

Primerjava termovizijskih kamer za merjenje telesne temperature pri ljudeh

Vid Mlačnik¹, Igor Pušnik¹

¹Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana

E-pošta: vid.mlacnik@gmail.com, igor.pusnik@fe.uni-lj.si

Comparison of thermal imagers for measurement of human body temperature

Abstract

In this paper, application of uncooled thermal imaging for human body temperature screening is evaluated in terms of accuracy and reliability. Accuracy of thermal imaging and associated mathematical model is analyzed and assessed for commercially available products, taking into account both the measurement instrument and measured subject.

Results of accuracy analysis, gathered to the extent of available data, are added to common accuracy of the core body temperature measurement and assessment process. Theoretical combined uncertainty of the measurement is considerably higher than required by medical profession for fever screening, especially before calibrations were carried out.

1 Uvod

Že od izbruha SARSa leta 2002, predvsem pa med aktualno Covid-19 pandemijo se na trgu pojavlja množica novih izdelkov za omejevanje širjenja nalezljivih bolezni z uporabo termovizijskih kamer. Takšne rešitve se predvidoma uporabljajo na mestih množičnih vstopov v npr. tovarne, letališča, trgovine, zdravstvene ustanove, itd, kjer se dobro odražajo prednosti tovrstnih izdelkov, to so hitrost meritve, samodejen zajem in obdelava meritev ter brezkontaktno delovanje termovizije. Problem brezkontaktnega merjenja pa vsekakor predstavlja točnosti in negotovost meritve, ki je teoretično višja kot pri kontaktnih metodah merjenja, kar močno pogojuje uporabnost in zanesljivost tovrstnih inštrumentov.

V praksi med nakupom pri večini izdelkov kupca pričakajo enake, optimistične trditve o točnosti meritev, razlike pa se opazijo šele po natančnem preskusu izdelka z laboratorijsko opremo.

Natančnost in točnost tehnologije brezkontaktnega merjenja telesne temperature je odvisna od mnogih vplivnih veličin, vsaka od njih pa v neki meri prispeva k končnemu rezultatu. Za ovrednotenje točnosti merilnega sistema je pomembno ugotoviti vse vplivne veličine in preveriti njihov vpliv na negotovost končnega rezultata. Pri tem je vredno poudariti, da velik doprinos k negotovosti meritve predstavlja slabo poznavanje lastnosti človeka.

Da bi preverili točnost tehnologij brezkontaktnega merjenja telesne temperature z uporabo termovizije, smo v Laboratoriju za metrologijo in kakovost Fakultete za elektrotehniko UL, kot nosilcu nacionalnega etalona za termodinamično temperaturo izvedli ovrednotenje nekaj izdelkov različnih cenovnih razredov, merilne rezultate pa smo ovrednotili in primerjali.

2 Fizikalni model merjenja

Idealno črno telo s temperaturo nad 0 K v skladu s Stefan-Boltzmannovim zakonom oddaja toplotno sevanje sorazmerno četrti potenci absolutne temperature objekta. Dejanski tok sevanja toplotne energije nekega sivega telesa je pogojen z emisivnostjo površine tega objekta, torej je dejanski sevalni tok za faktor emisivnosti ϵ nižji od sevanja idealnega črnega telesa pri enaki temperaturi in spektralnih ter položajnih pogojih. Na poti proti merilnemu inštrumentu se izsevanemu signalu lahko pridruži tudi odbiti signal (enačba 1), kot posledica vpadnih signalov zaradi odbojnosti objektov v okolici. Odbojnost se običajno preračuna iz izmerjenih in vnesenih parametrov okolice (emisivnost, temperatura ambienta, vlaga, idr.), ki je predpostavljeno homogena.

$$S_{vir} = \epsilon \cdot S_{obj} + (1 - \epsilon) \cdot S_{amb} \quad (1)$$

Odbiti signal je odboj sevanja objektov iz okolice, ki se pri odboju popolno ali spektralno difuzno odbije od opazovanega objekta z $(1 - \epsilon)$ vpadne jakosti.

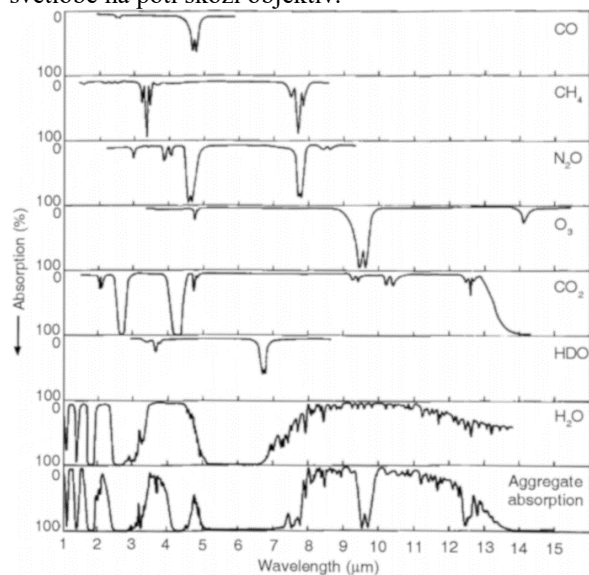
Na prenosni poti nastopa atmosfera, ki opisano sevanje vzdolž prepotovane razdalje običajno filtrira. Zrak zaduši določene valovne dolžine, ki so specifične za nastopajoče pline in vodno paro. Absorpcijo atmosfere vzdolž določene poti imenujemo atmosfersko okno, vidno na sliki 1, lastnost prepuščanja sevanja pa transmisivnost τ , opisano s skalarjem med 0 in 1 (enačba 2).

Kot polprozoren medij lahko obravnavamo prenosno pot od merjenega objekta do senzorja, kar zajema zrak in lečo.

$$S_{kamera} = \tau_{prenosna_pot} \cdot S_{vir} \quad (2)$$

Signal po prehodu skozi zrak preko leče termovizijske kamere vpade na senzor in mu preda toploto. Na vpadlo sevanje na senzor vpliva še popačitev na leči - tako geometrijska popačenja, kot absorpcija sevanja, pa tudi difuzija in nepravilnosti ostrenja zaradi širokega razpona

valovnih dolžin, ki različno vpliva na lomne kote IR svetlobe na poti skozi objektiv.



Slika 1: Absorpcijski spekter atmosfere

Opisano sevanje v merilnem instrumentu vpade na senzor toplote. Najpogostejše implementirani nehlajeni senzor toplote je mikrobolometer, čigar slikovni elementi so osnovani na substratu s temperaturno odvisno upornostjo. Temperatura slikovnega elementa se spreminja glede na vpadlo in izsevano toplotno energijo, ta pa je odvisna od sevanja ospredja in ozadja senzorja. Pri znanih parametrih sevanja ozadja je mogoče iz obnašanja slikovnih elementov izračunati vpadlo sevanje ospredja meritev za izračun sevalne temperature merjenca.

3 Merjenec in biologija

Za kvalitetno odločanje v zdravstvu kot enega izmed parametrov potrebujemo zanesljivo meritev telesne temperature. V zdravstvu je zaželena negotovost temperaturnih instrumentov nižja ali enaka $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, kar je z uporabo termovizije praktično nemogoče.

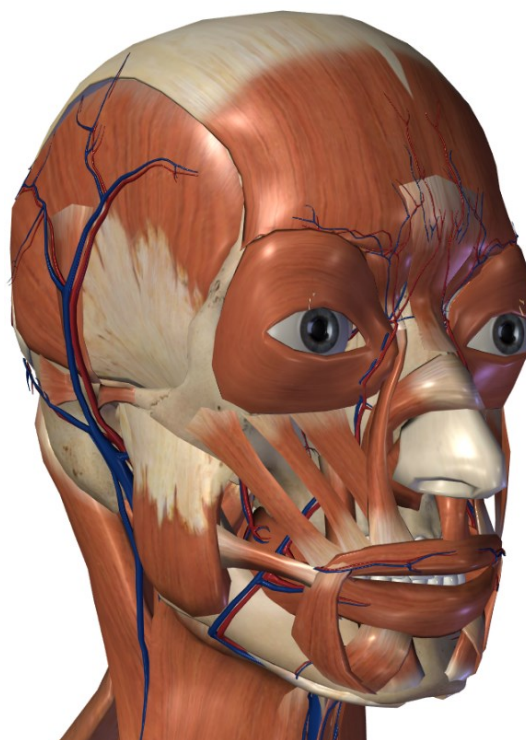
Površinska temperatura kože je pri ljudeh močno nehomogena. S stališča preprostosti uporabe so najprimernejša mesta merjenja odkriti deli kože kot sta obraz in vrat. Temperatura na mestu meritve mora biti čim manj odvisna od temperature ambienta in delovanja človeške termo-regulacije, kar pomeni da je primerno merilno mesto dobro prekravljeno in slabo toplotno izolirano. V okolici obrazne in temporalne arterije je najprimernejše merilno mesto v bližini notranjih očesnih kotov (slika 2), saj je tam temperatura najmanj pogojena s temperaturo okolice, poleg tega pa tam skladno z željami izmerimo najvišjo temperaturo. Zanesljivost vseh merilnih mest je poleg tega pogojena tudi z variabilnostjo postavitve žil pri merjenih osebkih [1].

Vsem merilnim mestom je skupno, da ne odražajo prave notranje telesne temperature. K temu problemu pristopimo s preračunom na predvideno telesno

temperaturo, za kar uporabimo matematični model, ki so ga Ng, Kawb in Chang [2] pridobili z regresijo linearne funkcije med izmerjeno telesno (izmerjeno z ušesnim termometrom) in površinsko sevalno temperaturo, izmerjeno s termovizijo. Model je prikazan v tabeli 1.

Tabela 1: Korelacija med merjeno površinsko in preračunano notranjo temperaturo pri ljudeh, pridobljena z regresijo linearne funkcije [2].

Območje	Oči (pravokotnik)
Neodvisna spr. (X)	Telesna temperatura
Odvisna spr. (Y)	Maks. meritev območja oči
Velikost vzorca	310 oseb
Korelac. koef. (r^2)	0,5509
St. odklon modela	$0,8292\text{ }^{\circ}\text{C}$
Korelacijska funkcija	$X = 1,1752 \cdot Y - 4,9327$



Slika 2: Običajna postavitev obraznih žil

4 Določitev merilnih napak in negotovosti

Na prenosni poti nastopa mnogo predpostavljenih vrednosti, ki lahko v primeru odstopanj prispevajo k napaki meritve telesne temperature.

Prispevke k napaki zaradi geometrijskih popačenj slike se praviloma odpravi s kalibracijo kamere po izdelavi instrumenta. Preostanek negotovosti v samem merilnem instrumentu obravnavamo kot celoto in jo statistično izmerimo za dve lastnosti – homogenost slike in ponovljivost meritev kamere.

Ključno vlogo za jakost izmerjenega sevanja igrajo emisivnost kože, temperatura okolice v odsevu in temperatura ter sestava zraka na prenosni poti. Ti parametri so delno predvidljivi, odstopanja pa prispevajo

k napaki meritve. Idealno želimo v prostoru suh zrak in čim krajšo prenosno pot med merjencem in merilnim inštrumentom ter ozadje homogene temperature in emisivnosti.

Ne glede na atmosferske vplive pa oddaljenost merjenca vpliva na prostorsko ločljivost meritev oz. velikost ciljnega področja na sliki. Pomembno je, da merjeno področje zajema dovolj slikovnih elementov, da se pravilno izloči vpliv prostorske diskretizacije in prostorskega prehodnega pojava na toplotni sliki (t.i. size of source effect). Idealno merjenje se izvaja v fokusni ravnini termovizijske kamere, zaradi velikosti na sliki pa je zaželeno, da je oddaljenost merjenca čim nižja.

Na izmerjeno sevanje zaradi nehomogene smerne porazdelitve izsevane toplote vpliva tudi kot merjenja – idealno merimo površino pod pravim kotom, odstopanja od tega kota pa dodatno doprinesejo k napaki matematičnega modela pri obdelavi vpadle energije [3].

Celotno negotovost merilnega sistema izračunamo po enačbi (3), pri čemer upoštevamo občutljivostne koeficiente c_i in negotovost vplivnih veličin u_i .

$$u_{celotna} = \sqrt{\sum_i (c_i \cdot u_i)^2} \quad (3)$$

Pomembno je poudariti, da izračunani podatki veljajo pri pravilni uporabi in popolni izločitvi vplivnih dejavnikov, denimo velikosti merjenca na sliki, vpliva prostorskega prehodnega pojava ali neizostrenosti slike, kota na normalo površine ...

5 Analiza termovizijskih kamer

Preskusili smo štiri termovizijske sisteme za presegalno merjenje ljudi s povišano telesno temperaturo. Vsem izdelkom je bila skupna navedena negotovost $\pm 0,3$ °C pri merjenju telesne temperature. Prav tako jih združuje način delovanja s samodejno zaznavo obrazov na vidni sliki s pomočjo umetne inteligence, pri čemer izstopa izdelek proizvajalca Dahua, ki omogoča avtomatsko zaznavo obrazov in proženje meritev tudi ob odsotnosti svetlobe na sliki vidnih spektrov.

Tabela 2: seznam ovrednotenih izdelkov

* vrednost je ocenjena na podlagi prikazane slike, uradni podatek ni znan

Proizvajalec (in model) toplotne kamere	iFOV (mRad)	IR ločljivost
YBFace		8x1 (ocena)
Hengtong	3,8	32x32
Nuctech	1,7	384x288
Dahua TPC-BF5421-T	1,3	400x300
FLUKE TiS45	3,9	160x120
FLIR T650sc	1,3	640x480

Cenovno najugodnejša izdelka proizvajalcev Hengtong optic-electric in YBFace sta osnovana na android sistemu z dodano toplotno kamero zelo nizke ločljivosti. Sistema sta namenjena vhodni identifikaciji zaposlenih s sočasnim brezkontaktnim merjenjem

temperature. Ločljivosti termalnih kamer sta pri obeh izdelkih nizki, vidno polje pa zajema le del polja vidne slike. Edina dostopna meritev je meritev temperature obraza, ki je zaokrožena na desetinko stopinje. S statističnim ponavljanjem smo preverili raztros meritev pri merjenju kalibracijskega telesa.

Podjetji Nuctech in Dahua ponujata sisteme za video nadzor infrastrukture. Merilna sistema se dobavita z zunanjim referenčnim virom IR sevanja. Prednost tovrstnih izvedb je izboljšana stabilnost meritev, saj referenčna meritev zniža negotovost meritve temperature zaradi lezenja in nehomogenosti temperature ozadja toplotnega senzorja v merilni napravi. Sistema na osnovi prepoznanih obrazov na vidni sliki izmerita temperaturo pripadajoče regije na toplotni sliki. Zaradi nedostopnosti izmerjenih vrednosti posameznih slikovnih elementov smo lahko ovrednotili le zunanji vir sevanja.

Za primerjavo smo ovrednotili še dve splošno-namenski termovizijski kameri (slika 3).



Slika 3: splošno-namenski kameri proizvajalcev FLUKE (levo) in FLIR (desno)

Kameri nizkega (FLUKE) in visokega (FLIR) cenovnega ranga sta namenjena industrijski rabi, obe pa podpirata izvoz meritev za nadaljnjo obdelavo.

6 Primerjava termovizijskih kamer

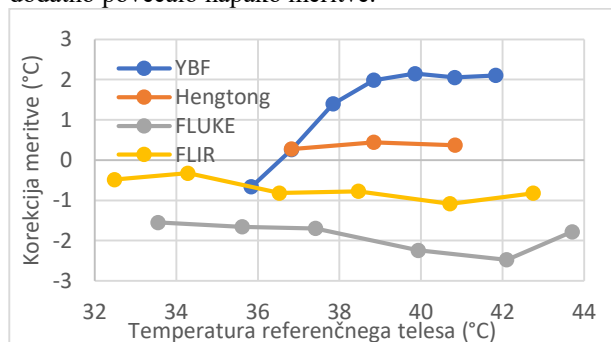
Laboratorijska oprema je temperaturno umerjena in sledljiva po ITS-90 temperaturni lestvici do mednarodnih etalonov. Pri ovrednotenju kamer je bilo kot vir referenčne temperature uporabljeno črno telo v vodni kopeli s izračunano emisivnostjo 0,998 in razširjeno negotovostjo 0,2 °C.

Cenovno najugodnejši napravi proizvajalcev YBFace in Hengtong sta pri ovrednotenju izkazali nenavadno funkcijo. Sistema pri meritvah pod neznano mejno vrednostjo prikažeta na videz naključno vrednost z drugačnim raztrosom in nespremenljivim povprečjem. Vpliv naključnih vrednosti je viden v grafu korekcij naprav (slika 4) pri sistemu proizvajalca YBFace, kjer korekcija nenadno pada sorazmerno referenčni temperaturi kalibracijske naprave. Pri izračunu negotovosti so bile meritve te kamere pri kalibracijskih točkah pod 40 °C zavržene kot neveljavne.

Tabela 3: korekcija kamer v ciljnem območju glede na referenčno temperaturo telesa in razširjena negotovost kamer pri merjenju površinske in telesne temperature ljudi.

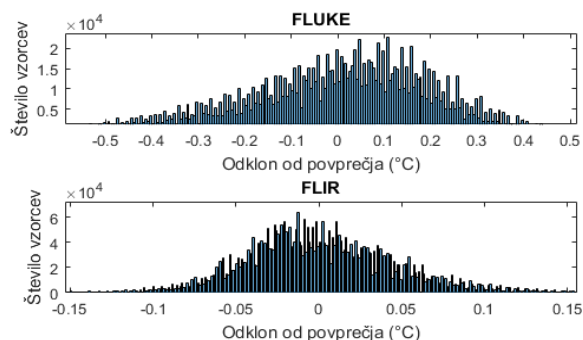
Temp. merjenja (°C)	Korekcija (°C)			
	YBF	Heng-tong	FLUKE	FLIR
33			-1,5	-0,4
34			-1,6	-0,3
35			-1,6	-0,5
36	-0,5		-1,7	-0,7
37	0,5	0,3	-1,7	-0,8
38	1,5	0,4	-1,8	-0,8
39	2,0	0,4	-2,0	-0,8
40	2,1	0,4	-2,2	-1,0
41	2,1	0,4	-2,4	-1,0
42	2,1		-2,5	-0,9
$U_{koža,k=2}$	0,3	0,6	0,9	0,6
$U_{k=2}$	1,9	2,0	2,1	2,0

Vse merjene kamere smo ovrednotili v laboratorijskih pogojih. Za izmerjene negotovosti se upošteva, da je kamera umerjena in brez sistematskega pogreška. Nobena od kamer ni bila primerno predhodno kalibrirana (slika 4), kar bi pri uporabi po navodilih proizvajalca dodatno povečalo napako meritve.



Slika 4: korekcija ovrednotenih naprav glede na referenčno temperaturo

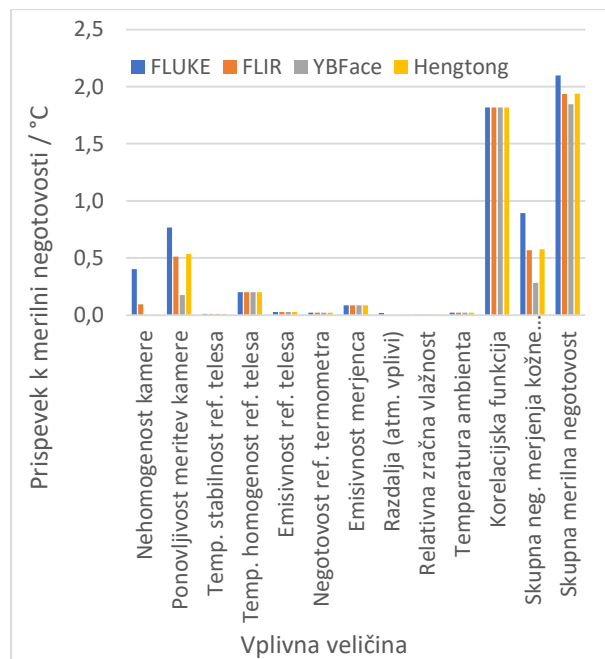
Homogenost celotnega kadra kamere smo ovrednotili z večjim referenčnim črnim telesom v vodni kopeli (slika 5).



Slika 5: primerjava histogramov odstopanj od povprečja slike pri merjenju

Slika 6 prikazuje utežene posamezne doprinose negotovosti k skupni merilni negotovosti. Pri tem je

pomembno izpostaviti, da ponovljivost meritev pri izdelku YBF in Hengtong sočasno odraža tudi nehomogenost kamer. Negotovost korelacijske funkcije je predvidena skupna negotovost pri merjenju in oceni notranje telesne temperature merjenih osebkov. Pri interpretaciji je pomembno upoštevati, da so v negotovosti korelacijske funkcije upoštevani tudi podatki o negotovosti uporabljene termovizijske kamere, ne pa tudi negotovost ušesnega termometra.



Slika 6: Posamezni doprinosi ($c_i \cdot u_i$) k merilni negotovosti sistema merjenja in ocene telesne temperature

7 Zaključek

Želena merilna točnost medicinske stroke pri diagnostiki povišane telesne temperature velja za $\pm 0,3$ °C. V procesu ovrednotenja smo ugotovili dejanske negotovosti inštrumentov, ki večinoma presegajo želeno negotovost že pri merjenju temperature kože, sploh pa jo presegajo ob upoštevanju negotovosti korelacijske funkcije za izračun telesne temperature iz najvišje temperature očesnega področja.

Literatura

- [1] G. Dickson et al., "The variability of the facial artery in its branching pattern and termination point and its relevance in craniofacial surgery," European Journal of Plastic Surgery, vol. 37, str. 1-8, september 2013.
- [2] E. Y. K. Ng, G. J. L. Kaw in W. M. Chang "Analysis of IR thermal imager for mass blind fever screening," Microvascular research, vol. 68, št. 2, str. 104-109, September 2004.
- [3] R. Vardasca, A. R. Marques, J. Diz, A. Seixas, J. Mendes, E. F. J. Ring, "The influence of angles and distance on assessing inner-canthi of the eye skin temperature," Thermology international, vol. 27, št. 4, str. 130-135, 2017.