

Možnosti identifikacije periferne arterijske bolezni na osnovi infrardeče termografije: preliminarni rezultati

Sara Stančin¹, Petra Durini², Vinko Boc^{3,4}, Iztok Štolt^{3,5}

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

² Univerza v Ljubljani, Centralna tehniška knjižnica, Trg republike 3, 1000 Ljubljana

³ Univerza v Ljubljani, Medicinska fakulteta, Vrazov trg 2, 1000 Ljubljana

⁴ Univerzitetni klinični center, Klinični oddelek za žilne bolezni, Zaloška cesta 2, 1000 Ljubljana

⁵ Univerzitetni klinični center, Klinični oddelek za endokrinologijo, diabetes in presnovne bolezni, Zaloška cesta 2, 1000 Ljubljana
E-pošta: sara.stancin@fe.uni-lj.si

Povzetek. Raziskujemo možnosti uporabe termografskih slik za identifikacijo prisotnosti periferne arterijske bolezni (PAB). Namen je opredeliti vlogo termografije kot dodatne preiskave pri ugotavljanju stopnje prizadetosti arterij. V raziskavi se osredotočamo na termograme podplatov. Pri večji prizadetosti žilja udov je pretok krvi do podplata nižji, posledično pa je spremenjena površinska temperatura podplata. Postavljamo izhodiščno hipotezo, da je ta sprememba merljiva s termogramom. Termogram obdelamo s klasičnimi tehnikami računalniškega vida in izločimo interesno območje levega oziroma desnega podplata. Za podplat nato izračunamo povprečje in standardno deviacijo površinske temperature ter primerjamo njun diskriminativni potencial pri ločevanju vzorcev PAB od vzorcev zdrave populacije. Pri validaciji se opiramo na referenčno klinično sliko in morfološke preiskave prizadetih arterij. Upoštevamo v kliničnem okolju pridobljenih 27 termogramov podplatov prizadetega uda z ugotovljeno zaporo vsaj ene izmed arterij, ki dovajajo kri v področje podplata, in 34 termogramov podplatov zdravih prostovoljcev. Čeprav je statistična različnost med obema populacijama potrjena za obe spremenljivki, preliminarni rezultati kažejo, da ima standardna deviacija večji diskriminativni potencial kot povprečje površinske temperature podplata. Za 83 % obravnavanih vzorcev PAB bolnikov z arterijskimi zapori je vrednost standardne deviacije nižja od minimalne vrednosti za zdravo populacijo. Pearsonov korelacijski koeficient med gleženjskim indeksom in povprečno površinsko temperaturo podplata je 0,20, medtem ko je ista korelacija izračunana za standardno deviacijo površinske temperature podplata 0,63.

Ključne besede: infrardeča termografija, periferna arterijska bolezen, angiografija, gleženjski indeks, računalniški vid

Possibilities for identifying peripheral arterial disease using infrared thermography: preliminary results

We present the preliminary results from a study investigating the use of thermographic images to identify the peripheral arterial disease (PAD). Our aim is to define the role of thermography as an additional examination in determining the degree of the arterial impairment. We focus on thermograms of the sole. A greater impairment of the leg arteries leads to a reduced blood flow to the sole and, consequently altered surface temperature. We set the initial hypothesis that this change is measurable with a thermogram. We analyse the thermograms by determining the regions of interest on the subject's left and right sole using classical computer vision techniques, including edge detection, contouring, connecting disconnected contours, masking, and manual correction. For each region of interest, we calculate the mean and standard deviation of the surface temperature and compare the discriminative potential of these variables in distinguishing PAD samples from those of the healthy population. For validation, we rely on reference clinical data and morphological examinations of the affected arteries.

We analyse 27 thermograms of the soles of patients with PAD. For each of sample, complete occlusion of at least one artery supplying blood to the sole is confirmed by a morphological examination. We also analyse 34 thermograms of the soles of healthy individuals. All thermograms are

obtained in a clinical setting. Although statistical differences between the two populations are confirmed for both variables, our preliminary results suggest that the standard deviation has a greater discriminative potential than the mean sole surface temperature. For 83% of the PAD patient samples with arterial occlusions, the standard deviation value is lower than the minimum value observed in the healthy population. The Pearson correlation coefficient between the ankle-brachial pressure index and the mean and standard deviation of the sole surface temperature are 0.20 and 0.63, respectively. Finally, considering the temperature normalisation in this preliminary study does not support a stronger correlation between either the mean or the standard deviation of the surface temperature and the ankle-brachial pressure index.

In the future, a much larger study should be conducted to confirm these results. Based on the results of a larger study, a standardised model for the PAD identification could be developed. In addition to defining the expected ranges of standard deviation values of surface temperature for the PAD patients and healthy individuals, temperature distribution patterns in relation to the degree of the arterial impairment could also be investigated. Moreover, it would be extremely valuable to repeat this investigation using thermograms of PAD patients before and after various revascularisation procedures. Finally, with a sufficiently large database of thermograms, future studies should also focus on an automatic recognition of regions of interest using machine and deep learning techniques.

Keywords: infrared thermography, peripheral artery disease, angiography, ankle-brachial pressure index, computer vision

Prejet: 30 October 2025

Odobren: 29 January 2026



Avtorske pravice: © 2025
Creative Commons Attribution 4.0
International License

1 UVOD

Termografija je tehnika, ki uporablja infrardeče (IR) kamere za zaznavanje infrardečega sevanja objektov ter merjenje in prikazovanje njihove temperature. Temperatura objekta se nato vizualizira v obliki termalne slike, tj. termograma, kjer so različne temperature prikazane v različnih barvah. S termografsko tehniko pogosto merimo temperaturo različnih bližnjih in oddaljenih objektov v gradbeništvu in industriji ter za varnostne aplikacije [1–5].

Ker je termografska tehnika brezkontaktna, neinvazivna, hitra in enostavna za uporabo, je močno prisotna tudi pri določanju temperaturnega polja na izbrani površini človeške kože. Znano je, da temperaturno polje človeške kože odraža določena bolezenska stanja, kot so vnetja, tumorji, poškodbe živcev in motnje krvnega pretoka [6–9]. Zahvaljujoč tehničnim napredkom termokamer in razvoju programske opreme za analizo termogramov, se termografska tehnika kot dodatna diagnostična metoda ob uporabi primerjalnih konvencionalnih metod vedno bolj uveljavlja tudi v medicini [6–16]. Med drugim so razviti postopki in podana priporočila za uspešno merjenje površinske temperature podplata [13, 14]. Infrardeča termografija je tako pomembna metoda za zaznavo izrazitega povečanja površinske temperature podplata, ki je pokazatelj tveganja za razvoj razjed pri diabetikih [15, 16]. Zmanjšanje površinske temperature podplata pa je lahko pokazatelj periferne arterijske bolezni (PAB) [15].

Pri bolnikih z znano PAB [17, 18] gre za kronične motnje arterijske prekrvavitve udov, ki jih v veliki večini primerov povzroča ateroskleroza. Ateroskleroza je kronična bolezen, ki povzroča zožitev arterij. Najbolj tipičen simptom je intermitentna klavdikacija, za katero je značilna bolečina v spodnjih okončinah, ki se poslabša s hojo in navadno poneha med počitkom. Pri zelo napredovani PAB pa se pojavi kritična ishemija uda [19].

Po trenutnih smernicah za odkrivanje PAB [20, 21] so glavne diagnostične preiskave anamneza, osnovne laboratorijske preiskave in merjenje perfuzijskih tlakov z doplerskim detektorjem. Slednja je temeljna objektivna preiskava za potrditev suma PAB. Temelji na merjenju in primerjanju gleženjskih tlakov ter tlakov obeh nadlakti. Razmerje med višjim sistoličnim tlakom v vsakem gležnju in višjim sistoličnim tlakom na nadlakti imenujemo gleženjski indeks (GI). Normalno je arterijski tlak v gležnju enak ali večji od tlaka na nadlakti. Čim nižji je gleženjski indeks, tem bolj napredovala je PAB. Po dogovoru razpon vrednosti GI med 0,91 in 1,30 ne nakazuje na PAB, medtem ko GI 0,9 ali manj služi kot dokaz PAB [21, 22].

Za prikaz morfologije arterijskega sistema v udu in natančno opredelitev mest ter oblik zožitev ali zapor je angiografska preiskava zlati standard [21]. Na osnovi pridobljenih rentgenskih slik angiolog poda oceno o velikosti in mestu lezij, ki se kažejo kot zožitve ali zapore na arterijah.

Namen študije je omogočiti dodatno klinično orodje, ki bi zdravnikom olajšalo določanje prizadetosti bolnikov na neinvaziven in hiter način. Zanima nas predvsem primerjava rezultatov termografije med bolniki s PAB in zdravo populacijo ter povezava med rezultati termografije, klinično sliko in angiografsko oceno prizadetosti arterij. V ta namen predstavljamo preprosto metodo kvantitativnega vrednotenja površinske temperature, izmerjene iz termograma.

Za preliminarne rezultate se osredotočamo na področje podplata in postavljamo izhodiščno hipotezo, da je ob večji prizadetosti žilja udov pretok krvi do podplata nižji, posledično pa je spremenjena površinska temperatura podplata – in ta sprememba je merljiva s termogramom. V študiji upoštevamo bolnike s PAB, pri katerih je angiolog določil lokacijo in velikost lezije na štirih arterijah, ki dovajajo kri v področje podplata, in sicer so to: arteria femoralis superficialis (AFS), arteria poplitea (AP) ter golenski arteria tibialis posterior (ATP) in arteria interossa (AI).

Predstavljena metodologija je nadaljevanje raziskave [23], v kateri je bil določen protokol meritev s termografsko kamero in zajem termogramov, opravljena je bila študija ter pridobljena baza podatkov, na podlagi morfoloških preiskav arterij je bila ocenjena stopnja prizadetosti arterij udov, ugotovljena je bila tudi povezanost med angiografsko prikazanimi morfološkimi spremembami na arterijah in atributi termograma ter potrjena uporaba termografije za klinično presejanje oseb s PAB.

V [23] je potrjena hipoteza o statistično značilni različnosti izračunanih povprečij površinske temperature podplata med bolniki s PAB in zdravo populacijo, medtem ko sta hipotezi, da je izračunana povprečna temperatura značilno povezana s stopnjo prizadetosti oziroma z gleženjskim indeksom, ovrženi. Izhajajoč iz argumenta o različnosti osnovne telesne temperature med posameznimi merjenci, avtorji v [13] namesto uporabe absolutnih vrednosti površinske temperature podplata priporočajo uporabo normaliziranih vrednosti. Tudi v [23] so avtorji raziskali učinek normalizacije, vendar niso ugotovili močnejše povezave s stopnjo prizadetosti oziroma z gleženjskim indeksom.

V tej študiji celoviteje pristopamo razvoju metodologije za računalniško avtomatizirano obdelavo termogramov. Pri vrednotenju termograma se poleg povprečnih vrednosti površinske temperature podplata osredotočamo tudi na njihovo razpršenost, tj. standardno deviacijo. Ob prizadevanju za določitev diskriminativnega potenciala obeh spremenljivk pri razpoznavanju in razlikovanju vzorcev PAB od vzorcev zdrave populacije raziskujemo odnos med njima ter rezultati uveljavljenih tehnik identifikacije in opredelitve PAB (GI in morfološke preiskave arterij). Namen dela je podati preliminarne rezultate, ki naj bi služili kot pomoč pri nadaljnjem razvoju metodologije vrednotenja termograma.

2 PRIDOBIVANJE IN OBDELAVA TERMOGRAMA

Upoštevamo termograme, pridobljene v skladu s protokolom, predstavljenim v [23]. Termografske meritve bolnikov s PAB so bile izvedene pol ure pred predvideno angiološko preiskavo na Kliničnem oddelku za žilne bolezni UKC LJ. Vzporedno z eksperimentom so se beležili tudi podatki iz anamneze in klinična slika. Na osnovi pridobljenih angiogramov je angiolog ocenil kategorijo in obseg lezij na arterijah. Pri zajemu termografskih slik bolnikov in zdravih prostovoljcev je bila temperatura v prostoru nadzorovana v mejah 20 ± 1 °C, relativna vlažnost pa je bila okoli 47 % in ni presegla 50 %. Meritve so bile izvedene s termokamero FLIR T420 [24], ki je bila nameščena na stativ in en meter oddaljena od merjenca. Reflektirana navidezna temperatura je bila nastavljena na temperaturo zraka v prostoru, emisivnost človeške kože pa na vrednost 0,98. Vsi udeleženci so 15 minut pred slikanjem in merjenjem bosi ležali na bolniški postelji. Komisija Republike Slovenije za medicinsko etiko je ocenila, da je raziskava etično sprejemljiva. Vsi udeleženci so bili seznanjeni z namenom raziskave in so podpisali izjavo o zavestni in svobodni privolitvi v sodelovanje v raziskavi.

Pridobljeni so bili barvni termogrami širine $I = 320$ in višine $J = 240$ točk. Primer termograma obeh podplatov enega bolnika prikazuje slika 1, medtem ko slika 2 prikazuje termogram zdravega prostovoljca. Vsak termogram vsebuje tudi skalo za barvno-temperaturno pretvorbo. Prikazani termogram zdravega prostovoljca potrjuje porazdelitev površinske temperature kože obeh podplatov pri zdravi populaciji v obliki simetričnega metuljnega vzorca (angl. *symmetrical butterfly pattern*), kjer ima osrednji lok najvišjo temperaturo na podplatu [13]. Številne dodatne raziskave so s kvalitativnim vrednotenjem temperaturnih vzorcev na površini stopal ta vzorec potrdile [14, 15].

Iz vsakega termograma na osnovi klasičnih tehnik računalniškega vida, vključno z zaznavo robov, povezovanjem robnih točk v sklenjene konture in maskiranjem ter ročno korekcijo, določimo interesno območje levega in desnega podplata.

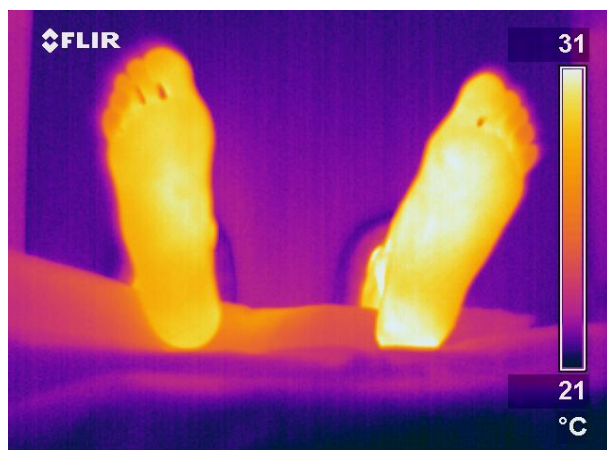
Natančneje, barvni termogram pretvorimo v sivo sliko, na kateri najprej določimo robove. Uporabimo Cannyjev zaznavalnik s pragom, nastavljenim na empirično določeno ustrezno vrednost 0,2. Odvečne robove, ki ne pripadajo konturi podplata, izbrisemo ročno. Ročna korekcija je potrebna predvsem, kadar pri slikanju ni uporabljena pregrada za ločevanje med slikanim področjem, tj. podplatom, in ozadjem oziroma je bila pregrada uporabljena, a ni bila postavljena natančno (na primerih na slikah 1 in 2 ločevanje podplatov tako ovirajo vidni deli gležnja ter podkolenski medialni deli udov).

Zaznane robove povežemo v konture vsakega podplata. Zaradi omejene natančnosti pri ročnem brisanju pogosto izgubimo tudi del točk robov, ki pripadajo konturi podplata v področju brisanja; zato so

pridobljene konture podplata nepovezane oziroma za en podplat dobimo več delnih kontur. Te nato povežemo na naslednji način. Za obe končni točki vseh pridobljenih kontur izračunamo razdalje do vseh končnih točk preostalih kontur. Par končnih točk z najkrajšo razdaljo združimo oziroma pripadajoči konturi linearno povežemo. Postopek iterativno ponavljamo, dokler ne povežemo vseh končnih točk kontur enega podplata. Po ročnem pregledu so tako pridobljene sklenjene konture dovolj natančne za nadaljnje delo. Vsaka pridobljena sklenjena kontura skupaj s svojo notranjostjo določa masko za izločanje interesnega območja celotnega podplata.

Nadalje, za vsako interesno območje na osnovi v termogram vključene barvno-temperaturne skale izračunamo dva atributa: povprečno površinsko temperaturo podplata μ in njeno standardno deviacijo σ .

Poleg absolutnih vrednosti pri študiji upoštevamo tudi normalizirane vrednosti, in sicer normalizirano povprečje $\mu^{(n)} = \mu / \mu_{dlani}$ in normalizirano standardno deviacijo $\sigma^{(n)} = \sigma / \mu_{dlani}$, pri čemer za μ_{dlani} vzamemo povprečno temperaturo leve in desne dlani merjenca, izmerjeno po 15-minutnem obdobju mirovanja in pred pridobivanjem termograma.



Slika 1: Termogram podplatov bolnika s periferno arterijsko boleznijo (v tem primeru je prizadet desni ud).



Slika 2: Termogram podplatov zdravega prostovoljca.

Obdelava slik je bila opravljena s programskim jezikom Python 3.12 [25] in knjižnico OpenCV [26]. Vsi poznejši izračuni so bili opravljeni v orodju Matlab R2024b [26].

3 PRIMERJALNA ANALIZA IN DOLOČANJE USPEŠNOSTI

Osredotočamo se na bolnike s PAB z zaporami arterij uda, ki dovajajo kri v področje podplata. Upoštevamo 26 bolnikov s PAB, za katere smo pridobili primerne in primerljive termograme ter klinične podatke. V osnovno študijo [23] je bilo sicer vključenih 41 bolnikov z znano PAB. Od teh 41 bolnikov pri šestih termogramih ne prikazujejo celotnega podplata ali ni bila v celoti opravljena referenčna klinična angiografija, pri devetih bolnikih pa niso ugotovljene popolne zapore arterij.

Povprečna starost 26 bolnikov z arterijskimi zaporami je $71,19 \pm 10,13$ let. 13 (50 %) obravnavanih bolnikov je moškega in 13 (50 %) ženskega spola.

V študiji je sodelovalo tudi 17 zdravih prostovoljcev, za katere smo pridobili ustrezne termograme podplata. Povprečna starost zdravih prostovoljcev je $39,29 \pm 10,36$ let. 8 (47,06 %) prostovoljcev je moškega in 9 (52,94 %) ženskega spola.

Pri bolnikih s PAB upoštevamo le podplat prizadetega uda (25 udeležencev ima arterijske zapore na enem udu, en udeleženec ima prizadeta oba uda). Druge noge, za katero ni bila opravljena referenčna klinična angiografija, ne upoštevamo (ne kot prizadete ne kot neprizadete). Pri zdravih prostovoljcih upoštevamo oba podplata. Končni nabor za validacijo tako skupno vsebuje 27 vzorcev PAB bolnikov z arterijskimi zaporami in 34 vzorcev zdravih prostovoljcev. Celoten nabor 27 vrednosti povprečja in standardne deviacije površinske temperature podplata za bolnike s PAB označimo z μ_{PAB} in σ_{PAB} . Podobno z μ_{zdravi} in σ_{zdravi} označimo nabor 34 vrednosti, pridobljenih za zdrave prostovoljce. Pripadajoče nabore normiranih vrednosti označimo z $\mu_{PAB}^{(n)}$ in $\sigma_{PAB}^{(n)}$ ter $\mu_{zdravi}^{(n)}$ in $\sigma_{zdravi}^{(n)}$.

Pri vseh obravnavanih vzorcih so pri bolnikih s PAB ugotovljene popolne zapore na arterijah uda, ki dovajajo kri v področje podplata. Tabela 1 prikazuje distribucijo vzorcev glede na število prizadetih arterij. Od skupno 27 upoštevanih vzorcev jih 15 pripada bolnikom z eno prizadeto arterijo, 12 vzorcev pa bolnikom z dvema ali več prizadetimi arterijami.

Pri raziskavi poleg anamneze, pri kateri so simptomi intermitentne klavdikacije dovolj značilni za postavitev diagnoze PAB, ter morfološke preiskave arterij in oznake angiologa o lokaciji in velikosti lezij kot referenčno metodo uporabimo tudi gleženjski indeks.

Za preverjanje normalne porazdelitve vseh atributov termograma uporabimo test Shapiro-Wilk. Studentov t-test za neodvisne vzorce uporabimo za preverjanje statistične razlike med povprečnimi vrednostmi (μ_{PAB} in μ_{zdravi}) ter med standardnimi deviacijami (σ_{PAB} in σ_{zdravi}) za bolnike s PAB in zdravo populacijo. Rezultate štejemo za statistično značilne pri $p < 0,05$. Povezavo med

termogramskimi atributi in gleženjskim indeksom analiziramo s Pearsonovim korelacijskim koeficientom.

Tabela 1: Distribucija vzorcev termogramov bolnikov s PAB z arterijskimi zaporami glede na število prizadetih arterij uda, ki dovajajo kri v področje podplata.

Število prizadetih arterij	Število vzorcev
1	15
2	6
3	3
4	3

4 REZULTATI PRIMERJALNE ANALIZE

Testi Shapiro-Wilk za oba upoštevana atributa, pridobljena iz termograma, v normiranem in nenormiranem načinu, ter za obe populaciji (bolniki in zdravi prostovoljci), tj. μ_{PAB} , σ_{PAB} , μ_{zdravi} , σ_{zdravi} , $\mu_{PAB}^{(n)}$, $\sigma_{PAB}^{(n)}$, $\mu_{zdravi}^{(n)}$ in $\sigma_{zdravi}^{(n)}$, ničelne hipoteze o normalni porazdelitvi ne zavrnejo.

Za vseh 27 vzorcev bolnikov s PAB so vrednosti μ_{PAB} v razponu od $24,88$ °C do $29,06$ °C (povprečje \pm en standardni odklon: $27,35 \pm 1,13$ °C). Vrednosti σ_{PAB} so v razponu od $1,38$ °C do $2,33$ °C ($1,83 \pm 0,28$ °C).

Za vseh 34 zdravih prostovoljcev so vrednosti μ_{zdravi} v razponu od $25,42$ °C do $30,72$ °C ($28,33 \pm 1,53$ °C). Vrednosti σ_{zdravi} so v razponu od $1,94$ °C do $3,48$ °C ($2,49 \pm 0,38$ °C).

Studentova t-testa zavrnete ničelni hipotezi statistične enakosti pridobljenih povprečnih vrednosti μ_{PAB} in μ_{zdravi} ter standardnih deviacij σ_{PAB} in σ_{zdravi} površinske temperature podplata prizadetega uda bolnikov in podplata zdrave populacije.

Studentov t-test zavrne tudi ničelno hipotezo statistične enakosti pridobljenih normiranih standardnih deviacij $\sigma_{PAB}^{(n)}$ in $\sigma_{zdravi}^{(n)}$, medtem ko enake hipoteze za normirana povprečja $\mu_{PAB}^{(n)}$ in $\mu_{zdravi}^{(n)}$ ne zavrne.

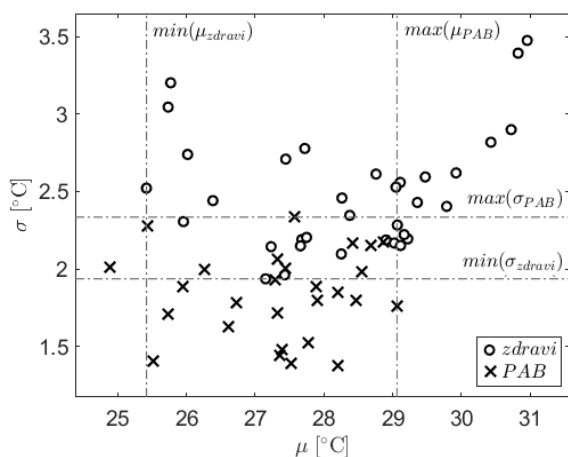
Testa Shapiro-Wilk za vrednosti referenčnega gleženjskega indeksa za obe populaciji ničelne hipoteze o normalni porazdelitvi ne zavrmeta. Specifične vrednosti so za populacijo bolnikov od $0,12$ do 1 ($0,59 \pm 0,23$) ter za zdrave prostovoljce od $1,08$ do $1,32$ ($1,19 \pm 0,06$).

4.1 Površinske temperature

Pridobljene vrednosti obeh atributov termograma, μ in σ , prikazuje slika 3. Poleg specifičnih vrednosti so z vertikalnimi in horizontalnimi prekinjenimi črtami jasno označene mejne vrednosti za obe populaciji.

Slika 3 potrjuje na splošno nižje vrednosti μ_{PAB} in σ_{PAB} v primerjavi z μ_{zdravi} in σ_{zdravi} . Glede na povprečno vrednost površinske temperature podplata je večina vzorcev bolnikov in zdravih prostovoljcev v območju

prekrivanja ($\min(\mu_{zdravi}) = 25,42 \text{ }^\circ\text{C} < \mu < \max(\mu_{PAB}) = 29,06 \text{ }^\circ\text{C}$). Za 13 vzorcev zdravih prostovoljcev (38 %) velja $\mu > \max(\mu_{PAB})$.



Slika 3: Povprečja μ in standardne deviacije σ površinske temperature podplata bolnikov s PAB z arterijskimi zaporami in zdravih prostovoljcev.

Glede na vrednost standardne deviacije površinske temperature podplata za 17 vzorcev bolnikov s PAB (63 %) velja $\sigma < \min(\sigma_{zdravi}) = 1,94 \text{ }^\circ\text{C}$, pri 10 vzorcih (37 %) pa je vrednost σ v območju prekrivanja, tj. velja $\min(\sigma_{zdravi}) = 1,94 \text{ }^\circ\text{C} < \sigma < \max(\sigma_{PAB}) = 2,33 \text{ }^\circ\text{C}$. Vrednosti, večje od $\max(\sigma_{PAB}) = 2,33 \text{ }^\circ\text{C}$, so značilne za 20 zdravih prostovoljcev (58 %).

Podroben vpogled v dostopno klinično sliko pokaže, da večina vzorcev bolnikov, za katere velja $\sigma < \min(\sigma_{zdravi})$, pripada bolnikom z več prizadetimi arterijami, medtem ko večina vzorcev iz območja prekrivanja pripada bolnikom z največ eno prizadeto arterijo, ki dovaja kri v področje podplata. Specifično, za 10 od 12 (83 %) vzorcev bolnikov s PAB s popolno zaporo na dveh ali več arterijah, ki dovajajo kri v področje podplata, velja $\sigma < \min(\sigma_{zdravi})$.

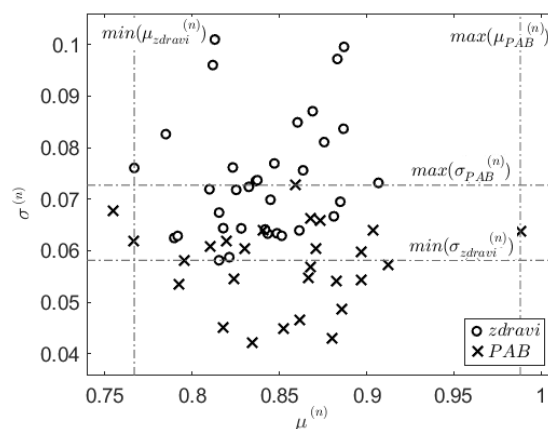
Za celotno populacijo udeležencev je izračunan Pearsonov korelacijski koeficient med gleženjskim indeksom in povprečno površinsko temperaturo podplata 0,20, medtem ko je ista korelacija, izračunana za standardno deviacijo površinske temperature podplata, enaka 0,63.

Čeprav je statistična različnost potrjena za obe spremenljivki, manjše prekrivanje razpona vrednosti za standardno deviacijo kot za povprečje površinske temperature podplata bolnikov s PAB glede na populacijo zdravih prostovoljcev ter višji korelacijski koeficient nakazujeta na večji diskriminativni potencial standardne deviacije kot atributa termograma za razlikovanje bolnikov s PAB od zdravih prostovoljcev.

4.2 Normalizirane površinske temperature

Pridobljene vrednosti za normalizirani spremenljivki, $\mu^{(n)}$ in $\sigma^{(n)}$, za vse vzorce bolnikov in zdravih prostovoljcev prikazuje slika 4. Zaradi nazornosti so ponovno dodane

vertikalne in horizontalne prekinjene črte, ki označujejo mejne vrednosti.



Slika 4: Normirana povprečja $\mu^{(n)}$ in standardne deviacije $\sigma^{(n)}$ površinske temperature podplata bolnikov s PAB z arterijskimi zaporami in zdravih prostovoljcev

Razberemo lahko, da je tudi za normirane vrednosti diskriminativni potencial standardne deviacije večji, čeprav se za obe spremenljivki občutno zmanjša. Glede na vrednosti normiranega povprečja površinske temperature se obe populaciji vzorcev prekrivata. Glede na vrednost normirane standardne deviacije površinske temperature podplata se število vzorcev, za katere velja $\sigma^{(n)} < \min(\sigma_{zdravi}^{(n)})$, zmanjša na 14 (52 %), v območju prekrivanja pa je preostalih 13 vzorcev (48 %). V območju, značilnem izključno za zdrave prostovoljce, to je $\sigma^{(n)} > \max(\sigma_{PAB}^{(n)})$, je 16 vzorcev (47 %).

Tudi linearna podobnost med obema normiranima atributoma termograma in gleženjskim indeksom se zmanjša. Izračunan za celotno populacijo vzorcev je Pearsonov korelacijski koeficient med gleženjskim indeksom in normiranim povprečjem površinske temperature podplata -0,19, medtem ko je ista korelacija, izračunana za normirano standardno deviacijo površinske temperature podplata, enaka 0,60.

5 ZAKLJUČEK

Preliminarni rezultati potrjujejo, da je sprememba prekravljenosti podplata zaradi arterijskih zapor uda pri bolnikih s PAB v primerjavi z zdravo populacijo merljiva z infrardečo termografijo. Povprečje in standardna deviacija površinske temperature podplata kot dva atributa termograma se pri bolnikih večinoma znižata v primerjavi z zdravo populacijo. Čeprav je statistična različnost med obema populacijama potrjena za oba atributa, standardna deviacija izkazuje občutno večji diskriminativni potencial za razlikovanje bolnikov od zdravih prostovoljcev. To potrjuje tudi močnejša linearna podobnost z referenčnim gleženjskim indeksom.

Poudariti je treba, da preliminarna študija ne potrjuje močnejše povezave med atributi termograma in

referenčnim gleženjskim indeksom v primeru normalizacije temperatur.

Za splošno potrditev predstavljenih rezultatov bi bilo v prihodnje treba izvesti bistveno večjo študijo, ki bi omogočila tudi opredelitev standardiziranega modela za identifikacijo periferne arterijske bolezni z interpretacijo termogramov. Poleg določitve pričakovanih razponov vrednosti standardne deviacije površinske temperature za bolnike s PAB in zdrave posameznike bi bilo treba raziskati tudi vzorce porazdelitve temperature glede na stopnjo arterijske prizadetosti. To bi omogočilo prenos metodologije v klinično okolje.

Zelo koristno bi bilo tudi ponoviti raziskavo, predstavljeno v tem članku, z uporabo termogramov bolnikov s PAB pred različnimi revaskularizacijskimi postopki in po njih.

Ustvarjanje večje podatkovne baze termogramov bolnikov in zdravih posameznikov bi lahko nadaljnjim študijam omogočilo uporabo tehnik strojnega in globokega učenja za avtomatsko prepoznavo različnih območij interesa. To lahko pripomore k naprednejši analizi, ki temelji na analizi celotnega porazdelitvenega vzorca površinskih temperatur.

LITERATURA

- [1] P. Shrestha, O. Avci, S. Rifai, F. Abal, M. Seek, K. Barth, U. Halabe "A Review of Infrared Thermography Applications for Civil Infrastructure", SDHM Structural Durability and Health Monitoring, 19(2), str. 193–231, 2025.
- [2] W. K. Wong, P. N. Tan, C. K. Loo, W. S. Lim "An Effective Surveillance System Using Thermal Camera", 2009 International Conference on Signal Acquisition and Processing, ICSAP 2009, str. 13–17, 2009.
- [3] A. S. Rogers, D. Mowbray "Infrared thermography in building diagnostics", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 9(2), str. 121–134, 2001.
- [4] R. Gade, H. J. Brodersen "Infrared thermography in electrical engineering", IEEE Transactions on Power Delivery, 20(4), str. 2453–2458, 2005.
- [5] X. Maldague "Theory and practices of infrared thermography applications in nondestructive testing" Infrared Physics & Technology, 42(4), str. 271–287, 2001.
- [6] E. F. J. Ring "The historical development of thermal imaging in medicine", Rheumatology, 43, str. 800–802, 2004.
- [7] E. F. J. Ring, K. Ammer "The Technique of Infrared Imaging in Medicine", Thermology international, 10(1), str. 7–14, 2000.
- [8] E. F. J. Ring, K. Ammer "Infrared thermal imaging in medicine" ThermoMedicine, 2(2), str. 15–23, 2012.
- [9] B. B. Lahiri, S. Bagavathiappan, T. Jayakumar, J. Philip "Medical applications of infrared thermography: A review" Infrared Physics & Technology, 54(4), str. 221–235, 2012.
- [10] A. W. Chan, I. A. MacFarlane, D. R. Bowsher "Contact thermography of painful diabetic neuropathic foot", Diabetes Care, 14, str. 918–922, 1991.
- [11] P. Dub, A. Drastich, Z. Novak, I. Riha "Thermography In Nerve Root Disease", Thermology International, 12, str. 76–79, 2002.
- [12] J. Ogorevc, I. Pušnik, G. Geršak, J. Bojkovski, J. Drnovšek "Termovizija v medicini", Zdravniški Vestnik, 84(11), str. 757–770, 2015.
- [13] A. W. Chan, I. A. MacFarlane, D. R. Bowsher "Contact thermography of painful diabetic neuropathic foot", Diabetes Care, 14, str. 918–922, 1991.
- [14] P. C. Sun, S. H. E. Jao, CK. Cheng "Assessing Foot Temperature Using Infrared Thermography", Foot & Ankle International, 26(10), str. 847–853, 2005.
- [15] T. Nagase, H. Sanada, K. Takehara, M. Oe, S. Iizaka, Y. Ohashi, M. Oba, T. Kadowaki, G. Kakagami "Variations of plantar thermographic patterns in normal controls and non-ulcer diabetic patients: Novel classification using angiosome concept" Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery, 64, str. 860–866, 2011.
- [16] H. Maldonado, R. Bayareh, I.A. Torres, A. Vera, J. Gutiérrez, L. Leija "Automatic detection of risk zones in diabetic foot soles by processing thermographic images taken in an uncontrolled environment", Infrared Physics & Technology, 105, 2020.
- [17] D. Parwani, M. A. Ahmed, A. Mahawar, V. R. Gorantla "Peripheral Arterial Disease: A Narrative Review", Cureus, 15(6), 2023.
- [18] J. Nordanstig, C. A. Behrendt, A. W. Bradbury, G. J. de Borst, F. G. R. Fowkes, J. Golledge, A. Gottsater, R. J. Hinchliffe, S. Nikol, L. Norgren "Peripheral arterial disease (PAD) – A challenging manifestation of atherosclerosis", Preventive Medicine, 171, 2023.
- [19] M. H. Shishebor, C. J. White, B. H. Gray, M. T. Menard, R. Lookstein, K. Rosenfield, M. R. Jaff "Critical Limb Ischemia: An Expert Statement", Journal of the American College of Cardiology, 68(18), str. 2002–2015, 2016.
- [20] L. Mazzolai, G. Teixido-Tura, S. Lanzi, V. Boc, E. Bossone, M. Brodmann, A. Bura-Rivière, J. De Backer, S. Deglise, A. Della Corte, C. Heiss, M. Kalužna-Oleksy, D. Kurpas, C. M. McEniery, T. Mirault, A. A. Pasquet, A. Pitcher, H. A. I. Schaubroeck, O. Schlager, P. A. Sirmes, M. G. Sprynger, E. Stabile, F. Steinbach, M. Thielmann, R. R. J. van Kimmenade, M. Venermo, J. F. Rodriguez-Palomares; ESC Scientific Document Group "2024 ESC Guidelines for the management of peripheral arterial and aortic diseases". Eur Heart J, 45(36), str. 3538–3700, 2024.
- [21] M. Tandra, V. Aboyans, M. L. Bartelink, I. Baumgartner, D. Clement, J. P. Collet, A. Cremonesi, M. D. Carlo, et al. "ESC Guidelines on the diagnosis and treatment of peripheral artery diseases", European Heart Journal, 32, str. 2851–2906, 2011.
- [22] W. R. Hiatt "Medical treatment of peripheral arterial disease and claudication", New Engl Journal of Medicine, 344, str. 1608–21, 2001.
- [23] P. Durini "Vloga termografije pri opredelitvi perifrene arterijske bolezni", Magistrsko delo Magistrskega študijskega programa II. Stopnje Strojništvo, Ljubljana, 2016.
- [24] Teledyne FLIR LLC "FLIR 420 & 440 datasheet", http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/IND_003/IND_003_EN.pdf, FLIR Commercial Systems, dostopano 09.09.2025
- [25] Python Software Foundation "Python Language Reference, version 3.12", <http://www.python.org>, dostopano 09.09.2025.
- [26] OpenCV "Open Source Computer Vision Library 2015", <https://opencv.org/>, dostopano 09.09.2025.
- [27] The MathWorks Inc. (2024) "MATLAB version: R2024b", <https://www.mathworks.com>, dostopano 09.09.2025.

Sara Stančin je leta 2013 doktorirala na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Od leta 2015 je docentka in poučuje na isti fakulteti. Je članica Laboratorija za informacijske tehnologije na Katedri za komunikacijske in informacijske tehnologije. Pri pedagoškem in raziskovalnem delu se osredotoča na uporabo sodobnih informacijsko-komunikacijskih ter senzorskih tehnologij za spremljanje, analizo in izboljšanje kakovosti življenja človeka. Sodelovala je pri več domačih in tujih raziskovalnih ter razvojnih projektih ter jih tudi vodila. Je avtorica ali soavtorica več kot 50 znanstvenih in pedagoških del ter konferenčnih prispevkov.

Petra Durini je na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani leta 2011 diplomirala iz gradbeništva, leta 2016 pa magistrirala. Od leta 2018 je zaposlena kot informacijska specialistka za področje gradbeništva v Centralni tehniški knjižnici Univerze v Ljubljani (CTK), kjer je odgovorna tudi za upravljanje zbirke standardov. Njeni poklicni interesi so usmerjeni v odprto znanost in ravnanje z raziskovalnimi podatki. Njene ključne odgovornosti vključujejo nadzor nad informacijskimi viri knjižnice na področju gradbeništva in urbanizma, pripravo bibliografij za raziskovalce ter podporo pri izvajanju praks odprte znanosti. S termografijo in termografskimi meritvami se ukvarja že od začetka kariere.

Vinko Boc je specialist kardiologije in žilne medicine. Je vodja katetrskega laboratorija za endovaskularne posege na Kliničnem oddelku za žilne bolezni Univerzitetnega kliničnega centra Ljubljana. Slovenijo zastopa v Evropskem združenju za žilno medicino (ESVM), je član Evropskega združenja kardiologov (FESC) in predsednik Slovenskega združenja za žilne bolezni. Poučuje na Medicinski fakulteti Univerze v Ljubljani. Je avtor ali soavtor številnih znanstvenih in strokovnih člankov v mednarodnih in domačih revijah. Njegove raziskave se osredotočajo na periferno arterijsko bolezen, endovaskularne posege na perifernih arterijah in venah ter patofiziologijo in vrednotenje restenoze.

Iztok Štötl je diabetolog na Oddelku za endokrinologijo, diabetes in presnovne bolezni Univerzitetnega kliničnega centra Ljubljana. Poučuje na Medicinski fakulteti in Fakulteti za šport Univerze v Ljubljani ter kot doktorski kandidat raziskuje klinične napovedne modele. Na nacionalni ravni je predsednik Slovenskega nacionalnega odbora za upravljanje e-zdravja (Ministrstvo za zdravje) ter zastopa Slovenijo na generalni skupščini SNOMED CT International in v Delovni skupini za digitalno zdravje Stalnega odbora evropskih zdravnikov (CPME). Njegova evropska sodelovanja vključujejo projekte, kot so XiA, i2X, EUBIROD, PARENT in BRIDGE Health na področju kliničnih registrov.