

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 1123

**ANALIZA TEMPERATURNIH PROFILA ELEKTRONIČKIH
SUSTAVA NA TISKANIM PLOČICAMA NA TEMELJU
ANALIZE SLIKA DOBIVENIH S TERMALNIM KAMERAMA**

Mario Hošnjak

Zagreb, lipanj 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 1123

**ANALIZA TEMPERATURNIH PROFILA ELEKTRONIČKIH
SUSTAVA NA TISKANIM PLOČICAMA NA TEMELJU
ANALIZE SLIKA DOBIVENIH S TERMALNIM KAMERAMA**

Mario Hošnjak

Zagreb, lipanj 2023.

Zagreb, 10. ožujka 2023.

ZAVRŠNI ZADATAK br. 1123

Pristupnik: **Mario Hošnjak (0036534935)**

Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija i Računarstvo

Modul: Računarstvo

Mentor: doc. dr. sc. Tomislav Marković

Zadatak: **Analiza temperaturnih profila elektroničkih sustava na tiskanim pločicama na temelju analize slika dobivenih s termalnim kamerama**

Opis zadatka:

Razlike u vrijednostima temperature u pojedinim dijelovima elektroničkih sustavama mogu utjecati na performanse cijelog sustava. Kako bi se analizirali termalni profili elektroničkih krugova, sklopova i sustava, koriste se termalne kamere te analiza slika dobivenih s termalnim kamerama. Analiza slika može biti manualna, što je često vremenski zahtjevno, te automatska na temelju računalnih analiza slike. Automatska analiza slike omogućava brzu kvantifikaciju i klasifikaciju funkcionalnosti sklopa s obzirom na termalnu disipaciju elektroničkih komponenti. Cilj projekta je razviti programske skripte za analizu termalnih profila dobivenih s termalnim kamerama te kvantificirati točnost sustava s drugim sustavima za mjerenje temperature (poput termoparova i toplinski osjetljivih otpornika).

Rok za predaju rada: 9. lipnja 2023.

Sadržaj

Uvod	1
1. Infracrvena termografija	2
1.1. Uvod u infracrvenu termografiju	2
1.2. Principi infracrvene termografije	3
1.2.1. Toplina i temperatura	3
1.2.2. Elektromagnetsko zračenje	5
1.2.3. Crno tijelo	7
1.2.4. Zakoni zračenja	7
1.3. Princip rada termografskih kamera	9
1.4. Primjene infracrvene termografije	11
1.4.1. Zgradarstvo	11
1.4.2. Procesna postrojenja	11
1.4.3. Medicina	12
2. Adafruit MLX90640 IR Thermal Camera	13
3. Korištene tehnologije	16
3.1. Python	16
3.1.1. OpenCV library	16
3.1.2. PIL library	17
3.1.3. Matplotlib library	17
4. Skripta za detekciju objekata	18
4.1. Kratak opis skripte	18
4.2. Algoritam po koracima	18
4.3. Detaljan opis skripte	19
4.3.1. Snimanje termalnom kamerom i generiranje termograma	19
4.3.2. Detekcija objekata	20

5.	Skripta za kontinuirano mjerenje temperatura.....	22
5.1.	Kratak opis skripte.....	22
5.2.	Algoritam po koracima.....	22
5.3.	Detaljan opis skripte	23
	Zaključak	25
	Literatura	26
	Sažetak.....	28
	Summary.....	29
	Privitak	30

Uvod

Porast temperature česta je neželjena nuspojava do koje dolazi prilikom rada strojeva, elektronike, različitih industrijskih i procesnih postrojenja. Visoke temperature često su štetne za materijale. One mogu uzrokovati promjene njihovih svojstava, smanjiti njihovu izdržljivost i radni vijek te im ograničiti performanse. Porast temperature može biti posljedica trenja između komponenti, neučinkovite pretvorbe energije, kao rezultat kemijskih reakcija, preopterećenosti ili neispravnosti dijelova, ali i rezultat nepravilnog korištenja i održavanja strojeva ili čitavih sustava. Također, u nekim slučajevima štetno je ako se temperatura snizi na vrijednosti niže od dopuštene. Tada može doći do zamrzavanja tekućina, kondenzacije vlage i negativnih promjena u svojstvima materijala. Stoga je jasno da su u velikom broju primjena potrebni brzi i precizni načini mjerenja temperatura, kako bi se sustavi mogli održavati u dozvoljenim temperaturnim granicama te kako bi se na vrijeme mogli uočiti i otkloniti problemi vezani uz temperaturu.

Postoji nekoliko različitih načina mjerenja temperature, a mogu se podijeliti na kontaktne i beskontaktne. Kontaktni senzori moraju biti fizički povezani s mjerenim objektom, što u nekim slučajevima nije moguće ostvariti, ili jednostavno nije praktično. Također postoje bežični senzori koji koriste bežične protokole za prijenos temperaturnih mjerenja s mjesta na kojem mjere na sustave za prikupljanje i obradu podataka. Ovaj način mjerenja također nije prikladan za mnoge primjene, jer takvi sustavi mogu biti komplicirani za korištenje i održavanje, često zahtijevaju vlastitu računalnu infrastrukturu te mogu biti vrlo skupi.

Infracrvene termalne kamere nude precizno i beskontaktno mjerenje temperatura na jednostavan i vrlo praktičan način. Također pružaju i informaciju o raspodjeli temperature na površini mjerenog objekta, predstavljajući mjerenja u obliku lako čitljivih i intuitivnih termalnih slika. No, i ova tehnika ima svoje mane, a jedna od njih je često vrlo visoka cijena.

Stoga je ideja ovog završnog rada razviti alate koji će pružati funkcionalnost mjerenja i analize izmjerenih podataka, koristeći termalne kamere nižeg cjenovnog ranga. Konkretno, ideja je razviti alate koji će se koristiti za analizu temperaturnih profila elektroničkih sustava na tiskanim pločicama na temelju mjerenja dobivenih termalnim kamerama.

1. Infracrvena termografija

1.1. Uvod u infracrvenu termografiju

Termografija (od grč. *therme* + *graphia*) je postupak beskontaktnog mjerenja temperature te njezine raspodjele na površini mjerenog tijela. Spomenuti postupak se temelji na mjerenju intenziteta infracrvenog elektromagnetskog zračenja, koje emitira svako tijelo čija je temperatura viša od apsolutne nule ($-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ili 0 Kelvina). Mjerenje se provodi termalnim kamerama. To su uređaji u kojima se kroz optički sustav za izoštravanje infracrveno zračenje propušta na fotodetektor, senzor koji energiju zračenja pretvara u naponski signal. Na taj način termalna kamera odrađuje funkciju analogno-digitalnog pretvornika, pretvarajući analogni signal (IC zračenje) u digitalni signal, koji se obrađuje i prikazuje u obliku dvodimenzionalne slike (termograma). [1]

S obzirom na načine mjerenja i načine obrade izmjerenih podataka, termografiju se dijeli na aktivnu i pasivnu, ali i na kvalitativnu i kvantitativnu. Pasivna termografija temelji se na snimanju topline koju objekt prirodno isijava, bez da se objekt dodatno zagrijava od strane mjernih uređaja. Aktivna termografija, za razliku od pasivne, koristi vlastiti izvor energije za generiranje toplinskog kontrasta između dijela objekta kojeg mjerimo i njegove pozadine. Namjernim zagrijavanjem točke interesa moguće je promatrati dinamičko ponašanje materijala kod promjene temperature. Neki od načina zagrijavanja objekata su zagrijavanje intenzivnim i kratkotrajnim svjetlosnim impulsima, zagrijavanje infracrvenim lampama, indukcijsko zagrijavanje, zagrijavanje laserima, mikrovalno i ultrazvučno zagrijavanje itd. Kvantitativno mjerenje podrazumijeva precizno određivanje temperatura i temperaturnih razlika. Kvantitativna termografija je korisna u situacijama kada su potrebne točne numeričke vrijednosti za daljnju analizu. Kvalitativna termografska mjerenja usredotočuju se na temperaturne razlike, a ne na određivanje točnih temperatura. Kvalitativan pristup termografiji se koristi u gotovo 90% primjena za potrebe industrije, ali ga koriste i npr. policija i vojska za traženje i detekciju ljudi te za nadzor područja u uvjetima smanjene vidljivosti. [2,4]

1.2. Principi infracrvene termografije

Kako bi u potpunosti razumjeli način na koji rade termalne kamere, potrebno je kvalitetno razumijevanje osnovnih principa na kojima se temelji termografija. Zato ću u ovom potpoglavlju nešto detaljnije proći kroz teoriju toplinskog i elektromagnetskog zračenja, mehanizme prijenosa topline i zakone termodinamike.

1.2.1. Toplina i temperatura

Temperatura je fizikalna veličina koja karakterizira stupanj zagrijanosti nekog tijela. To je veličina koja je proporcionalna srednjoj kinetičkoj energiji molekula. Toplinska energija produkt je neprekidnog gibanja čestica u svim tijelima. Toplina je energija koja prelazi s jednog tijela na drugo tijelo zbog njihove temperaturne razlike, s tijela više temperature, prema tijelu s nižom temperaturom. Prijenos topline traje sve dok tijela imaju različite temperature, a kad im se temperature izjednače prijenos topline staje te kažemo da su tijela u termičkoj ravnoteži. [5]

Tri načina prijenosa topline:

- Vođenje (kondukcija)
- Strujanje (konvekcija)
- Zračenje (radijacija)

Do vođenja topline dolazi kada među raznim dijelovima nekog sredstva postoji temperaturna razlika, pa se tada prema II. Zakonu termodinamike energija vođenjem prenosi iz područja više temperature u područje niže temperature. Energija se prenosi direktno od molekule do molekule. Molekule različitih temperatura titraju različitom brzinom oko svog ravnotežnog položaja, a što je njihova temperatura viša, to je viša i njihova kinetička energija. Na taj se način zbog stalnih sudara međusobno prenosi kinetička energija, a pritom i toplina. U tijelima krutog agregatnog stanja vođenje je jedini mogući mehanizam širenja topline, dok su kod tekućina i plinova prisutni i strujanje i zračenje. Kondukcija topline kroz homogeni materijal može se računati pomoću *Zakona toplinske kondukcije*, također poznatom pod nazivom Fourierov zakon (1). Taj nam zakon govori da je brzina prijenosa topline kroz materijal proporcionalna negativnom gradijentu temperature te površini pod pravim kutovima na taj gradijent, kroz koju toplina protječe.

Fourierov zakon glasi:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -k \oint_S \nabla T \cdot dS, \quad (1)$$

gdje je Q količina prenesene topline, t je proteklo vrijeme, k je vodljivost materijala, T je temperatura, a S je površina kroz koju toplina protječe. [5]

U plinovima i tekućinama toplina se najviše prenosi konvekcijom, tj. usmjerenim gibanjem fluida s jednog mjesta na drugo mjesto. Pritom dolazi do miješanja čestica s različitim količinama kinetičke energije te pritom dolazi do disperzije topline. Konvekcija se može podijeliti na prirodnu ili slobodnu te na prisilnu. Kao dobar primjer prirodne konvekcije možemo navesti zagrijavanje lonca s vodom na štednjaku, gdje dolazi do zagrijavanja vode na dnu lonca te se tada zagrijana voda zbog svoje manje gustoće diže prema gore, a hladnija se voda zbog svoje veće gustoće spušta prema dolje. Iz spomenutog primjera može se zaključiti da do prirodnog strujanja dolazi zbog temperaturnih razlika u plinu ili fluidu, što je direktno povezano s istovjetnim razlikama u gustoći. Kod prisilne konvekcije strujanje se postiže mehaničkom promjenom tlakova unutar fluida ili plina, koristeći npr. pumpe ili ventilatore. Kod prisilne konvekcije dolazi do intenzivnijeg prijenosa topline, ali uz korištenje uređaja za postizanje prisilnog strujanja i korištenje energije za njihovo pokretanje. Prijenos topline konvekcijom računa se Newtonovim zakonom hlađenja:

$$q = h_c(T_p - T_f), \quad (2)$$

gdje je h_c koeficijent konvekcije, T_p temperatura čvrste plohe uz koju struji fluid, a T_f temperatura fluida dalje od granične plohe. [5]

Zračenje ili radijacija posljednji je od tri mehanizama prijenosa topline. Toplinsko zračenje nastaje kada atomi i molekule, koji su pobuđeni termičkim gibanjem, emitiraju elektromagnetske valove. [5] Što je tijelo zagrijanije, to njegove čestice imaju veću kinetičku energiju te titraju brže. Za razliku od kondukcije i konvekcije, radijacija ne ovisi o prijenosnom mediju, tako da je moguće širenje topline čak i kroz vakuum. [6] Užarena tijela uglavnom zrače elektromagnetske valove u infracrvenom spektralnom području. Ovisno o temperaturi tijela, intenzitet zračenja i valna duljina se mijenja. Što je tijelo toplije, intenzitet zračenja je veći, a valne duljine se sve više smanjuju. Tako pri nižim temperaturama tijela emitiraju infracrveno zračenje, pri temperaturama iznad 800 Kelvina tijela počinju zračiti elektromagnetske valove u spektru vidljive svjetlosti, dok kod vrlo visokih temperatura tijela

osim prethodno spomenute vidljive svjetlosti i infracrvenog zračenja emitiraju i ultraljubičastu (UV) svjetlost. [5,6]

1.2.2. Elektromagnetsko zračenje

Elektromagnetski valovi produkt su titranja elektrona oko jezgre atoma. Emitira ih svako tijelo čija je temperatura viša od apsolutne nule, tj. $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ili 0 K Kelvina. Energija se između dva tijela prenosi u obliku malih i nedjeljivih paketa energije – fotona ili kvanata. Za elektromagnetsko zračenje vrijedi da je dualne prirode. Ono iskazuje karakteristike valova kada se širi kroz prostor, ali i karakteristike čestica pri interakciji s drugim tvarima, čemu je primjer fotoelektrični efekt. [7]

Svaki val karakteriziraju frekvencija, valna duljina, amplituda, brzina širenja itd. Brzina širenja elektromagnetskog vala ovisi o vlastitoj frekvenciji i valnoj duljini, prema sljedećoj formuli:

$$v = \lambda \cdot f \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right], \quad (3)$$

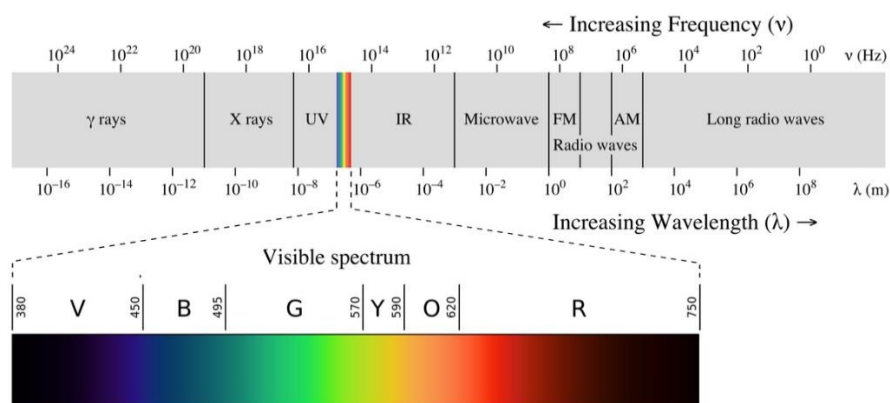
pri čemu v označava brzinu vala, λ označava valnu duljinu, a f označava frekvenciju.

Brzina vala je promjenjiva veličina, jer ovisi o mediju kroz koji se širi, dok je frekvencija neovisna o mediju kroz koji se širi, pa je zato konstantna. U vakuumu je brzina širenja elektromagnetskih valova jednaka brzini svjetlosti, tj. $2,998 \times 10^8\text{ m/s}$. [7]

Prijenos energije zračenjem moguć je na čitavom spektru valnih duljina. Kompletan spektar valnih duljina elektromagnetskog zračenja vidljiv je u nastavku (Sl. 1.1). Unutarnja energija fotona je proporcionalna njegovoj frekvenciji zračenja, a obrnuto je proporcionalna valnoj duljini elektromagnetskog zračenja. Iz toga slijedi da fotoni γ -zračenja sadrže najviše energije, dok radiovalovi sadrže najmanju energiju. Toplinski efekt prouzročava elektromagnetsko zračenje s valnim duljinama između približno $0.1\text{ }\mu\text{m}$ do oko $100\text{ }\mu\text{m}$. Dio spektra elektromagnetskog zračenja koji može širiti toplinu obuhvaća čitavo infracrveno zračenje, vidljivi spektar zračenja, te djelomično ultraljubičasto zračenje. [6,7]

Vidljiva svjetlost je elektromagnetski val koji obuhvaća usko područje elektromagnetskog zračenja valnih duljina od 400 do 700 nanometara. Vidljiva svjetlost je zračenje koje ljudsko oko može vidjeti, a različite valne duljine percipiraju se kao različite boje – valovi najviših valnih duljina u kao crvena, a valovi najnižih valnih duljina kao ljubičasta. [7]

Područje spektra infracrvenog elektromagnetskog zračenja smjestilo se odmah nakon spektra vidljive svjetlosti. Infracrveno zračenje karakterizira veća valna duljina i manja frekvencija od vidljivog zračenja. Infracrveno zračenje otkriveno je 1800. godine, kada je Federic William Herschel pomoću optičke prizme i Sunčevog zračenja zapazio da najvišu temperaturu zrači područje nakon crvenog dijela vidljivog spektra. [9] Ovo novo otkriveno zračenje nije vidljivo okom, no moguće ga je osjetiti na površini kože u obliku topline. Stoga je zaključio da mora postojati vrsta zračenja koja djeluje izvan vidljivog spektra.



Sl. 1.1: Spektar elektromagnetskog zračenja [8]

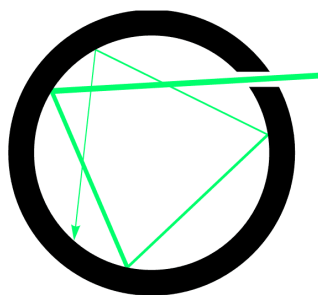
Za bolje razumijevanje onoga što slijedi u nastavku, bitno je spomenuti nekoliko osnovnih pojmova vezanih uz izmjenu topline zračenjem:

- Vlastita emisija – energija koju je promatrano tijelo emitiralo samo zbog svoje temperature, označava se s E
- Upadno zračenje – zračenje čiji izvor nije promatrano tijelo, već neko drugo tijelo u okolini onog promatranog, označava se s G
- Svjetloća površine – sveukupno zračenje emitirano s površine promatranog tijela, radi se o kombinaciji vlastite emisije, reflektiranog dijela upadnog zračenja, ali i propuštenog zračenja, označava se s K

1.2.3. Crno tijelo

Crno tijelo je idealizirano tijelo koje u potpunosti apsorbira svo upadno elektromagnetsko zračenje svih valnih duljina i iz svih smjerova, ono nam služi kao etalon pri promatranju ponašanja realnih tijela. [10] Ono je prema Kirchhoffovu zakonu zračenja najbolji izvor zračenja, tj. ne postoji tijelo koje pri odabranoj valnoj duljini i temperaturi može emitirati više zračenja od crnog tijela. Crno tijelo je difuzni emiter, što znači da je intenzitet njegovog zračenja neovisan o smjeru. [7]

Koncept crnog tijela vrlo je bitan u termografiji, budući da je on temelj za povezivanje količine emitiranog infracrvenog zračenja nekog tijela, s temperaturom površine tog tijela. U prirodi ne postoji apsolutno crno tijelo, pa je za potrebe kalibracije termografskih uređaja potrebno napraviti umjetno tijelo sa sličnim svojstvima kao i crno tijelo. Primjer takvog tijela je izotermna šupljina, koja se može vidjeti na slici u nastavku (Sl. 1.2). Kako bi izotermna šupljina bila što bolje crno tijelo, potrebno je da unutar šupljine dođe do što više refleksija i da se zračenje maksimalno moguće apsorbira. Pod pretpostavkom da broj refleksija unutar šupljine teži u beskonačnost, tada će intenzitet zrake koja napušta izotermnu šupljinu težiti u nulu. Kod tako opisanog tijela zračenje koje izlazi kroz otvor izotermne šupljine ovisit će samo o površinskoj temperaturi izotermne šupljine te će spomenuto zračenje biti jednako zračenju crnog tijela za tu temperaturu. [7]



Sl. 1.2: Otvor izotermne šupljine kao crno tijelo [11]

1.2.4. Zakoni zračenja

Intenzitet vlastitog emitiranog elektromagnetskog zračenja crnog tijela definira Planckova jednadžba (4). To je funkcija koja ovisi o apsolutnoj temperaturi površine crnog tijela i valnoj duljini kojom zrači.

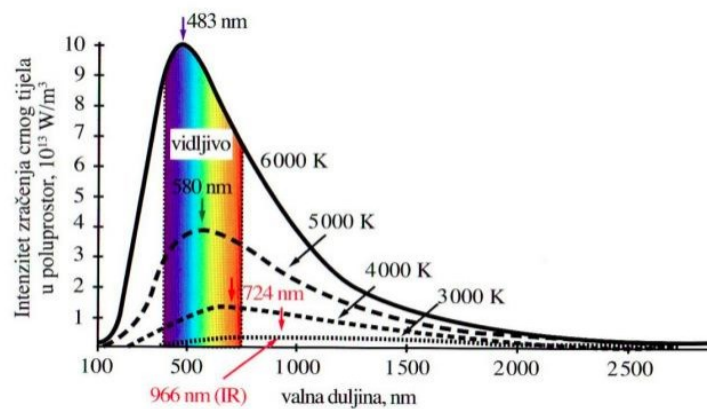
Planckova jednadžba glasi:

$$I = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot [\exp(h \cdot c / \lambda \cdot k \cdot T) - 1]} [W/m^3], \quad (4)$$

$h = 6,6256 \times 10^{-34} \text{ Js}$, Planckova konstanta $k = 1,3805 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, brzina svjetlosti u vakuumu $c = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$, T je apsolutna temperatura crnog tijela u Kelvinima. Integracijom Planckove jednadžbe dolazi se do izraza Planckove raspodjele (Sl. 1.3):

$$E_{\lambda,c} = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot [\exp(C_2/\lambda \cdot T) - 1]} [W/m^3], \quad (5)$$

pri čemu su $C_1 = 3,742 \times 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4/\text{m}^2$, $C_2 = 1,439 \times 10^4 \mu\text{m K}$.



Sl. 1.3: Spektralna (Planckova) raspodjela emisije crnog tijela [7]

Na ovom grafičkom prikazu (Sl. 1.3) vidljiva je ovisnost intenziteta zračenja za odabranu temperaturu o valnoj duljini elektromagnetskog zračenja. Iz grafa se može zaključiti da s porastom temperature tijela raste i intenzitet emitiranog zračenja. S porastom temperature vrijednost valne duljine pri kojoj je intenzitet najveći (λ_m) postaje sve manji. Izraz za izračun vrijednosti λ_m dobiva se sređivanjem Planckove jednadžbe (4), te on glasi:

$$\lambda_m = \frac{C_3}{T} = \frac{2897,8}{T} [\mu\text{m}] \quad (6)$$

Jednadžba (6) naziva se Wienov zakon pomaka te je iz nje jasno da se maksimum spektralne gustoće povećanjem temperature pomiče prema području kraćih valnih duljina. Pomoću Stefan-Boltzmannovog zakona (7) moguće je izračunati iznos zračenja crnog tijela:

$$E_c = \sigma \cdot T^4 [W/m^2], \quad (7)$$

gdje Boltzmannova konstanta σ iznosi $5,667 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$. Pomoću Stefan-Boltzmannovog zakona moguće je izračunati i emitirano zračenje realnih tijela tako što se

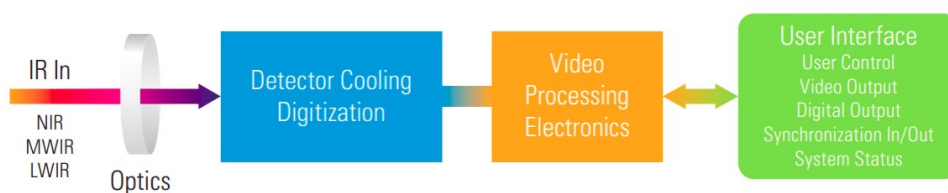
izraz (7) dodatno pomnoži s emisijskim faktorom ϵ . Emisijski faktor je vrijednost između 0 i 1, a dobiva se kao omjer vlastite emitirane energije realnog tijela i vlastite emitirane energije crnog tijela pri istoj odabranoj temperaturi. Realna tijela ne apsorbiraju svo upadno zračenje. Dio upadnog zračenja se apsorbira, dio se reflektira i dio se propusti. [12] Sljedeći izraz prikazuje u kojem su odnosu ti dijelovi. Vrijedi:

$$1 = a + r + p, \quad (8)$$

gdje je a faktor apsorpcije, r faktor refleksije, a p faktor propusnosti. Ovi faktori govore koliki se dio od ukupnog upadnog zračenja apsorbira, reflektira ili propušta. [12] Ovi faktori računaju se kao omjeri apsorbiranog i ukupnog upadnog zračenje, reflektiranog i ukupnog upadnog zračenja te propuštenog i ukupnog upadnog zračenja. Također je potrebno spomenuti i Kirchhoffov zakon termalne radijacije, koji povezuje faktor emisije i faktor apsorpcije. Ako promatramo tijelo na kojeg dolazi vanjsko upadno zračenje i temperatura tog tijela se ne mijenja, tada prema Kirchhoffovu zakonu vrijedi da su faktor emisije i faktor apsorpcije jednaki.[7]

1.3. Princip rada termografskih kamera

Termografska kamera uzima u obzir temperaturu okoline, udaljenost i koeficijent emisije snimanog objekta. Snimljeni podaci se obrađuju u vlastitom procesoru te se kao rezultat izračunava temperatura površine mjerenog objekta. [2] Glavni dijelovi termografske kamere su leća, detektor te elektronika na kojoj se izvodi *software* za obradu očitanih podataka. Pojednostavljeni dijagram rada infracrvenih termografskih kamera vidljiv je na slici u nastavku (Sl. 1.4).



Sl. 1.4: Pojednostavljeni blok dijagram IC kamere [12]

Leće infracrvenih termografskih kamera su oblikom jednake lećama na konvencionalnim kamerama, no razlikuju se u korištenim materijalima. Konvencionalne kamere snimaju zračenja vidljivog spektra, pa su leće takvih kamera dizajnirane da minimalno apsorbiraju i reflektiraju, a maksimalno propuštaju vidljivu svjetlost. Po istoj logici leće termografskih infracrvenih kamera dizajnirane su da maksimalno propuštaju

infracrveno zračenje. Ovo svojstvo postiže se uporabom materijala koji to omogućavaju, tj. najčešće se koristi silicij za leće termalnih kamera srednjeg valnog područja ili germanij za leće kamera dugih valnih područja. [7,12]

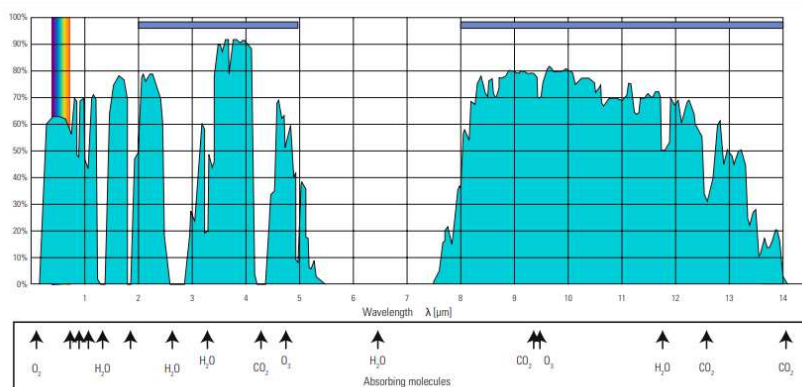
Nakon prolaska kroz leću, infracrveno zračenje preusmjerava se u FPA (*Focal Plane Array*) detektor. To je pravokutni mikročip sastavljen od matrice malih IC-detektora, veličine od oko 50 μ m x 50 μ m. [7] Funkcija FPA detektora je pretvaranje infracrvenog zračenja u električni signal. Tehnologija FPA detektora dijeli se u dvije podvrste; termalni i kvantni detektori. Česti tip termalnih detektora su mikrobolometri, detektori izrađeni od metala ili poluvodiča. Ovu vrstu detektora nije potrebno hladiti. Znatno su jeftiniji od kvantnih detektora te podržavaju široki spektar zračenja. S druge strane, kvantni detektori su znatno brži i precizniji od mikrobolometara. Izrađuju se od materijala poput *InSb*, *InGaAs*, *PtSi*, *HgCdTe*, što ih čini skupljima. No, kvantni detektori zahtijevaju hlađenje, što ih čini nepraktičnima u nekim primjenama. [12]

FPA detektor prima svo zračenje koje dolazi iz smjera nekog tijela, no da bismo odredili temperaturu površine, potrebno je utvrditi vlastitu emisiju mjerenog tijela. Dakle, detektor će primiti vlastitu emisiju mjerenog tijela, refleksiju okolnih izvora zračenja od površine mjerenog tijela, te zračenje koje emitira atmosfera (zrak) između tijela i kamere. Ukupno dolazno zračenje može se prikazati formulom:

$$W_{tot} = \varepsilon \cdot \tau \cdot W_{obj} + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot W_{amb} + (1 - \tau) \cdot W_{atm}, \quad (9)$$

gdje je ε emisijski faktor mjerenog objekta, τ propusnost atmosfere, W_{obj} vlastito zračenje objekta, W_{amb} reflektirano zračenje okoline od površine objekta te W_{atm} zračenje atmosfere.[12]

U formuli (9) uveden je pojam propusnosti atmosfere. Propusnost atmosfere je broj između 0 i 1, a računa se kao omjer intenziteta infracrvenog zračenja koji prolazi atmosferu u odnosu na početni intenzitet zračenja. Ova vrijednost ovisi o mnogo čimbenika, poput valne duljine zračenja, sastava atmosfere, atmosferskih uvjeta, duljine puta itd. [12] Na grafičkom prikazu koji slijedi vidljiva je ovisnost propusnosti atmosfere o valnoj duljini zračenja te koji spojevi apsorbiraju najviše infracrvenog zračenja (Sl. 1.5).



Sl. 1.5: Graf ovisnosti propusnosti atmosfere i valne duljine zračenja [12]

1.4. Primjene infracrvene termografije

Infracrvena termografija je vrlo rasprostranjena tehnologija te se ona koristi u različitim industrijama, djelatnostima ili u istraživačke svrhe. Česta primjena termografskih mjerenja je u poslovima održavanja opreme, kontroli kvalitete, dijagnostici problema i razvoju novih tehnologija. Aktivno se koristi u elektrotehnici, strojarstvu, građevinarstvu, medicini, biologiji, geologiji, u industrijama poput automobilske, petrokemijske, zrakoplovne, svemirske te uglavnom u svim većim postrojenjima koji toplinsku energiju koriste direktno, ili nastaje kao nusprodukt u radu strojeva.

1.4.1. Zgradarstvo

Infracrvena termografija u zgradarstvu se uglavnom koristi u svrhu analize i vizualizacije toplinskih gubitaka snimanih objekata (Sl. 1.6). Time se dolazi do važnih informacija o kvaliteti toplinske izolacije te o mogućim propustima u gradnji ili o mogućim oštećenjima izolacije. Također, infracrvenom termografijom mogu se identificirati mjesta propuštanja vlage (Sl. 1.7). Postupci mjerenja IC termografijom koriste se za procjenu energetske učinkovitosti objekta. [3]

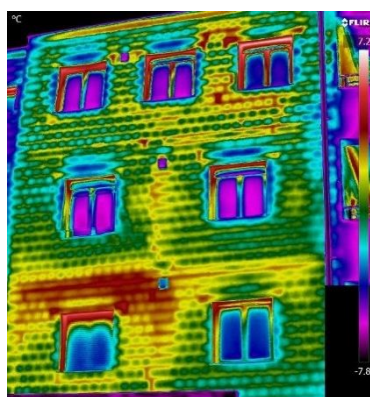
1.4.2. Procesna postrojenja

U procesnim postrojenjima tehnologija IC termografije se sve češće koristi u svrhu preventivnog održavanja postrojenja. Na taj je način potrebne popravke moguće dijagnosticirati i obaviti prije nastanka većih problema te se tako štedi novac i osigurava neprekidan rad pogona. U npr. petrokemijskoj industriji termografske se kamere koriste pri održavanju temperatura peći, upravlja se vatrostalnim gubitcima, detektiraju se propusti na

cijevima i otkrivaju se začepjenja (Sl. 1.8). U proizvodnji elektronike ova se tehnologija koristi za otkrivanje pregrijavanja pojedinih komponenti (Sl. 1.9), provjeru kvalitete lemljenja, otkrivanje kratkih spojeva, praćenje kvalitete hlađenja itd. [3]

1.4.3. Medicina

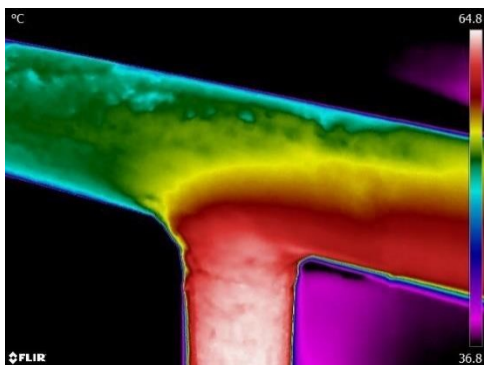
Infracrvena termografija u medicini se koristi za dijagnozu upalnih bolesti, bolesti krvnih žila (Sl. 1.10), otkrivanju zloćudnih tvorbi i patoloških procesa. Termografskim snimanjem tijela moguće je dobiti bitne informacije o prokrvljenosti snimanog tkiva, vlažnosti kože te staničnim aktivnostima u tkivu. [1]



Sl. 1.6: Gubitci topline na pročelju zgrade [13]



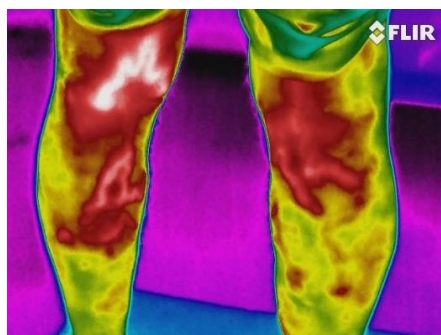
Sl. 1.7: Vlaga u zidovima [13]



Sl. 1.8: Otkrivanje začepljenosti cijevi [13]



Sl. 1.9: Otkrivanje pregrijavanja elektronike [12]



Sl. 1.10: Dijagnoza proširenih vena [13]

2. Adafruit MLX90640 IR Thermal Camera

Za potrebe ovog završnog rada korištene su dvije termalne kamere proizvođača *Adafruit*. Obje kamere koriste identične komponente, jedina razlika je u vidnim poljima kamera. Jedna kamera, koju proizvođač klasificira kao 'Tip A' (Sl. 2.1), sadrži leću s vidnim poljem od $100^{\circ} \times 75^{\circ}$, dok druga kamera, koja je klasificirana kao 'Tip B' (Sl. 2.2), sadrži leću s vidnim poljem od $55^{\circ} \times 35^{\circ}$. [14,15]



Sl. 2.1: Kamera tipa A [14]

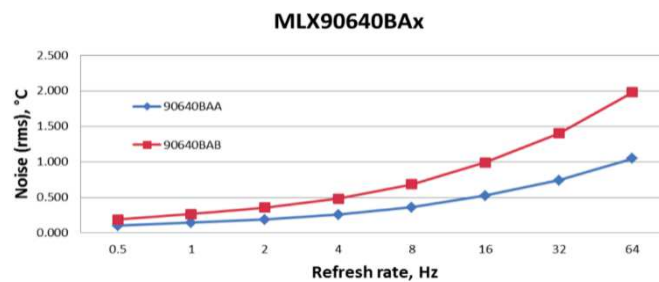


Sl. 2.2: Kamera tipa B [15]

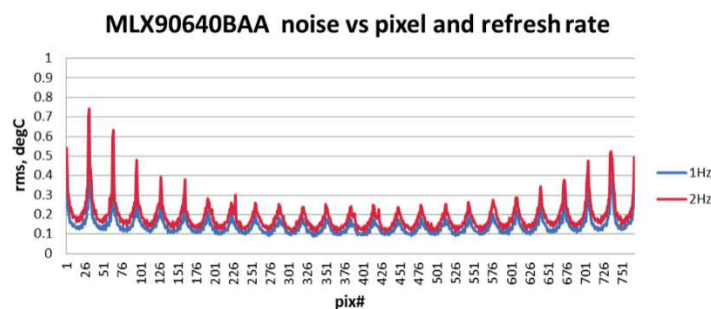
Središnja komponenta svake termalne kamere je infracrveni detektor. Kamere korištene u ovom radu koriste MLX90640 infracrvene detektore proizvođača *Melexis*. Ovaj detektor koristi termopilnu tehnologiju. Sastavljen je od 768 FIR (*far infrared*) termopilnih spojeva koji pomoću Seebeckovog efekta pretvaraju infracrveno zračenje u električni signal. Ova tehnologija u usporedbi s mikrobolometrima i kvantnim detektorima ima nižu osjetljivost, sporiju brzinu odziva, manji spektralni raspon te je osjetljivija na promjene temperature okoline. Prednosti termopilne tehnologije su njena znatno niža cijena od konkurentnih tehnologija, niska potrošnja i točnost u rasponu od $\pm 2-5^{\circ}\text{C}$. MLX90640 snima u rezoluciji 32×24 , što je dovoljno za brojne primjene u autoindustriji (npr. detekcija putnika u sjedalima), u industrijskim sistemima za automatizaciju te u potrošačkoj elektronici. [16]

Korištene kamere dolaze tvornički kalibrirane u kućištu tipa TO-39, što je industrijski standard. Detektor također dolazi s integriranim senzorom temperature čipa i senzorom ulaznog napona. Svi izmjereni podaci spremaju se u integriranu RAM (*Random Access Memory*) memoriju, te im se može pristupiti putem I²C sučelja. Radna temperatura kamera je u rasponu $-40^{\circ}\text{C} - 85^{\circ}\text{C}$, a temperature koje mogu mjeriti su u rasponu $-40^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$, uz točnost $\pm 2^{\circ}\text{C}$ u rasponu temperatura $0^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$. Nude programabilni *refresh rate* od 0,5 Hz do 64 Hz. [14,15] Kamere imaju NETD (*Noise equivalent temperature difference*)

od samo 0.1 °C, što znači da kamere mogu uz prisutnost šumova s dobrom pouzdanošću odrediti razlike u temperaturi od čak 0.1 °C uz *refresh rate* 1 Hz. Promjenom *refresh ratea* mijenja se i vrijednost šuma, što se može vidjeti na grafičkom prikazu u nastavku (Sl. 2.3). Također, vrijednost šuma nije jednaka za sve piksele. Pikseli uz rub termograma obično imaju veći šum zbog optičkih performansi leće na njezinim rubovima. Distribucija šuma po položajima piksela vidljiva je na grafičkom prikazu Sl. 2.4.



Sl. 2.3: Vrijednost šuma u odnosu na refresh rate [16]



Sl. 2.4: Vrijednost šuma u odnosu na položaj piksela [16]

MLX90640 nudi dva načina rada. *Measurement mode* nudi punu funkcionalnost termalne kamere te kao izlaz svoga mjerenja šalje točnu temperaturu objekta (kvantitativno mjerenje), dok *Image mode* ne odrađuje sve matematičke operacije i mjerenja, a za izlaz šalje podatke dovoljne za izradu termograma (kvalitativno mjerenje). *Image mode* je manje računalno zahtjevan od *Measurement* načina rada te je zato brži pa ga je moguće koristiti s mikrokontrolerima sa slabijim procesorima. Za potrebe završnog rada koristio sam *Measurement mode*, budući da je korišteni *Raspberry Pi 3B* dovoljno računalno snažan. [16]

U poglavlju 1.3 objašnjen je princip po kojem rade termografske kamere te je spomenuto da termografska kamera također mora prikupiti podatke o emisivnosti snimanog objekta te odrediti temperaturu okoline. U slučaju korištenih termalnih kamera, emisijski faktor je konstanta pohranjena u memoriji kamere i korisnik je može mijenjati. Po *defaultu* emisijski faktor postavljen je na 0,95. Temperatura okoline dobiva se uz pomoć integriranog

senzora za temperaturu čipa. Proizvođač je utvrdio da je temperatura okoline obično za 8 °C manja od temperature čipa, pa se iz tog razloga temperatura okoline računa formulom:

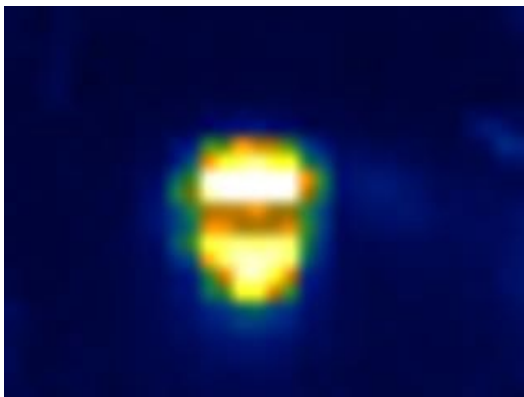
$$T_{okolina}[^{\circ}\text{C}] = T_{\text{čip}}[^{\circ}\text{C}] - 8^{\circ}\text{C} \quad (10)$$

Cjeloviti postupak koji korištene kamere koriste za izračun temperature nalazi se u dokumentu *MLX90640 32x24 IR Array Datasheet* [16] na službenoj web-stranici tvrtke *Melexis*.

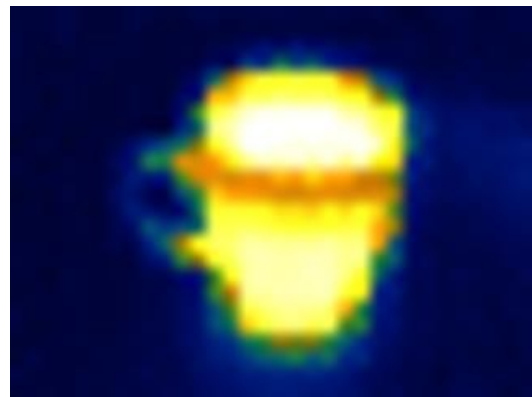
Slike priložene u nastavku prikazuju istu situaciju slikanu s tri različite kamere s iste pozicije. Prva slika je slikana mobitelom (Sl. 2.5), druga kamerom tipa A (Sl. 2.6), a treća kamerom tipa B (Sl. 2.7). U šalici se nalazi vruća voda, obje termalne kamere izmjerile su najveću temperaturu 55,5°C.



Sl. 2.5: Šalica slikana mobitelom



Sl. 2.6: Šalica slikana kamerom tipa A



Sl. 2.7: Šalica slikana kamerom tipa B

3. Korištene tehnologije

Odabir programskog jezika nije bio težak zadatak. Znao sam da ću pisati skriptu za detekciju objekata te da ću za taj problem koristiti biblioteku za računalni vid OpenCV. Odabir se tako sužava na programske jezike koji podržavaju OpenCV biblioteku; C/C++, Java, Python i MATLAB. Također, znao sam da ću za potrebe završnog rada koristiti prethodno spomenute kamere (Poglavlje 2), a njihov proizvođač *Adafruit* razvio je biblioteku za programski jezik Python koja pruža pojednostavljeno sučelje prema tim kamerama. Stoga sam odlučio da ću za pisanje skripti koristiti upravo programski jezik Python.

3.1. Python

Python je trenutno jedan od najpopularnijih programskih jezika na svijetu. Radi se o bogatom objektno orijentiranom jeziku sposobnom za razvoj najsloženijih aplikacija. Stvorio ga je Guido van Rossum te je predstavljen 1991. godine. U vrijeme pisanja ovog završnog rada, najnovija verzija je 3.11.3, a ja sam koristio verziju 3.11.2.. Python je specifičan po svojoj vrlo jednostavnoj i intuitivnoj sintaksi, što ga čini jednostavnim za učenje. Također, sintaksa Pythona tjera programera na pisanje urednog i dobro strukturiranog kôda, što čini skripte čitljivima i preglednima. [18]

Python je također vrlo svestran programski jezik, koristi se u područjima poput web developmenta, analizi podataka, strojnom učenju, računalnom vidu, umjetnoj inteligenciji, automatizaciji i brojnim drugim primjenama. Interkompatibilan je i dostupan na mnogim platformama, kao što su Windows, macOS, Linux i drugi, a ja sam ga koristio na inačici Linuxa za Raspberry Pi – Raspberry Pi OS. No, jedna od najvećih prednosti Pythona je njegov ogroman i vrlo aktivan *community*, što olakšava programerima rješavanje problema. Pythonov *community* razvio je velik broj kvalitetnih biblioteka, frameworka i različitih alata.[18] Budući da nudi vrlo kvalitetne biblioteke, odlučio sam neke od njih i koristiti, primjerice *numpy*, *Python Imaging Library* (PIL), *Matplotlib*, *OpenCV* i druge.

3.1.1. OpenCV library

Open Source Computer Vision Library (OpenCV) je *open-source* biblioteka za računalni vid i strojno učenje. OpenCV je razvijen s namjerom da stvori kvalitetne temelje

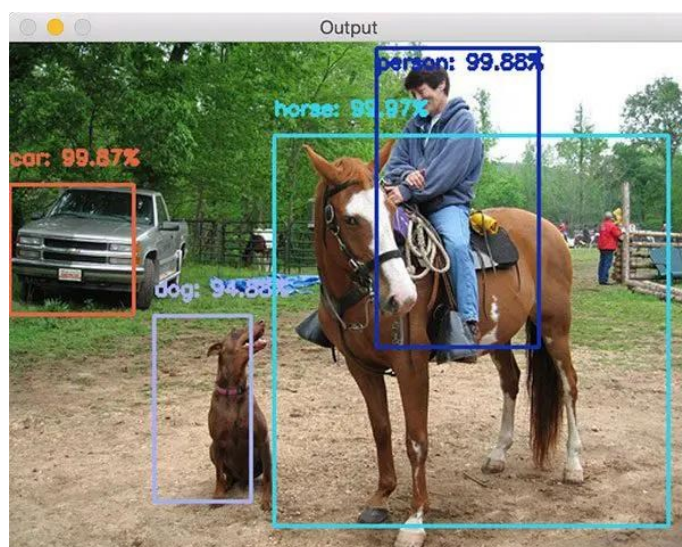
za komercijalnu primjenu računalnog vida te kako bi ubrzao integraciju i poboljšao kvalitetu rješenja računalnog vida u komercijalnim proizvodima. OpenCV biblioteka sadrži više od 2500 različitih algoritama te se široko koristi u mnogim područjima, kao što su virtualna i proširena stvarnost, obrada slika i videozapisa, praćenje i prepoznavanje objekata, prepoznavanje gesti itd. Biblioteka OpenCV napisana je u jeziku C++, a moguće ga je koristiti s programskim jezicima C/C++, Python, Java i MATLAB. Također, OpenCV podržava operacijske sustave Windows, macOS, Linux te čak i Android. [19] Primjer rada algoritma za detekciju i prepoznavanje objekata vidljiv je na slici u nastavku. (Sl. 3.1)

3.1.2. PIL library

Python Imaging Library (PIL) je popularna biblioteka koja Python kôdu dodaje razne funkcionalnosti obrade i manipulacije slika. Biblioteka nudi podršku za različite formate slika te omogućava konverziju iz jednog formata u drugi, pruža brz pristup pohranjenim podacima, nudi brojne funkcionalnosti za prikaz i ispis slika, za njihovu obradu te za statističku analizu slika. [20]

3.1.3. Matplotlib library

Matplotlib je popularna biblioteka za vizualizaciju podataka. Korisnicima pruža razne alate za kreiranje kvalitetnih grafova, dijagrama i figura. Stvorena je da bude jednako sposobna kao i MATLAB, uz mogućnost da se koristi Python te da je besplatna i *open-source*. Ova biblioteka je široko korištena u brojnim područjima znanosti, analizi podataka, obradi signala, strojnom učenju, u ekonomiji i financijskom sektoru itd. [21]



Sl. 3.1: Algoritam za detekciju i prepoznavanje objekata koji koristi OpenCV [22]

4. Skripta za detekciju objekata

Kompletan kôd ovog algoritma nalazi se u datoteci *photoRecognition.py* na GitHub repozitoriju završnog rada: https://github.com/MarioHosnjak/Zavrsni_Rad-2023.

4.1. Kratak opis skripte

Skripta za detekciju objekata koristi biblioteke *adafruit_mlx90640* i *OpenCV* za komunikaciju s termalnom kamerom iz 2. poglavlja i obradu termograma. Nakon što termalna kamera odredi vrijednosti temperatura svih 768 piksela, Python skripta stvara termogram u kojemu različite boje odgovaraju različitim temperaturama. Budući da je namjena ovih skripti termografsko mjerenje i analiza elektroničkih sustava na tiskanim pločicama, pretpostavlja se da će se čipovi zagrijavati više u odnosu na okolinu te da će se čipovi na termogramu pojavljivati kao usijani pravokutnici ili kvadrati. Iz tog razloga skripta koristi *OpenCV* biblioteku za pronalaženje kontura i prepoznavanje oblika. Također, program očitava maksimalnu temperaturu na području svake konture te označava tu točku na termogramu.

4.2. Algoritam po koracima

- 1 Definiraj način određivanja temperaturnog raspona
- 2 Stvori listu svih mogućih boja (gradijentno)
- 3 Prikupi temperaturna mjerenja kamere
- 4 Svakom mjerenju dodijeli boju s obzirom na izmjerenu temperaturu i definirani temperaturni raspon
- 5 Stvori sliku i napuni je pikselima(bojama iz koraka 4)
- 6 Pretvori sliku u crno-bijelu (*grayscale*)
- 7 Blago zamuti sliku (*blur*)
- 8 Pretvori sliku u binarnu crno-bijelu
- 9 Pronađi konture (oblike)
- 10 Prikaži na termogramu svaku pravilnu konturu(pravokutnik ili kvadrat)
- 11 Iteriraj po temperaturama unutar svake pravilne konture i pronajdi maksimalnu
- 12 Označi na termogramu mjesto maksimalne temperature
- 13 Ispiši u konzolu maksimalnu temperaturu za svaki objekt
- 14 Prikaži termogram

4.3. Detaljan opis skripte

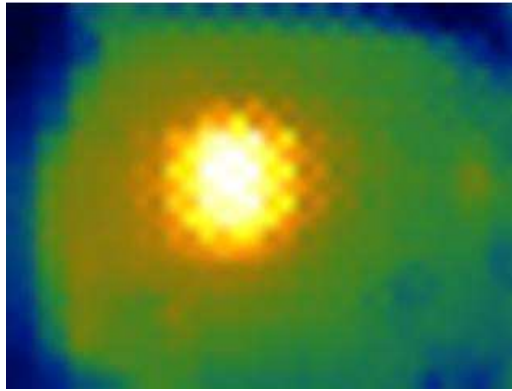
Skriptu ću opisati u dva dijela, u prvome dolazi do snimanja termalnom kamerom i generiranja termograma, dok u drugom dijelu skripta provodi detekciju objekata.

4.3.1. Snimanje termalnom kamerom i generiranje termograma

Na početku, potrebno je odrediti temperaturni raspon po kojemu će se određivati boje na termogramu tako što se postavlja varijabla `fixedMinMax` na `True` ili `False`. Za vrijednost `False` boje na termogramu bit će raspoređene u temperaturnom rasponu od minimalne izmjerene temperature, do maksimalne izmjerene temperature. Za vrijednost `True` boje termograma bit će raspoređene za temperaturni raspon od vrijednosti varijable `MINTEMP`, do vrijednosti varijable `MAXTEMP`. Nadalje, stvara se lista `heatmap` od 7 glavnih boja. Program će koristeći definirane pomoćne funkcije stvoriti novu listu sa `COLORDEPTH` boja, u kojoj će gradijentno biti povezane boje iz liste `heatmap`.

Nakon toga skripta kreće s prikupljanjem 768 temperaturnih mjerenja termalne kamere. Ako je varijabla `fixedMinMax` postavljenja na `False`, trebamo proći kroz sva temperaturna mjerenja i odrediti minimalnu i maksimalnu temperaturu. Nadalje, potrebno je iz liste temperaturnih mjerenja stvoriti listu boja (piksela). Različite temperature bit će obojene različitim bojama. Odabir boje za neku temperaturu ovisi o toj temperaturi, temperaturnom rasponu, te ukupnom broju boja `COLORDEPTH`. U kôdu tu funkcionalnost odrađuje funkcija `map_value` koja vraća index odabrane boje u listi svih boja (`colormap`).

Zatim pomoću biblioteke `PIL` stvaramo novu sliku te je punimo pikselima, tj. bojama koje su nastale iz temperaturnih vrijednosti termalne kamere. Termalnu sliku skaliramo faktorom `INTERPOLATE`, te je na kraju prikazujemo na ekranu i spremamo na disk. Slika u nastavku prikazuje termogram uređaja Raspberry Pi 3B, koji je nastao prema do sada objašnjenom algoritmu (Sl. 4.1).



Sl. 4.1: Termogram uređaja Raspberry Pi 3B

4.3.2. Detekcija objekata

U ovom dijelu skripte imamo na raspolaganju pripremljen termogram koji je spremljen na disk (Sl. 4.1). Stoga učitavamo termogram s diska i pretvaramo ga u crno-bijelu (*engl. grayscale*) sliku pozivajući funkciju biblioteke OpenCV `cvtColor` što je vidljivo na slici Sl. 4.2 u liniji 91. Nakon toga zamućujemo dobivenu crno-bijelu sliku OpenCV funkcijom `GaussianBlur` (Sl. 4.2, linija 92). Zatim tu zamućenu sliku propuštamo kroz još jednu funkciju OpenCV-a, radi se o funkciji `adaptiveThreshold`. Ova funkcija će vratiti binarnu crno-bijelu sliku, a do toga dolazi tako što uzima dijelove 65x65 piksela slike. Za svaki tako odabrani dio računa *threshold* vrijednost, vrijednosti piksela koji su veći od *threshold*-a bit će prikazani kao bijeli pikseli, a vrijednosti piksela koji su manji od *threshold*-a bit će prikazani kao crni pikseli. Nakon provedbe svih spomenutih funkcija, početni termogram sa slike Sl. 4.1 sada će izgledati kao na slici Sl. 4.3.

```

90  img = cv2.imread('./ir.jpg')
91  gray = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
92  blr = cv2.GaussianBlur(gray, (5, 5), 0)
93  thr = cv2.adaptiveThreshold(blr, 255, cv2.ADAPTIVE_THRESH_MEAN_C, cv2.THRESH_BINARY, 65, 17)
94  contours, hierarchy = cv2.findContours(thr, 1, 2)

```

Sl. 4.2: Isječak koda



Sl. 4.3: Termogram nakon `adaptiveThreshold` funkcije

Slika je sada napokon spremna za pronalaženje kontura, a to se postiže funkcijom `findContours` vidljivom na slici Sl. 4.2, linija 94. Nakon toga skripta iterira po pronađenim konturama te za svaku pravilnu konturu određuje je li pravokutnik ili kvadrat. Zatim se za svaku konturu određuje maksimalna vrijednost temperature unutar nje te se na termogramu prikazuju te pravilne konture i označuje se mjesto s najvećom temperaturom (bijela točka). Na kraju se u konzoli za svaku prepoznatu pravilnu konturu (objekt) ispisuje njena najveća izmjerena temperatura. Krajnji rezultat ovog algoritma prikazuju slike Sl. 4.4 i Sl. 4.5. te je vidljivo da je algoritam uspio prepoznati procesor uređaja Raspberry Pi 3B (*Square 1*) te mu izmjeriti temperaturu od 59 °C. Algoritam je također kao objekt prepoznao i cijelu tiskanu pločicu.



Sl. 4.4: Termogram s prepoznatim objektima

```
user@raspberrypi:~/Desktop/Zavrsni_Rad_Hosnjak/Zavrsni_Rad-2023 $ python3 photoRecognition.py
Mintemp = 32.934093441766606
Maxtemp = 59.12695726341036
Object: 1
Max temp for object 1 is 59.12695726341036°C x=140 y=140
Object: 2
Max temp for object 2 is 59.12695726341036°C x=140 y=140
```

Sl. 4.5: Ispis algoritma u konzoli

5. Skripta za kontinuirano mjerenje temperatura

Kompletan kôd ove skripte nalazi se u datoteci *video.py* na GitHub repozitoriju završnog rada: https://github.com/MarioHosnjak/Zavrсни_Rad-2023. U repozitoriju je objavljena i datoteka *realtime.py*, koja se od *video.py* razlikuje po tome što graf iscertava u stvarnom vremenu, dok *video.py* generira graf na kraju snimanja.

5.1. Kratak opis skripte

Skripta za kontinuirano mjerenje temperatura koristi biblioteku *adafruit_mlx90640* za komunikaciju s termalnom kamerom iz 2. poglavlja i biblioteku *Matplotlib* za grafičko prikazivanje izmjerenih temperaturnih vrijednosti. Kroz petlju neprestano čita podatke s kamere 5 puta u sekundi, obrađuje ih i prikazuje termalnu sliku u stvarnom vremenu. Ova skripta stvara termogram na identičan način kao i prethodno objašnjena skripta. Također, maksimalne temperature mjerenja spremaju se u CSV datoteku te se prikazuje grafikon maksimalnih izmjerenih temperatura tijekom vremena snimanja (Sl. 5.1).

5.2. Algoritam po koracima

```
1 Definiraj način određivanja temperaturnog raspona
2 Stvori listu svih mogućih boja (gradijentno)
3 Uđi u beskonačnu petlju
4 Prikupi temperaturna mjerenja kamere
5 Odredi maksimalnu izmjerenu temperaturu i svaku petu spremi
  u listu
6 Svakom mjerenju dodijeli boju s obzirom na izmjerenu
  temperaturu i definirani temperaturni raspon
7 Stvori sliku i napuni je pikselima(bojama iz koraka 6)
8 Prikaži termalnu sliku
9 Vrti se u beskonačnoj petlji sve do korisničkog prekida
  KeyboardInterrupt-om
10 Otvori CSV datoteku i upiši vrijednosti iz liste
11 Stvori listu vrijednosti za x-os grafikona
12 Stvori grafikon i napuni ga vrijednostima
13 Prikaži grafikon
```

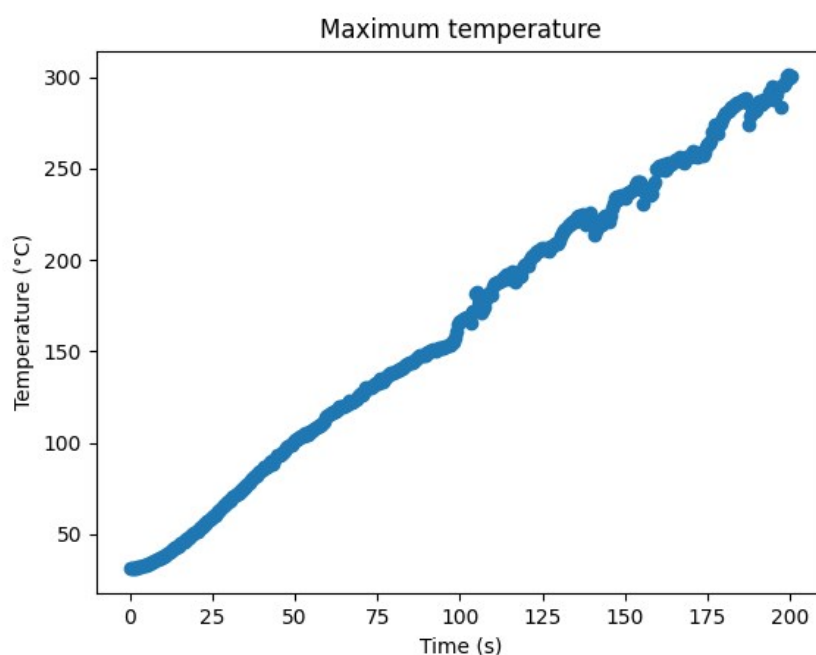
5.3. Detaljan opis skripte

Na početku, kao i kod prethodne skripte, potrebno je odrediti temperaturni raspon po kojemu će se određivati boje na termogramu postavljanjem varijable `fixedMinMax` na `True` ili `False`. Za vrijednost `False` boje na termogramu bit će raspoređene u temperaturnom rasponu od minimalne izmjerene temperature, do maksimalne izmjerene temperature. Za vrijednost `True` boje termograma bit će raspoređene za temperaturni raspon od vrijednosti varijable `MINTEMP`, do vrijednosti varijable `MAXTEMP`. Nadalje, analogno prethodnoj skripti, stvara se lista `heatmap` od 7 glavnih boja. Program će koristeći definirane pomoćne funkcije stvoriti novu listu sa `COLORDEPTH` boja, u kojoj će gradijentno biti povezane boje iz liste `heatmap`.

Nakon toga skripta ulazi prvo u `try` blok, a onda i u beskonačnu petlju, budući da je cilj kontinuirano mjeriti temperature i prikazivati termograme kao videozapis. Beskonačna petlja će se izvoditi sve dok korisnik ne izazove *`KeyboardInterrupt`* exception. Skripta prikuplja 768 termalnih mjerenja te iteracijom po mjerenjima dolazi do maksimalne izmjerene temperature. Program snima 5 puta u sekundi, što je puno informacija. Iz tog razloga u listu maksimalnih temperatura spremaju se maksimalne temperature svakog 5. mjerenja, što na kraju znači da spremamo dvije maksimalne temperature u sekundi. Nadalje, potrebno je iz liste temperaturnih mjerenja stvoriti listu boja (piksela), za što se opet koristi identičan postupak kao i u prethodnom algoritmu. Dakle, koristi se pomoćna funkcija `map_value` kojoj se predaju temperatura trenutnog zapisa, temperaturni raspon i ukupan broj boja `COLORDEPTH`.

Nakon što smo stvorili listu boja, tj. piksela, tu listu koristimo za stvaranje termalne slike pomoću biblioteke `PIL` te je skaliramo faktorom `INTERPOLATE`. Termogrami se u ovoj skripti prikazuju pomoću `OpenCV` biblioteke, budući da nam ona omogućava da prikazujemo slike jednu za drugom u istom prozoru. Ovaj će se postupak ponavljati sve do *`KeyboardInterrupt`*-a.

Kada dođe do *KeyboardInterrupt*-a, otvara se CSV datoteka i u nju se spremaju sve vrijednosti iz liste maksimalnih temperatura. Nakon toga stvara se i lista vrijednosti koja će u grafikonu predstavljati x-os, tj. vremensku os. Nadalje stvara se grafikon i popunjava vrijednostima te se na kraju i prikazuje. Slika Sl. 5.1 prikazuje grafički prikaz koji je nastao termografskim snimanjem lemilice od priključenja u struju. Iz grafa je vidljiv linearan rast temperature lemilice te da je lemilici trebalo 200 sekundi da se zagrije na temperaturu 300°C. Također se je vidljivo da termalna kamera nakon 150 °C počinje gubiti svoju preciznost.



Sl. 5.1: Graf promjene maksimalne temperature lemilice

Zaključak

Termalne kamere postale su pouzdan i za mnoge nezamjenjiv način mjerenja temperatura objekata. Specifične su po tome što osim mjerenja temperatura pružaju i informaciju o raspodjeli topline na površini mjerenog tijela te po tome što dobivena mjerenja prikazuju u obliku lako čitljivih i intuitivnih termalnih slika (termograma). Termogrami u sebi sadrže znatno više informacija nego što bi ih prikupile klasične kontaktne mjerne tehnike poput termoparova i toplinski osjetljivih otpornika. Također, termalne kamere su dostigle vrlo visoku razinu preciznosti, pa je moguće pronaći kamere koje snimaju s preciznošću do na decimalu stupnja. No, za preciznost i praktičnost termalnih kamera često je potrebno izdvojiti veće iznose novaca, što je mnogima neisplativo.

Budući da je rezultat mjerenja termalnih kamera slika, moguće je razviti automatizirane sustave koji će kontinuiranom analizom kontrolirati temperaturne vrijednosti mjerenih objekata, dinamički raspoznavati situacije i prikladno reagirati, provoditi analizu rada i učinkovitosti pojedinih strojeva i za brojne druge specijalizirane primjene.

U ovom je radu dokazano da čak i one jeftinije termalne kamere mogu pružiti iznenađujuće precizne rezultate, dovoljno dobre za brojne komercijalne svrhe, a ne samo za zabavu tehnoloških entuzijasta. Također, kontinuiranim razvojem tehnologije infracrvenih termalnih kamera vidljiv je trend smanjenja njihovih cijena, pa je za očekivati da će njihova uporaba i u budućnosti biti sve zastupljenija.

Sljedeći korak u razvoju alata iz ovog završnog rada bio bi njihovo spajanje u alat koji bi u realnom vremenu snimao objekte, raspoznavao ih te grafički prikazivao temperaturna mjerenja za detektirane objekte. Smatram da za takav alat nije dovoljna računalna snaga korištenog računala Raspberry Pi 3B, već bi se trebalo posegnuti za nekim snažnijim rješenjem. Iako su korištene kamere pružale dovoljno dobre rezultate po pitanju preciznosti izmjerenih temperatura, njihova rezolucija od 32x24 piksela nije dovoljno visoka za ozbiljnije primjene u području analize termograma računalnim vidom.

Literatura

- [1] termografija. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 1. lipnja 2023. Poveznica: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=60974>
- [2] Petrović, K., Bolf, N. *Mjerna i regulacijska tehnika*. Kemija u industriji, vol 65., br 1-2, (2016.), str. 110-113.
- [3] Petrović, K., Bolf, N. *Mjerna i regulacijska tehnika*. Kemija u industriji, vol 65., br 3-4, (2016.), str. 228-231.
- [4] Trout J., *What is Infrared Thermography*, ReliablePlant – Noria Corporation. Pristupljeno 1. lipnja 2023., Poveznica: <https://www.reliableplant.com/infrared-thermography-31572>
- [5] Kulišić, P. *Mehanika i toplina*, IX. izdanje. Zagreb: Školska knjiga 2005.
- [6] *Heat radiation*, StudySmarter. Pristupljeno 1. lipnja 2023., Poveznica: <https://www.studysmarter.co.uk/explanations/physics/thermodynamics/heat-radiation/>
- [7] Andrassy M., Boras I., Švaić S., *Osnove termografije s primjenom*, Zagreb: Kigen srpanj 2008.
- [8] *Svjetlost*, Wikipedia, (2022, listopad). Pristupljeno 2. lipnja 2023. Poveznica: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/30/EM_spectrumrevised.png/1200px-EM_spectrumrevised.png
- [9] infracrveno zračenje. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 2. lipnja 2023. Poveznica: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=27417>
- [10] crno tijelo. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 2. lipnja 2023. Poveznica: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=12813>
- [11] *Hole in Cavity as Blackbody*, Wikimedia, (2007, studeni). Pristupljeno 2. lipnja 2023. Poveznica: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ef/Hole_in_Cavity_as_Blackbody.png
- [12] Jacobs K., Lucier R., Overstreet R., *Improving Electronic Design and Testing with Infrared Imaging*, Wilsonville: FLIR Systems 2021.
- [13] *Naša galerija IC slika*, Kostelgrad – MM Studio. Pristupljeno: 4.6.2023. Poveznica: <https://kostelgrad.hr/our-portfolio/>
- [14] *Adafruit MLX90640 24x32 IR Thermal Camera Breakout – 110 Degree FOV*, Adafruit, Pristupljeno 4.6.2023. Poveznica: <https://www.adafruit.com/product/4469>
- [15] *Adafruit MLX90640 IR Thermal Camera Breakout – 55 Degree*, Adafruit, Pristupljeno 4.6.2023. Poveznica: <https://www.adafruit.com/product/4407>
- [16] *MLX90640 32x24 IR Array Datasheet*, 12. izdanje, izdala tvrtka Melexis (prosinac 2019.)

- [17] *Far infrared thermal sensor array (32x24 RES)*, Melexis, Pristupljeno 4.6.2023., Poveznica: <https://www.melexis.com/en/product/MLX90640/Far-Infrared-Thermal-Sensor-Array>
- [18] Kalafatić, Z., *Skriptni jezici*, Materijali za predavanja, FER Zagreb: 2012
- [19] *About OpenCV*, OpenCV, Pristupljeno: 5.6.2023., Poveznica: <https://opencv.org/about/>
- [20] *Pillow (PIL fork) 9.5.0 documentation*, Pillow, Pristupljeno: 5.6.2023., Poveznica: <https://pillow.readthedocs.io/en/stable/>
- [21] *Matplotlib 3.7.1 documentation*, Matplotlib, Pristupljeno: 5.6.2023., Poveznica: <https://matplotlib.org/stable/index.html>
- [22] Rosebrock, A., *Object detection with deep learning and OpenCV*, pyimagesearch, (2017, rujan), Pristupljeno 5.6.2023., Poveznica: <https://pyimagesearch.com/2017/09/11/object-detection-with-deep-learning-and-opencv/>

Sažetak

Analiza temperaturnih profila elektroničkih sustava na tiskanim pločicama na temelju analize slika dobivenih s termalnim kamerama

Termografija je postupak beskontaktnog mjerenja temperature te njezine raspodjele na površini mjerenog tijela korištenjem infracrvenih termalnih kamera. Termalne kamere mjere intenzitet infracrvenog elektromagnetskog zračenja kojeg emitiraju svi objekti. Često se koriste u industriji i u istraživačke svrhe zbog svoje preciznosti i praktičnosti. Cilj ovog rada bio je razvoj alata koji će pružati funkcionalnost mjerenja i analize temperaturnih profila elektroničkih sustava na tiskanim pločicama, koristeći kamere nižeg cjenovnog ranga *Adafruit MLX90640*. Razvijene su dvije programske skripte, jedna za detekciju objekata, tj. ugrijanih čipova i druga za kontinuirano mjerenje temperatura i grafički prikaz mjerenja. Skripte su pisane u programskom jeziku Python, te je korištena biblioteka za računalni vid OpenCV.

Ključne riječi: Termografija, termalna kamera, infracrveno zračenje, analiza termograma, računalni vid, OpenCV, temperaturni profili elektronike, Adafruit, MLX90640

Summary

Analysis of temperature profiles of electronic systems on printed circuit boards based on the analysis of images obtained with thermal cameras

Thermography is a non-contact method of measuring temperature and its distribution on the surface of a measured object using infrared thermal cameras. Thermal cameras measure the intensity of infrared electromagnetic radiation emitted by all objects. They are often used in industry and research due to their accuracy and convenience. The aim of this study was to develop tools which provide functionality for measuring and analyzing temperature profiles of electronic systems on printed circuit boards using low-cost *Adafruit MLX90640* thermal cameras. Two software scripts were developed, one for object detection, i.e., heated chips, and the other for continuous temperature measurement and graphical representation of the measurements. The scripts were written in the Python programming language, and the OpenCV computer vision library was used.

Keywords: Thermography, thermal camera, infrared radiation, thermogram analysis, computer vision, OpenCV, temperature profiles of electronics, Adafruit, MLX90640

Privitak

Shema spajanja Raspberry Pi 3B i termalne kamere Adafruit MLX90640

