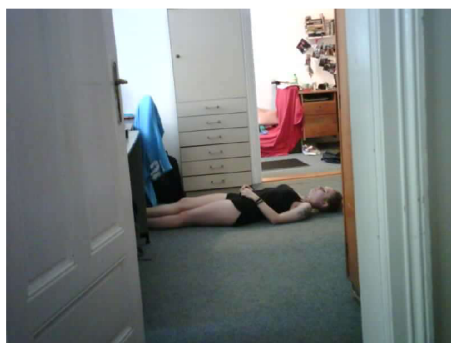


(b) Fotografia č. 3

Obr. 6.3: Testovací případ č. 3.

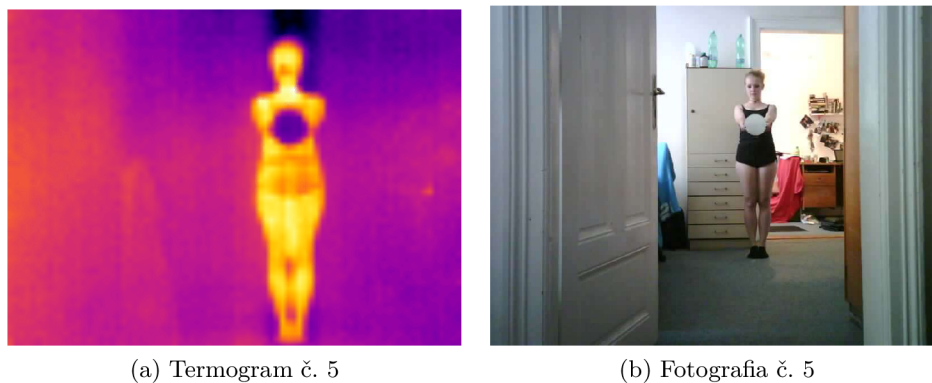


(a) Termogram č. 4



(b) Fotografia č. 4

Obr. 6.4: Testovací případ č. 4.



Obr. 6.5: Testovací případ č. 5.

6.2 Zhodnotenie úspešnosti detekcie

Na základe niekoľkých jednoduchých testov bola otestovaná úspešnosť detekcie pomocou algoritmu Sliding Window. Ich výsledky sú v tabuľke 6.2. V testoch boli ukázané slabiny tejto metódy a bola preukázaná dôležitosť navolenia správnych parametrov. Jedná sa najmä o závislosť na navolení presnej veľkosti okna, ktorú som nastavil zodpovedajúcu veľkosti narušiteľa. Detekcia s veľkou úspešnosťou by sa dala dosiahnuť napríklad nastavením jeho veľkosti na rozmery termogramu. To by ale malo za následok veľa falošných detekcií, ktoré by mohli byť spôsobené viacerými menšími teplými objektmi v zábere. Veľký vplyv na úspešnosť má aj prah teplôt. V prípade jeho príliš vysokej teploty obmedzíme detekciu len na veľmi blízku vzdialenosť, v ktorej by musel stáť narušiteľ smerom ku kamere. Znížením prahu na 10% a menej dostaneme pomerne spoľahlivú detekciu aj na veľké vzdialenosti. Malo by to ale znova nevýhodu zvýšenia šance falošných detekcií, hlavne od malých predmetov, ktoré by sa v zábere zohriali (napr. zapnutý sporák alebo ohrevné teleso). V prípade, že v našom testovanom prostredí sa žiadne takéto objekty vyskytovať nebudú, je nastavenie nízkeho prahu najlepší spôsob na spoľahlivú detekciu.

Najväčší problém, ktorý má detekcia v mojom prípade, tkvie hlavne v absencii rádiometrického modulu v mojej kamere, ktorým by som vedel dostať presné teploty prostredia. Najlepšiu detekciu som pozoroval po zapnutí kamery, keď bola ešte vychladnutá. Po jej zohriatí sa teploty začali skresľovať a mnou meraná teplota bola aj o viac ako 5 °C menšia oproti reálu. Preto hodnotím mnou použitý spôsob merania teploty ako nepresný.

Test č.	Typ testu	Úspešnosť
1	Vzpriamený narušiteľ	detekované
2	Rozpažené ruky	detekované
3	Dvaja narušiteľovia	detekované
4	Narušiteľ v ľahu	nedetekované
5	Narušiteľ so zrkadlom	nedetekované

Tabuľka 6.2: Výsledky testov.

Kapitola 7

Záver

V rámci mojej som realizoval výrobu zariadenia, ktoré je schopné detekovať a zaznamenať narušiteľa na základe termogramu. Pri detekcii odošle snímky z oboch kamier na server. Použil som pri tom mikrokontrolér ESP32 v kombinácii s termokamerou FLIR Lepton a VGA kamerou ArduCam Mini. Na začiatku som si musel naštudovať základy spojené s technológiou termovízie a zrobiť si prehľad v aktuálnych termokamerách, aby som bol na základe toho schopný vybrať správnu termokameru na použitie v spojení s mikrokontrolérom. Ďalšou úlohou bolo naštudovať si algoritmy spojené s detekciou objektu v termograme. Jedná sa o obdobný problém ako je detekcia pomocou obyčajných kamier, ale s tým, že máme k dispozícii namiesto kontrastu farieb kontrast teplôt, ktorý je častokrát zreteľnejší, hlavne čo sa týka veľkých vzdialeností alebo rôznych vplyvov, ktoré inak zatemňujú obraz, napríklad dym alebo hmla. Z toho dôvodu nám na detekciu stačia aj jednoduchšie algoritmy na segmentáciu objektu, ako napríklad odčítanie prostredia alebo jednoduché hľadanie teplotných oblastí. Ja som konkrétne použil algoritmus Sliding Window.

Pred návrhom zariadenia som si musel zrobiť prehľad v súčasných mikrokontroléroch, aby som vybral ten najvhodnejší. ESP32 má navrch v tom, obsahuje 2-jadrový procesor a taktiež zabudovaný Wi-Fi modul. Pri návrhu zariadenia som musel brať ohľad na sériové rozhrania, pomocou ktorých je možné komunikovať s kamerami. Následne som si sám vyrobil vlastnú dosku plošných spojov. Dôležitou úlohou v práci bolo pochopenie fungovania termokamery Lepton, jej protokolu na posielanie snímok VoSPI a rozhrania na konfiguráciu kamery CCI. Vychádzal som pritom z voľne dostupných dokumentácií.

Softvér pre mikrokontrolér je postavený na Espressif IoT Development Frameworku, ktorý slúži na nahrávanie programu a sprostredkúva veľkú časť nástrojov a knižníc, napríklad na prácu so sériovými rozhraniami. Firmware mikrokontroléra je postavený na operačnom systéme FreeRTOS, ktorého knižnice som využíval. Konkrétne sa jedná najmä o knižnice na prácu s vláknami, semaformi a frontami. Termokamera posiela snímky reprezentované niekoľkými paketmi, ktoré treba vyčítavať synchronizovane s kamerou. K tomuto slúži samostatné vlákno. Ďalšie vlákno, ktoré analyzuje snímok, čaká, pokiaľ bude dostupný celý snímok. Na multivláknovú synchronizáciu je použitý práve semafor, ktorý prvé vlákno otvorí až vtedy, ak správne vyčíta celý snímok. Ak sa podarí v termograme na základe teplôt detekovať narušiteľa, je následne vyčítaný snímok aj z druhej kamery a ak je aktívne pripojenie zo serverom, sú tam oba obrázky odoslané. Server je postavený na javascriptovom frameworku Node.js a okrem mikrokontroléra sa naňho môžu pripojiť aj webové klienti, ktorí majú cez webovú stránku možnosť kontroly aktuálnych snímok narušeného prostredia.

Po otestovaní riešenia som prišiel na to, že chýbajúci rádiometrický modul vytvára celkom veľký problém pri meraní presnej teploty. Tá ale nemusí byť v našom prípade taká dôležitá, ako fakt, že pred použitím zariadenia do konkrétneho prostredia je potrebné nakonfigurovať jeho detekčné parametre, ktoré môžu silno ovplyvniť detekciu. Závisí len na nás, čo všetko chceme byť schopný detekovať a či sa môžu v prostredí nachádzať teplé predmety, ktoré by nám mohli vytvoriť falošné detekcie.

Na práci sa dá pokračovať v rôznych smeroch, do ktorých by sme ju mohli rozšíriť. Prvé rozšírenie číha na doske zariadenia, na ktorej je pripravený konektor na zapojenie jednoduchého monochromatického OLED displeja. Na ňom by sme vedeli zobrazovať nejaké základné informácie, napr. o teplotách, alebo vykresľovať pixely odpovedajúce narušiteľovi. Ďalším rozšírením by mohlo byť vytvorenie grafického rozhrania na CCI termokamery, cez ktoré by sme vedeli termokameru Lepton nakonfigurovať a nastavovať nespočet parametrov, ktoré sú obsiahnuté v dokumentácii. Jednalo by sa konkrétne o webovú aplikáciu, ktorá by bola schopná komunikovať s termokamerou a tá by sa následne vedela nakonfigurovať za chodu. Vylepšením práce by bola implementácia presnejšieho algoritmu na detekciu, ktorý by nemusel bežať len na mikrokontroléri, ale mohlo by sa jednať o algoritmu strojového učenia s využitím knižnice OpenCV, kvôli ktorému by ale bolo potrebné detekciu realizovať na serveri.

Literatúra

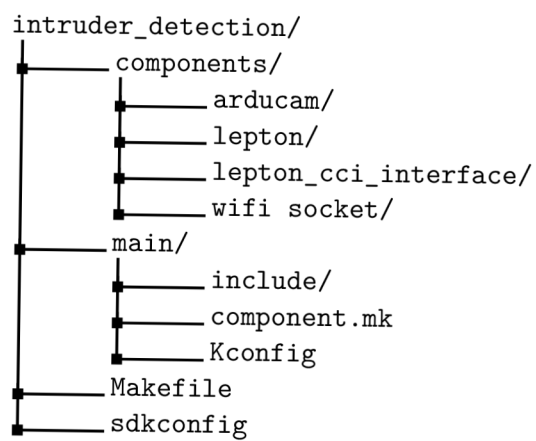
- [1] Abuarafah, A.; Khozium, O.; Abdrabou, E.: *Real-time Crowd Monitoring using Infrared Thermal Video Sequences. International Journal of Engineering Science*, ročník 8, č. 3, Březen 2012: s. 133–140, ISSN 1545-1003.
- [2] Al-Amri, S. S.; Kalyankar, N.; Khamitkar, S.: Image segmentation by using edge detection. *International Journal on computer science and engineering*, ročník 2, č. 3, 2010: s. 804–807.
- [3] Anderson, L. I.: *Nikola Tesla on His Work With Alternating Currents and Their Application to Wireless Telegraphy, Telephony, and Transmission of Power: An Extended Interview*. Colorado: Twenty-First Century Books, 2002, 26–27 s.
- [4] Apiste: *About Infrared rays*. [Online; navštívené 6.1.2018].
URL http://www.apiste-global.com/fsv/technology_fsv/detail/id=1187
- [5] Bala, A.: *An improved watershed image segmentation technique using MATLAB. International Journal of Scientific & Engineering Research*, ročník 3, č. 6, Červen 2012: s. 1–4.
- [6] Barr, E. S.: *Historical survey of the early development of the infrared spectral region. American Journal of Physics*, ročník 28, č. 1, Leden 1960: s. 42–54,
doi:10.1119/1.1934975.
- [7] Barr, E. S.: *The Infrared Pioneers—II. Macedonio Melloni. Infrared Physics*, ročník 2, č. 2, 1962: s. 67–74, ISSN 0020-0891.
- [8] Barr, E. S.: *The Infrared Pioneers—III. Samuel Pierpont Langley. Infrared Physics*, ročník 3, č. 4, 1963: s. 195–206, ISSN 0020-0891.
- [9] Bedlek, M.: *Elektrochemická příprava fluorescenčního senzoru s vysoce uspořádaným nanostrukturovaným povrchem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013, 11–12 s., vedoucí diplomové práce Ing. Jana Drbohlavová, Ph.D.
URL
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68037
- [10] Bertozzi, M.; Broggi, A.; Grisleri, P.; Graf, T.; Meinecke, M.: *Pedestrian detection in infrared images*. In *IEEE IV2003 Intelligent Vehicles Symposium. Proceedings (Cat. No.03TH8683)*, Červen 2003, s. 662–667, doi:10.1109/IVS.2003.1212991.
- [11] Bierman, W.: *The temperature of the skin surface. Journal of the American Medical Association*, ročník 106, č. 14, 1936: s. 1158–1162,
doi:10.1001/jama.1936.02770140020007.

- [12] Byrnes, J.: *Unexploded Ordnance Detection and Mitigation*. Springer, 2009, ISBN 978-1-4020-9253-4, 21–22 s.
- [13] Case, T.: *Physics Reviews. Notes on the change of resistance of certain substrates in light*, ročník 9, 1917: s. 305–310.
- [14] Cashman, R. J.: *Film-Type Infrared Photoconductors. Proceedings of the IRE*, ročník 47, č. 9, Září 1959: s. 1471–1475, ISSN 0096-8390.
- [15] Chien, S.-C.: *Pedestrian characterization in infrared thermography imaging*. In *Advanced Robotics and Intelligent Systems (ARIS), 2016 International Conference on. IEEE*, Srpen 2016, s. 1–1, doi:10.1109/ARIS.2016.7886628.
- [16] Clarke, A.; Rothery, P.: *Scaling of body temperature in mammals and birds. Functional Ecology*, ročník 22, č. 1, Říjen 2004: s. 58–67, doi:10.1111/j.1365-2435.2007.01341.x.
- [17] Davis, J. W.; Keck, M. A.: *A Two-Stage Template Approach to Person Detection in Thermal Imagery*. In *Application of Computer Vision, 2005. WACV/MOTIONS '05 Volume 1. Seventh IEEE Workshops on*, ročník 1, Leden 2005, s. 364–369, doi:10.1109/ACVMOT.2005.14.
- [18] Davis, J. W.; Sharma, V.: *Robust Background-Subtraction for Person Detection in Thermal Imagery*. In *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop*, Červen 2004, str. 128, doi:10.1109/CVPR.2004.157.
- [19] Espressif: *ESP32 Datasheet*. Leden 2018, version 2.1.
- [20] Evelin Sujji, G.; Lakshmi, Y.V.S.; Wiselin Jiji, G.: *MRI Brain Image Segmentation based on Thresholding. International Journal of Advanced Computer Research*, ročník 3, č. 1, Březen 2013: s. 97–101, ISSN 2277-7970.
- [21] FLIR Systems: *Cooled or Uncooled?* [Online; navštívené 7.1.2018]. URL <http://www.flir.eu/science/display/?id=65982>
- [22] FLIR Systems: *FLIR Lepton® Long Wave Infrared (LWIR) Datasheet*. Březen 2016, Version 1.2.6.
- [23] FLIR Systems: *Software Interface Description Document (IDD)*. Prosinec 2016, Document number: 110-0144-04 Rev 200.
- [24] Ghosh, P.; Mitchell, M.; Gold, J.: *Segmentation of thermographic images of hands using a genetic algorithm*. In *Image Processing: Machine Vision Applications*, Leden 2010, str. 2, doi:10.1117/12.839896.
- [25] Goldmann, T.: *Sledování hlídaného prostoru a detekce narušení bezpečnosti kamerovým systémem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, 2013, 8–19 s., vedoucí diplomové práce Ing. Filip Orság, Ph.D. URL <http://www.fit.vutbr.cz/study/DP/BP.php.cs?id=15063>
- [26] Goubet, E.; Katz, J.; Porikli, F.: *Pedestrian tracking using thermal infrared imaging*. In *Proceedings of SPIE 6206*, Květen 2006, s. 797–808, doi:10.1117/12.673132.
- [27] Infiniti Electro-Optics: *Thermal Imaging*. [Online; navštívené 7.1.2018]. URL <https://www.infinitioptics.com/technology/thermal-imaging>

- [28] Jones, B. F.; Plassmann, P.: *Digital infrared thermal imaging of human skin*. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, ročník 21, č. 6, Listopad 2002: s. 41–48, ISSN 0739-5175, doi:10.1109/MEMB.2002.1175137.
- [29] Jüngling, K.; Arens, M.: *Feature based person detection beyond the visible spectrum*. In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, Červen 2009, ISSN 2160-7508, s. 30–37, doi:10.1109/CVPRW.2009.5204085.
- [30] Kim, D. E.; Kwon, D. S.: *Pedestrian detection and tracking in thermal images using shape features*. In *12th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, Říjen 2015, s. 22–25, doi:10.1109/URAI.2015.7358920.
- [31] Nakayama, T.; Ohnuki, Y.; Kanosue, K.: *Fall in Skin Temperature during Exercise Observed by Thermography*. *The Japanese Journal of Physiology*, ročník 31, č. 5, 1981: s. 757–762, doi:10.2170/jjphysiol.31.757.
- [32] NASA: *Herschel infrared experiment*. [Online; navštívené 10.12.2017]. URL http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/classroom_activities/herschel_experiment2.html
- [33] National Research Council: *Seeing Photons: Progress and Limits of Visible and Infrared Sensor Arrays*. Washington, DC: The National Academies Press, 2010, ISBN 978-0-309-15304-1, 12 s., doi:10.17226/12896.
- [34] Pekarská, V.: *Multimediální učebnice konvenčních zobrazovacích systémů – IR*. ČVUT – Fakulta biomedicínského inženýrství, [Online; navštívené 7.5.2018]. URL http://webzam.fbmi.cvut.cz/hozman/AKK/ZSL_IR.ppt
- [35] Robertshaw, D.: *Temperature regulation and the thermal environment*. *Duke's Physiology of Domestic Animals*, Leden 2004: s. 962–973.
- [36] Rogalski, A.: *History of infrared detectors*. *Opto-Electronics Review*, ročník 20, Zář 2012: s. 279–308, ISSN 1896-3757.
- [37] Sieh, W.; Fagerburg, P.: *Video over SPI (VoSPI) Implementaion Specification*. Leden 2013, Document Number: 102-PS245-43.
- [38] Sulovská, K.: *Sledování vlivu teploty na termogram lidské tváře – část 2. Postereus*, ročník 5, č. 7, Červenec 2012, ISSN 1338-0087, [Online; navštívené 7.5.2018]. URL <http://www.posterus.sk/?p=13337>
- [39] Wang, W.; Zhang, J.; Shen, C.: *Improved human detection and classification in thermal images*. In *IEEE International Conference on Image Processing*, Zář 2010, ISSN 1522-4880, s. 2313–2316, doi:10.1109/ICIP.2010.5649946.
- [40] Wikipedia: *Planck's law*. [Online; navštívené 12.5.2018]. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Planck%27s_law
- [41] Zhu, Q.; Yeh, M.; Cheng, K.; Avidan, S.: *Fast Human Detection Using a Cascade of Histograms of Oriented Gradients*. In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)*, ročník 2, Červen 2006, s. 1491–1498, doi:10.1109/CVPR.2006.119.

Príloha A

Obsah CD



Obr. A.1: Adresárová štruktúra programu pre mikrokontrolér.