

Termovizija v medicini

Thermal imaging in medicine

Jaka Ogorevc, Igor Pušnik, Gregor Geršak, Jovan Bojkovski, Janko Drnovšek

¹ Laboratorij za metrologijo in rakovost, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani

Korespondenca/ Correspondence:

Jaka Ogorevc,
e: jaka.ogorevc@fe.uni-lj.si

Ključne besede:

termovizija; termogram;
diagnostika; telesna
temperatura;
standardizacija

Key words:

thermal imaging;
thermogram; diagnostics;
body temperature;
standardization

Citirajte kot/Cite as:

Zdrav Vestn 2015;
84: 757–70

Prispelo: 17. mar. 2014,
Sprejeto: 19. okt. 2015

Izvleček

Uvod: Opazovanje telesne temperature je ena najstarejših in še danes najosnovnejših diagnostičnih metod v medicini. V zadnjih letih se za merjenje telesne temperature v diagnostične namene vse bolj uporablja termovizija. Termovizija je neinvazivna, brezkontaktna metoda za merjenje temperature na površini telesa. Metoda je hitra, bolniku ne povzroča nikakršnih bolečin in ta pri meritvi ni izpostavljen ionizirajočemu sevanju ali kateri koli drugi obremenitvi telesa.

Primeri uporabe termovizije v medicini: V mnogih primerih se bolezenska stanja pokažejo kot hiper- oz. hipotermični vzorci. Tu se kaže potencial termovizije kot diagnostične metode, s katero je mogoče hitro zaznati takšne termične anomalije. Članek prikazuje uporabo termovizije na različnih medicinskih področjih. Termovizija se je izkazala kot primerna metoda za merjenje *povišane telesne temperature*, za detekcijo mesta *zlomov in vnetij*, kot zanesljivo diagnostično orodje pri odkrivanju *raka dojke* in določanju tipa tumorja *kožnega raka*. Uporabna je pri spremljanju poteka terapije pri *okvari hrbtnjače*, pri detekciji *alergije na hrano* in odkrivanju zapletov pri *hemodializi*. Metoda je zelo učinkovita tudi pri poteku *rekonstrukcije dojke* po mastektomiji. S termovizijo je mogoče določiti stopnje *opeklin* in zgodaj odkriti osteomielitis pri *diabetičnem stopalu*. Najpogostejša in najstarejša uporaba termovizije v medicini je na področju *revmatologije*.

Priporočila za uporabo in standardi: Za pravilno interpretiranje rezultatov, izmerjenih s termovizijsko kamero, so zelo pomembne ustrezne lastnosti in nastavitve kamere, priprava merjenca in pogoji okolice. Na področju spremljanja človekove temperature pri mrzlici so oblikovali standard za merjenje s presejalnimi termografi.

Zaključek: Na podlagi predstavljenih primerov je razvidno, da je v medicini možnost uporabe termovizije zelo široka. Prenos vsake nove tehnologije v vsakdanjo klinično prakso zahteva veliko število primerjalnih meritev z referenčnimi metodami za potrebe klinične validacije. Poznavanje merilne problematike je pri tem ključnega pomena. Da bi termovizija kot trenutno nova in ne široko validirana metoda na področju medicine pridobila zaupanje in zanesljivost, je nujno potrebno sodelovanje na multi- in interdisciplinarni ravni med medicino in tehniko.

Abstract

Introduction: Body temperature monitoring is one of the oldest and still one of the most basic diagnostic methods in medicine. In recent years, thermal imaging has been increasingly used in measurements of body temperature for diagnostic purposes. Thermal imaging is non-invasive, non-contact method for measuring surface body temperature. The method is quick and painless, and does not expose patients to ionizing radiation or any other body burden.

Application of thermal imaging in medicine: Pathological conditions can be indicated as hy-

per- or hypothermic patterns in many cases. Thermal imaging is presented as a diagnostic method, which can detect such thermal anomalies. This article provides an overview of the thermal imaging applications in various fields of medicine. Thermal imaging has proven to be a suitable method for *human febrile temperature screening*, for the detection of sites of *fractures* and *inflammations*, a reliable diagnostic tool in the detection of *breast cancer* and determining the type of *skin cancer* tumours. It is useful in monitoring the course of therapy after *spinal cord injury*, in the detection of *food allergies* and complications at *hemodialysis*. It is also very effective in the course of *breast reconstruction* treatment after mastectomy. By thermal imaging, it is possible to determine the degree of *burns* and early detection of osteomyelitis in *diabetic foot* phenomenon. The most common and the oldest application of thermal imaging in medicine is in the field of *rheumatology*.

Recommendations for use and standards: Essential performance of a thermal imaging camera, camera settings, patient preparation and environmental conditions are very important for proper interpretation of measurement results in medical applications of thermal imaging. Standard for screening thermographs was formed for the human febrile temperature screening application.

Conclusion: Based on the presented examples, it is shown that thermal imaging can also be widely used in medicine. The implementation of every new technology in a daily clinical practice requires a large number of measurements with such equipment to be compared by reference method for the purpose of clinical validation. The knowledge of measurement-related problems is crucial. Collaboration between physicians and engineers at the multi- and interdisciplinary levels is of high importance for thermal imaging to win the trust of physicians and to gain reliability as a clinical diagnostic tool.

Uvod

Povezava med spremembo telesne temperature in bolezenskimi znaki je bila eno prvih odkritij v medicini. Hipokrat je opredelil povišano telesno temperaturo v maligni, benigni in akutni obliki. Ko so na kožo položili mokro blato in se je del blata posušil, medtem ko je bil preostanek še moker, so trdili, da se pod posušeno površino nahaja tumor.¹ Wunderlich je leta 1868 predstavil merjenje človeške telesne temperature, ki ima od takrat velik pomen v medicini. V svoji doktorski disertaciji je Wunderlich prikazal uporabo termometrije pri proučevanju in zdravljenju povišane telesne temperature. V preteklih letih so klasične živosrebrne termometre, ki jih je uporabljal tudi Wunderlich, zamenjale moderne elektronske naprave.² Eden od razlogov za zamenjavo je tudi v sprejeti direktivi Evropske komisije, ki z aprilom 2009 prepoveduje trženje živosrebrnih termometrov zaradi nevrotoksičnosti živega srebra.^{3,4} Živosrebrne termometre so zamenjali drugi tekočinski in elektronski termometri, zato so termočleni, termistorji in brezkontaktni infrardeči termovizijski senzorji v vse pogostejši rabi v medicini. Za zanimivo merilno metodo, s katero je mogo-

če izmeriti temperaturno polje večje telesne površine, se je izkazala termovizija. Termovizija je neinvazivna, brezkontaktna metoda za merjenje temperature površine. Metoda je hitra in bolniku ne povzroča nikakršnih bolečin.⁵ Termovizijske kamere so naprave, ki omogočajo slikovni prikaz temperaturnega polja. Tvorbo slike temperaturnega polja omogoča detektor, ki je sestavljen iz polja miniaturnih termičnih detektorjev in meri jakost toplotnega sevalnega toka. Dvdimenzionalna slika temperaturnega polja, na kateri so temperature na merjeni površini predstavljene z barvno skalo, se imenuje termogram.

Začetek brezkontaktnih sevalnih termometrije sega v leto 1800, ko je skladatelj in astronom William Herschel odkril infrardeče sevanje in prvi začel poskuse merjenja temperature na tem področju. Šele čez sto let se je pojavil prvi sevalni termometer, ki je imel termoelektrični detektor z električnim izhodnim signalom. Sevalne termometre z vgrajeno elektroniko se je množično začelo uporabljati v industrijske namene leta 1930. Pravi razcvet je sevalna termometrija doživela s pojavom prvih termovizijskih kamer

na sredini 20. stoletja. Prve termovizijske kamere so za nastanek slike, ki je podajala jakost sevalnega toka iz posameznih delov vidnega polja, imele le en detektorski element in kompleksen optično-mehanski sistem. Z napredkom izdelave detektorjev so bili izdelani prvi enodimenzionalni detektorji. Leta 1980 so se pojavile termovizijske kamere z dvodimenzionalnim detektorjem. Termovizijske kamere, ki jih poznamo danes, so bile razvite v 90. letih prejšnjega stoletja. Njihovo spektralno območje je omejeno na valovne dolžine od 8 μm do 14 μm .

Vsaka snov oz. telo s temperaturo nad absolutno ničlo 0 K ($-273,15\text{ }^\circ\text{C}$) oddaja elektromagnetno sevanje. Sevanje je ena od treh oblik prenosa toplote. Sevanje elektromagnetnega valovanja ne potrebuje medija za prenos toplote (širi se tudi v vakuumu), medtem ko je pri ostalih dveh načinih prenosa toplote medij potreben. Pri prevajanju je prenosni medij trdna snov, pri konvekciji pa tekočina (kapljevine in plini). Toplotno sevanje opredeljuje pojav, pri katerem se sevalni energijski tok širi s površine v vse smeri prostora. Pri opazovanju sevalnega toka nas zanimata njegova spektralna in smerna porazdelitev. Spektralna porazdelitev opisuje odvisnost jakosti sevalnega toka od valovne dolžine. Spektralna porazdelitev sevalnega toka je odvisna od temperature in lastnosti površine, s katere sevalni tok izhaja. Smerna porazdelitev je odvisna od lastnosti površine. Sevalni tok, ki vpada na površino, vpada pod različnimi koti in se različno lahko tudi odbija (popoln odboj, spektralno difuzen odboj). Pomembna je komponenta sevalnega toka s površine, ki ni posledica odbitega vpadnega sevalnega toka na površino.

Črno telo je idealna površina, ki absorbira celotno vpadno sevanje neodvisno od valovne dolžine in smeri. Pri določeni temperaturi in valovni dolžini nobeno drugo telo ne more sevati bolj kot črno telo. Čeprav je sevanje črnega telesa funkcija temperature in valovne dolžine, je neodvisno od smeri. Spektralna porazdelitev gostote sevalnega toka črnega telesa $L_{\lambda,b}$ je podana s Planckovim zakonom sevanja:

$$L_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{2hc_0^2}{n^2\lambda^5} \left[e^{\frac{hc_0}{n\lambda kT}} - 1 \right]^{-1}$$

pri čemer je

$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s Planckova konstanta,

$k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ J/K Boltzmannova konstanta, $c_0 = 2,99792458 \cdot 10^8$ m/s hitrost svetlobe v vakuumu, n lomni količnik, λ valovna dolžina v metrih in T absolutna temperatura črnega telesa v enotah kelvin.

Za vsako temperaturo spektralna porazdelitev gostote energijskega toka doseže svoj maksimum pri določeni valovni dolžini λ_{max} . Čim višja je temperatura, tem krajša je valovna dolžina. To odvisnost je Wien zapisal v Wienovem zakonu premaknitve:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2898 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{K}$$

S poznavanjem porazdelitve gostote spektralnega sevanja črnega telesa lahko izračunamo celotno izsevanje z integriranjem po vseh valovnih dolžinah, kar je zapisano kot Stefan-Boltzmannov zakon:

$$M = \int_0^{\infty} M_{\lambda} \cdot d\lambda = \sigma T^4$$

kjer je M celotno izsevanje črnega telesa (W/m^2), T je temperatura črnega telesa, $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8}$ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ je Stefan-Boltzmannova konstanta, M_{λ} je izsevanje črnega telesa pri valovni dolžini λ . Naprave, kot so sevalni termometri in infrardeče termovizijske kamere, merijo izsevanje. Iz funkcijske odvisnosti temperature telesa in izsevanja, ki jo podaja Stefan-Boltzmannov zakon, se nato izračuna temperatura.

Vse te zakonitosti veljajo za črno telo. V praksi imamo v glavnem opravka z realnimi telesi, katerih površine sevajo manj kot površina črnega telesa. Parameter, ki opredeljuje razmerje med izsevanjem realne površine in sevanjem črnega telesa pri isti temperaturi in pri istih spektralnih in smernih pogojih, se imenuje emisivnost ϵ . Emisivnost je brez enote. Vrednost emisivnosti se giblje med 0 in 1, kolikor je emisivnost idealnega črnega telesa.^{6,7} Zato je določanje emisivnosti eden glavnih problemov pri zagotavljanju točnih meritev s termovizijo. Emisivnost pa pri merjenju človeške kože nima takšnega vpli-

va, saj je glede na spektralno območje človeška koža približek črnega telesa z vrednostjo emisivnosti med 0,97 in 0,99 ter tako skoraj idealni oddajnik infrardečega sevanja pri sobni temperaturi. Infrardeče termovizijske kamere tako ustvarijo slike, ki temeljijo na infrardečem sevanju toplotne energije s površine kože.⁸

Prve termovizijske slike v medicini so ustvarili v londonski bolnišnici Middlesex Hospital in v Kraljevi narodni bolnišnici za revmatološke bolezni v Bathu med letoma 1959 in 1961.¹ Uporabljali so instrument Pyroscan, izdelan leta 1942. Prve slike so pokazale povišanje temperature v sklepah pri bolnikih z artritidom. V tem času so številni raziskovalni centri in inštituti po vsem svetu raziskovali prednosti in potencialne možnosti termovizije v medicini.^{1,9} Ameriški fiziolog Hardy je ugotovil, da je človeška koža ne glede na raso zelo podobna črnemu telesu in ima emisivnost 0,98.^{1,9,10} V istem obdobju je postala prednostna naloga v medicini odkrivanje raka. Upanje, da bo termovizija postala orodje za odkrivanje raka, je dajalo zagon pri izdelavi novih in boljših senzorjev. V to nalogo so se vključili številni centri po Evropi, Združenih državah Amerike in na Japonskem. Z napredkom razvoja tehnologije pa je prišlo tudi do uspešnih rezultatov v klinični praksi. Britanski kirurg Lloyd Williams je pokazal, da so številni tumorji vroči. Takrat so bile slike, prikazane na ekranih, v črno-beli tehnologiji. V 60. letih 20. stoletja so bili narejeni prvi barvni termogrami. Miniračunalniki za obdelavo slik so se pojavili v poznih 70. letih. Omogočali so barvno prikazovanje, analizo slik ter najpomembnejše shranjevanje podatkov in slik. Kakovost slik se je zelo izboljšala z razvojem modernih termovizijskih sistemov, ki omogočajo hitro zajemanje pri visoki temperaturi in prostorski ločljivosti. Sodobni termogrami so precej različni od tistih izpred več kot 50 let, saj je z razvojem strojne opreme nastala potreba tudi po kakovostni programski opremi za obdelavo in analizo zajetih slik. Danes na področju termovizije obstojijo različni programski paketi, ki omogočajo enostavno zajemanje in hitro obdelavo podatkov. Z vse večjo uporabo so znanstveniki po svetu začeli organizirati delavnice, na katerih so

predstavili svoje delo in izmenjali znanje. Nastala je potreba po boljši organiziranosti in tako so v Amsterdamu leta 1974 organizirali prvo konferenco Evropskega združenja za termografijo. Cilj združenja je bil zbrati znanje številnih znanstvenih centrov in ga zapisati v priporočilih za praktično rabo na različnih področjih.^{1,9} V medicini so priporočila zajemala pripravo merjenca ter pogoje in merila za uporabo. Do danes se je uporaba termovizije poleg revmatologije in onkologije razširila na številna medicinska področja, kar na primerih obravnava ta pregledni tehnološki članek.

Primeri uporabe termovizije v medicini

Povišana telesna temperatura

Od izbruha sindroma akutne respiratorne stiske (SARS) v Aziji je postalo jasno, da se termovizija lahko uporablja za identifikiranje potnikov s povišano temperaturo.¹¹ Temperaturi rektuma in požiralnika sta uveljavljeni kot najbolj zanesljivi in lahko dostopni invazivni metodi za merjenje temperature telesnega jedra. Za temperaturo telesnega jedra se v splošnem smatra temperatura krvi v srcu in možganih. Sistemi za množično zajemanje termovizijskih slik, ki so jih uporabljali med pandemijama SARS-a in nove gripe (H1N1) na letališčih, so merili temperaturo obraza. Preiskovali so predvsem maksimalno temperaturo termograma.¹² V začetku je bilo za merilno mesto najpogosteje izbrano čelo, ki se je izkazalo za problematično zaradi potenja, ko pride do popačenja merilnega rezultata. V takšnih primerih je običajno izmerjena temperatura nižja od dejanske. V najnovejših objavah notranji očesni kot (*lat. commissura palpebrarum medialis*) predlagajo kot najbolj primerno mesto za odkrivanje povišane telesne temperature.^{1,2,10,12,13} Razlog je v največji temperaturni stabilnosti notranjega očesnega kota v primerjavi z ostalimi toplimi površinami na glavi.¹¹ Slika 1 prikazuje termovizijsko sliko obraza z odčitkom temperature na merilnem mestu v notranjem očesnem kotu. Glavni problem pri zaznavanju povišane telesne temperature je v določitvi,

ali je oseba vročična ali ne. Ring in ostali so predlagali, da se izmerjene temperature nad 37,5 °C smatrajo kot stanje povišane telesne temperature. Za potrebe standardizacije meritev telesne temperature je bila imenovana komisija strokovnjakov iz vsega sveta. V dokumentaciji, ki od leta 2008 velja kot standard z oznako IEC 80601-2-59:2008, so predlagali stanje povišane temperature pri izmerjenih temperaturah nad 38 °C.¹³ Merjenja za zaznavanje povišane telesne temperature zahtevajo kalibrirane termovizijske kamere s kratko žariščno razdaljo.² Za ustrezno kalibracijo je pomemben referenčni temperaturni vir.¹¹ Točnost merjenja je odvisna tudi od razdalje med merjencem in kamero.¹⁴ Predlagana razdalja je en meter, tako da je notranji očesni kot zajet z 9–16 piksli.² Pomembno je, da so pogoji okolice kontrolirani, saj spremembe sobne temperature in relativne vlažnosti vplivajo na meritve temperature.

Medicina športa: Poškodba kolen in fraktura ulne

Termovizija se uporablja tudi za preglede športnikov v medicini športa. Zelo je koristna pri odkrivanju simptomov poškodb in v procesu rehabilitacije po poškodbi. Poškodba je pogosto povezana z nihanjem krvnega pretoka, kar lahko vpliva na temperaturo kože. Vnetje vodi do hipertermije, medtem ko degeneracija, zmanjšana mišična aktivnost in slaba perfuzija povzročijo hipotermičnivzorec.¹⁵ Hildebrandt in ostali so pokazali uporabo termovizije v športni medicini pri poškodbah kolena v alpskem smučanju.⁸ Alpsko smučanje je eden od športov, pri katerem je koleno izpostavljeno visoki obremenitvi, kar lahko vodi do poškodb. Ena takšnih poškodb je koleno skakalca (patelarna tendinopatija), za katero so značilne oteklina, bolečina in občutljivost nad skeletnim mestom tuberositas tibiae. Ta lokalna poškodba se izkaže kot oblika hipertermičnega vzorca, kar je vidno na termovizijski sliki. Treningi v času priprav mnogokrat vključujejo prenaporne skoke, kar vodi do mehanskih nategov in preobremenitve patelarnega ligamenta. Koleno skakalca je pogosto tudi pri drugih športih, kot so ko-

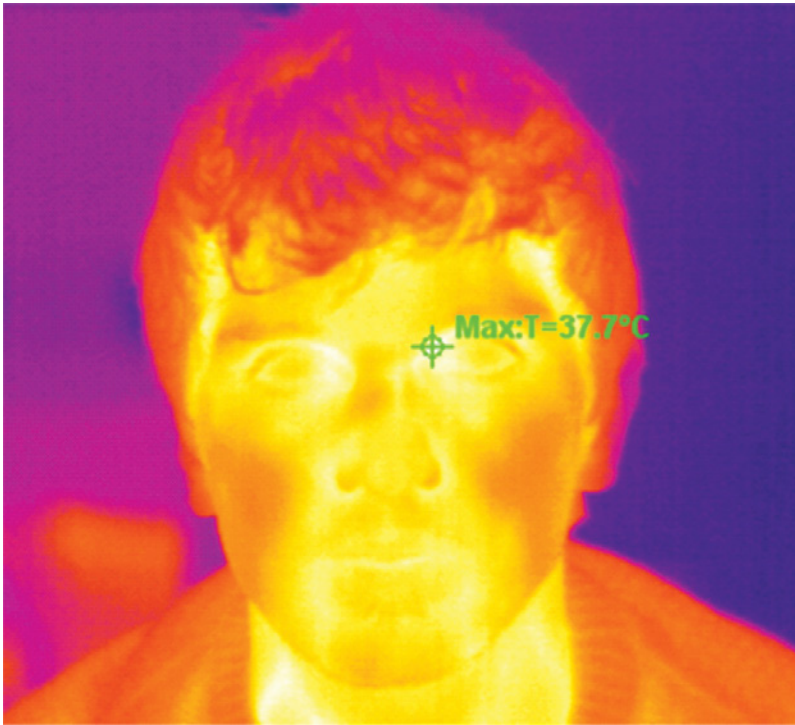
šarka, odbojka, nogomet, atletika, gimnastika, tenis itd.

Med alpskimi smučarji je visoka pojavnost resnih poškodb kolena. Najpogostejša je strganje sprednjih križnih vezi (*angl.* ligamentum cruciatum anterius). Vnetje z oteklino in bolečino je stranski učinek pri takšni poškodbi in ga je mogoče zaznati s termovizijo kot močno hipertermijo okrog pogačice. Termovizijske kamere se lahko uporabljajo kot orodje za zaznavanje zmanjšanja oteklina in vnetja med rehabilitacijo.

Na Sliki 2 levo je prikazan primer zloma podlahtnice, ki je bil posledica padca alpskega smučarja. Slika je nastala pred mavčenjem. Vidno je mesto zloma nad zapestjem leve roke. Po terapiji ni videti temperaturnih razlik med rokama (Slika 2 desno). Redna termovizijska merjenja v času rehabilitacije zagotovijo informacije o procesu zdravljenja, hkrati pa terapevtu omogočajo, da prilagodi program rehabilitacije. To je možno le v primeru, da bolnik nima mavca. Prav tako lahko s termovizijo pridobimo informacijo o sanaciji poškodbe in zmanjšamo verjetnost obnove poškodbe zaradi prehitre vrnitve k športnim dejavnostim. Predlagali so izdelavo podatkovne baze s termovizijskimi slikami, ki bi služila kot sistem za validacijo pri diagnostiki preobremenitev in akutnih poškodb kolena, da bi bilo mogoče razlikovati med normalnimi in nenormalnimi temperaturnimi vzorci.

Onkologija: Rak dojke

Rak dojke je najpogostejša vrsta nekožnega raka pri ženskah in peti najpogostejši vzrok smrti za rakom. Rak dojke je visoko ozdravljiva bolezen s 97-odstotno možnostjo preživetja, če je odkrit dovolj zgodaj. Odkrivanje raka na dojki je bila ena prvih aplikacij termovizije v medicini. Prednosti termovizije so v hitrosti in neinvazivnosti meritev. Termovizijske kamere so prenosljive in omogoča prikaz rezultatov v realnem času. Samo merjenje za bolnico ni boleče in ne povzroča ionizirajočega sevanja. Raziskave za določitev korelacije rezultatov merenj s termovizijo in mamografijo so v teku in so dolgotrajne tako kot večina raziskav v medicini. Prve termograme dojk je objavil Lawson v poznih petdesetih letih prejšnje-



Slika 1: Primer termograma merjenja telesne temperature vročičnega bolnika. Izbrano merilno mesto je bil notranji očesni kot (*lat. commissura palpebrarum medialis*), kar je tudi priporočeno merilno mesto standarda, ki obravnava spremljanje človekove temperature pri mrzlici s termovizijsko kamero. Sodobni termogrami omogočajo tudi analizo podatkov in prikaz izmerjene vrednosti.

ga stoletja. Opazil je, da je venski odvodni sistem iz rakastega področja toplejši od arterijskega dovoda. Uporaba termovizije veliko obeta pri zgodnjem odkrivanju raka na dojkah. Objavljeni članki poročajo o občutljivosti do 90 % in specifičnosti do 88 % za termovizijo v primerjavi z referenčno metodo mamografijo, ki se uporablja v kliničnem okolju kot zlati standard.⁵ Izkušen zdravnik lahko s pomočjo termograma zazna tudi anomalije, kot so ciste. Anomalija na termogramu je pomemben kazalec tveganja za obstoj raka na dojki.^{5,16} Lokalna sprememba temperature na površini kože je lahko posledica nastanka rakastih tvorb v tkivu, kar naknadno potrdimo z mamografijo. Termovizija ni nadomestilo za mamografijo. Sprememba temperature je lahko tudi posledica vnetja in tudi tumor se ne pokaže vedno kot povišana temperatura na površini kože. Termovizija ne omogoča merjenja temperature v globini tkiva pod površino kože. Diagnoza, postavljena samo na podlagi meritev s termovizijskimi kamerami, je nepreverjena, zavajajoča in lahko pusti hude posledice pri zdravljenju. Kljub vsemu pa termovizija vseeno daje dodatno informacijo, zato se obravnava kot komplementarna metoda in ni sprejeta kot samostojna klinična diagno-

stična metoda. Kot takšno jo obravnava tudi Uprava ZDA za hrano in zdravila (FDA).¹⁷

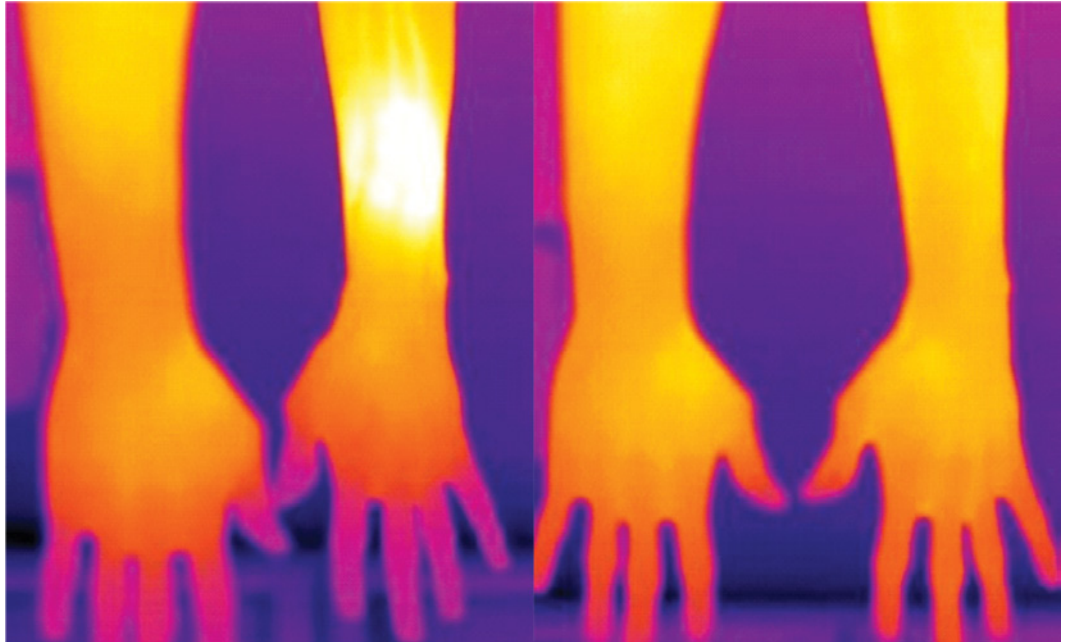
Onkologija: Kožni rak

Pri kožnem raku je zgodnja diagnoza ključnega pomena za uspešno zdravljenje. Prve diagnoze so vedno narejene s pravilom preverjanja ABCD(E), ki temelji na petih lastnostih kožnega znamenja: asimetrija (Asymmetry), rob (Border), barva (Colour), velikost (Dimension) in razvoj (Evolution). Odločitev o malignosti kožnega tumorja je podana na podlagi invazivnih histoloških preiskav. Termovizijo so predlagali kot orodje za razlikovanje med različnimi vrstami kožnega tumorja pri postavljanju diagnoze. Na ta način je mogoče odkriti rakasto tkivo že v zgodnji fazi, hkrati pa se izogniti odvečnim izrezovanjem tkiva. Metoda določanja tipa tumorja s termovizijo temelji na specifičnih termoregulacijskih odzivih na koži po ohladitvi prizadetega območja. Predlagali so klinični postopek za slikanje sumljivih kožnih znamenj. Maligni melanomi hitreje kompenzirajo namerno ohladitev kot zdrava tkiva zaradi povečanega metabolizma in povišane vaskularizacije tumorja. Pri drugih vrstah tumorjev, kot je rak bazalnih celic (bazaliom), se temperatura povišuje počasneje kot pri zdravih tkivih. Tako se razlikuje od drugih vrst kožnega tumorja.¹⁸ Herman in Cetingul sta v svoji raziskavi predlagala postopek uporabe termovizije pri odkrivanju kožnega raka, kar pomeni pomemben korak k standardizaciji metode in tako tudi primerljivosti rezultatov.¹⁹

Nevrologija: Okvara hrbtenjače

Poškodbe in okvare hrbtenjače lahko povzročijo poškodbo živčnih korenin, ki prenašajo signale iz možganov in do možganov. V skrajnem primeru gre za paralizirano. Dub in ostali so pokazali, da se težava s hrbtenjačo, ki se izraža kot bolečina v nogi, lahko opazi s termovizijsko sliko kot hladno področje na nogi. Poročali so, da je temperaturna razlika med nogo s poškodovano in nogo z zdravo živčno korenino lahko tudi več kot 2,5 °C. Uporabnost termovizije se kaže tudi pri rehabilitaciji, ko se opazi zmanjšanje prej omenjene temperaturne razlike med obema nogama.²⁰

Slika 2: Termovizijska slika zloma podlahtnice leve roke pred mavčenjem (levo). Na mestu zloma je vidna hipertermija. Po koncu zdravljenja (desno) temperaturne razlike med obema rokama ni več vidna.



Alergologija: Alergija na hrano

Alergija na hrano je pogost problem v svetu, a diagnostične metode se razlikujejo po učinkovitosti. Oralni provokacijski test, ko bolnik zaužije potencialno alergeno hrano, se široko uporablja pri diagnosticiranju alergije na hrano, vendar subjektivne interpretacije simptomov lahko povzročijo napake. Clark in ostali so uporabili termovizijsko kamero za pomoč pri postavljanju diagnoze po provokacijskem testu. Opazovali so temperaturne razlike na obrazu ob pozitivnem in ob negativnem provokacijskem testu. Pri pozitivnem testu je prišlo do zgodnjega dviga temperature nosu, česar pri negativnem ni bilo mogoče zaznati. Termovizijske slike obraza se lahko uporabljajo tudi kot objektivni in občutljivi kazalci rezultatov oralnega provokacijskega testa.²¹

Nefrologija: Hemodializa

Arteriovenska fistula je žilna povezava med arterijo in veno praviloma na zgornjem nedominantnem udu, narejena s pomočjo kirurškega posega v anesteziji. Arteriovenska fistula je za hemodializne bolnike življenjskega pomena, saj omogoča trajen dostop do obtoka, kar je pogoj za izvajanje hemodialize. Redne vaskularne in klinične preiskave so pomembne za odločanje, ali je fistula še sprejemljiva za redno hemodializo. Lahko pride do številnih zapletov, ko uporaba fistule ni mogoča zaradi zožitve ali

okluzije, kradeža krvnega pretoka rok ali visoke srčne insuficience. Funkcionalnost arteriovenske fistule se oceni z avskultacijo in palpacijo ter z različnimi merilnimi tehnikami, kot so občasna termodilucija, magnetno resonančno slikanje in ultrazvočno merjenje volumskega pretoka. Idealna metoda za oceno funkcionalnosti fistule bi morala biti enostavna, varna, neinvazivna in lahko dostopna. Allen in ostali so predlagali nizkocenovno tehniko slikanja. Primerjali so Dopplerjevo ultrazvočno metodo in termovizijo. V arteriovenski fistuli, pri kateri sta arterija z visokim tlakom in vena z nizkim tlakom povezani kratkostično, priteče sorazmerno topla kri iz srca skozi fistulo in prenaša toploto tudi na tkiva v okolici. Pri zdravem človeku sta leva in desna stran telesa v termični simetriji znotraj 1 °C, zato je s pomočjo termovizijske kamere zaznati in ovrednotiti termično asimetrijo, ki je posledica krvnega pretoka arteriovenske fistule. Bolniki s čezmernim krvnim pretokom skozi fistulo imajo pogosto omejen krvni pretok v dlaneh in zato hladnejše prste na roki s fistulo od roke brez fistule.²²

Plastična, rekonstrukcijska in estetska kirurgija: Rekonstrukcijska dojke

Rekonstrukcija dojke je postala del celotnega zdravljenja raka dojke po mastektomiji. Mnogo študij je pokazalo psihološki, kozmetični in seksualni učinek rekonstrukcije

dojke po mastektomiji. Obstaja več načinov za rekonstrukcijo prsi. Pri avtologni rekonstrukciji gre za rekonstrukcijo z lastnim tkivom. V zadnjem času je vse bolj popularna metoda režnja DIEP (*angl.* Deep Inferior Epigastric Perforator), pri kateri se koža in podkožno tkivo prenese iz spodnjega predela trebuha na torakalno steno. Bolnice, ki se zdravijo s to tehniko, so zadovoljne z naravnim videzom in stalnostjo estetskega rezultata. Presajeno tkivo je odvisno od oskrbe s krvjo iz ene arterije in ene vene. To sta t. i. perforantni žili. Ti žili sta med rekonstrukcijo spojeni z žilami na mestu okvare z uporabo mikrokirurške tehnike, saj je premer teh žil navadno 1–2 mm. De Weerd in ostali so predlagali enostavno in zanesljivo tehniko dinamične termovizije, ki kirurgu pomaga pri izbiri ustreznega tkiva za presaditev, a tudi pri oceni perfuzije v presajenem tkivu med in po operaciji. Metoda je še posebej učinkovita in pomembna v fazi po operaciji, ko je mogoče že dovolj zgodaj zaznati poslabšano perfuzijo in tako pravočasno ukrepati in preprečiti neuspeh rekonstrukcije. Pri uspešni rekonstrukciji je mogoče spremljati vsakodnevno izboljšanje perfuzije, ki se kaže v višji temperaturi presajenega tkiva.²³

Plastična, rekonstrukcijska in estetska kirurgija: Opeklina

Pravilna diagnostična ocena globine opeklinske rane je najpomembnejša pri izbiri načina zdravljenja rane. Moderni pristop določanja globine opeklina kože skuša razrešiti problematiko celjenja in ustrezne izbire zdravljenja. Tradicionalni pristop razlikuje med naslednjimi stopnjami opeklinskih ran: I., superficialna (eritem); II.a, superficialna dermalna (uničen del epidermisa); II.b, globoka dermalna (ves epidermis in del coriuma), III., uničena koža po celotni debelini. Pravilno kvalificiranje opeklina prve in tretje stopnje je v klinični praksi enostavno še za neizkušenega zdravnika. Razlikovanje med stopnjama II.a in II.b je problematično. Klinična ocena na podlagi vizualnega pregleda zagotovi od 50 % do 70 % natančnosti razlikovanja posameznih primerov. Za izbiro ustreznega načina zdravljenja opeklinskih ran je velika

potreba po enostavni metodi, ki bi omogočila točno razlikovanje med stopnjami opeklina. Referenčna metoda pri oceni globine opeklina je redko uporabljena histopatološka preiskava, ki pa je invazivna, lokalna in časovno potratna. Renkielska in ostali so predstavili termovizijo kot orodje za oceno globine ran in za spremljanje celjenja ran. Uporabili so metodo aktivne dinamične termovizije, pri kateri so na prizadetem območju vzbujali termične pulze in merili termično časovno konstanto prizadete območja. Razlikovanje med stopnjami opeklina temelji tudi na izmerjeni absolutni temperaturi kože. Visoka temperatura kože pomeni superficialno stopnjo opeklinske rane, ki je običajno ozdravljiva, opeklina tretje stopnje pa se izkaže kot nizka temperatura kože na termogramu.²⁴ Za potrditev metode, kar pomeni tudi razlikovanje med stopnjama II.a in II.b, so potrebne dodatne raziskave, na osnovi katerih bo možno z zadovoljivo verjetnostjo razlikovati med različnimi stopnjami opeklina.

Dermatologija: Psoriaza

Psoriaza ali luskavica je kronična vnetna kožna bolezen, ki prizadene do 4 % svetovnega prebivalstva. Za psoriazo je značilno tanjšanje zrnate plasti (stratum granulosum) v epidermisu (hiperparakeratoza), kožno vnetje z vaskularnimi spremembami, kot je oblikovanje novih žil in širjenje njihove svetline. Te anomalije lahko povzročijo spremembe temperature na površini kože. Domnevno mikrovaskularne anomalije in vnetje najbolj vplivajo na nastajanje psoriatičnih plakov. Psoriaza v plakih se pogosto vidi kot rdeče-bele luskave krpice na najvišjem sloju kože. Zalewska in ostali so s pomočjo termovizijske kamere opazovali temperaturo psoriatičnih sprememb na zgornjih in spodnjih udih, prsih in hrbtu. Opazili so povišanje temperature na prsih in zgornjih udih s psoriazo. Nasprotno so pri kožnih spremembah na hrbtu in spodnjih udih zaznali nižjo temperaturo. Na podlagi izmerjenih temperatur so zaključili, da je širjenje psoriaze na spodnjem delu telesa počasnejše v primerjavi z zgornjim.²⁵

Diabetologija: Diabetično stopalo

Pri diabetičnem stopalu pride pogosto do okužbe ali celo do gangrene stopala zaradi arterijskih anomalij in diabetične nevropatije, kot tudi nagnjenja k počasnejšem celjenju ran zaradi diabetesa. Pogostejši razlog za poškodbo diabetičnega stopala zaradi diabetične nevropatije je slabše ali celotno pomanjkanje občutenja bolečine. Razjede na stopalih (perforirajoči ulkus stopala) se značilno pojavijo na delih podplata, ki se dotikajo podlage. To so največkrat področja pod glavami metatarzusa na bazalnih delih prstov ali pod petnico. Razjede lahko nastanejo tudi zaradi manjših poškodb pri striženju nohtov ali obrezovanju kurjih očes ter opeklinah z vročo vodo. Ulkus diabetičnega stopala je ena glavnih težav pri diabetesu. Pojavi se pri skoraj 15 % oseb z diabetesom in pred 80 % vseh amputacij spodnjega dela nog. Okužba ulkusa lahko vodi do okužbe sosednjih kosti (osteomielitis). Da se izognemo resnejšim težavam, je potrebno zgodnje odločno antibiotično zdravljenje. Na žalost so klinične diagnoze in radiološke preiskave lahko neučinkovite ravno v zgodnji fazi osteomielitisa, ko je antibiotično zdravljenje najučinkovitejše. Harding in ostali so predlagali termovizijo kot orodje za zgodnje odkrivanje osteomielitisa za preprečenje nadaljnjih zapletov, ki lahko vodijo do amputacije stopala. Njihova študija je pokazala vidno povišanje temperature ne le okrog razjede, ampak celotnega stopala. To metodo so kasneje potrdili s klinično radiološko metodo. Uspešnost odkrivanja osteomielitisa s termovizijo je bila več kot 80 %.²⁶

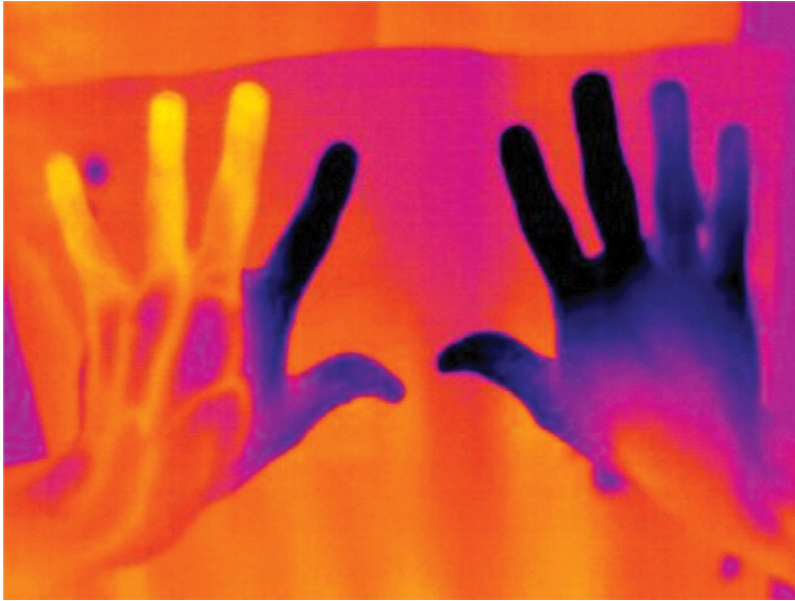
Revmatologija: Raynaudov fenomen

Raynaudov fenomen je vazospastična motnja, za katero je značilen pretiran vazokonstriktični odziv na mraz ali psihični stres. Simptomi Raynaudovega fenomena se kažejo v ciklični spremembi barve prstov, ušes in nosu. Odziv na zoženje manjših arterij se kaže v bledici. Pomodrelost nastane, ker koža ne dobi dovolj krvi, bogate s kisikom. Nastopi lahko tudi občutek mraza in odrevenelost. Ko se sčasoma žile razširijo in sprostijo kri, pride do pordelosti prizadetega dela. V prstih rok in nog se lahko pojavi

utripanje žil in mravljinčavost. Pomembno je razločevati med primarnim in sekundarnim Raynaudovim fenomenom. Pri primarni obliki so simptomi idiopatski, torej se pojavijo samostojno in ne v povezavi s kakšno drugo boleznijo. Sekundarni Raynaudov fenomen se pojavi kot stranski učinek na širok spekter različnih pogojev. Pojavi se v povezavi s številnimi boleznimi. V skrajnih primerih lahko sekundarna oblika vodi do nekroze ali gangrene konic prstov. Pri diagnosticiranju Raynaudovega fenomena se uporablja hladna kopel, v katero pacient pomoči roko, nato pa se spremlja odziv na mraz. Z merjenjem temperature roke in izračunom gradientov temperature si lahko pomagamo pri razlikovanju med primarnim in sekundarnim Raynaudovim fenomenom. Termovizijo so predlagali kot eno od metod za klinično diagnosticiranje Raynaudovega sindroma. Druge tehnike, ki so bolj zahtevne in dolgotrajne, so lasersko ali dopplersko merjenje pretoka krvi, fotopletizmografija in kapilarna mikroskopija.²⁷

Maksilofacialna in oralna kirurgija: Pregled uporabe

Pri sialotiliasi gre za stanje, ko nastaja kamen v žlezah slinavkah. Navadno pride do pojava v submandibularni žlezi, kjer kamen prizadene Whartonov kanal. Na področju prizadete žleze pride med in po hranjenju do bolečine in otekline, prav tako se poveča izločanje sline. Na termogramu (Slika 4, levo) je mogoče opaziti temperaturno razliko na mestu, kjer je nastal kamen. Tako kot pri že obravnavanih oblikah pojava raka pride tudi pri pojavu raka vratu do povečanega pretoka krvi na območju tumorja. Na Sliki 4 sredina je moč rak vratu identificirati kot bele lise (visoka temperatura) na vratu. Ranula je cista na ustnem dnu, ki nastane zaradi obstrukcije izvodil podčeljustnih oziroma podjezičnih žlez slinavk. Prikazano je bilo, da je temperatura ustnega dna na mestu ranule za 0,3 °C višja od okolice prizadetega območja. Termogram, ki prikazuje ranulo, je na sliki 4 desno.²⁸ Ustna sluznica opravlja veliko pomembnih funkcij, med drugim omogoča absorpcijske in sekrecijske procese. Dąbrowski in ostali²⁹ so izvedli študijo, v kateri so želeli ustvariti model



Slika 3: Odziv na mraz pri bolniku z Raynaudovim fenomenom.

temperaturnih sprememb ustne sluznice pri normalnih fizioloških pogojih in pri patoloških pogojih. Pokazali so, da je v stanju akutnega vnetja temperaturna razlika merjene površine višja kot v normalnih pogojih. Prav tako je višja tudi absolutna temperatura ustne sluznice, medtem ko je pri kronični bolezni temperatura sluznice nižja, temperaturna razlika pa podobna kot v normalnih pogojih.

Ostalo

Ta članek podrobno obravnava le nekaj primerov uporabe termovizije v medicini. Številne publikacije opisujejo termovizijo kot možnost diagnostičnega orodja pri osteoartritisu,³⁰ sindromu karpalnega kanala,³¹ teniškem komolcu,³² boleznih ščitnice.³³ Raziskane so bile tudi fiziološke reakcije pri masaži³⁴ in učinki krioterapije v medicini športa.³⁵ Predstavljeni primeri prikazujejo raznolikost uporabe termovizije kot potencialne klinične diagnostične metode v medicini.

Priporočila za uporabo in standardi

Priporočila

Za pravilno interpretiranje rezultatov, izmerjenih s termovizijsko kamero, so zelo pomembne ustrezne lastnosti kamere, merilni postopek, priprava merjenca in pogoji okolice. Termovizijska kamera, primerna za ovre-

dnotenje temperaturnega profila človeške kože, mora imeti visoko prostorsko ločljivost. Minimalna zahteva je kamera z ločljivostjo 320×240 točk (detektorjev) z visoko temperaturno ločljivostjo $0,1^\circ\text{C}$ pri temperaturi 30°C in z mejnim pogreškom $\pm 1^\circ\text{C}$. Termovizijska kamera mora biti za uporabo v medicini umerjena v ozkem merilnem območju, prilagojenem telesni temperaturi človeka ($20^\circ\text{C} - 42^\circ\text{C}$). Priporoča se, da kamera vsebuje oznako CE za medicinske pripomočke. Za potrebe preiskav mora proizvajalec termovizijske kamere zagotoviti programsko opremo, ki omogoča analizo podatkov in izpis izvida.^{5,8}

Kljub primerni opremljenosti se je potrebno izogniti nekaterim motnjam, ki neposredno vplivajo na kakovost meritve. Bolnik nekaj dni pred preiskavo s termovizijsko kamero preiskovano mesto ne sme izpostavljati soncu. Prav tako se ne priporoča uporaba ličil, krem in losjonov za telo. Če je na preiskovanem mestu potrebno odstraniti dlake, naj se to stori vsaj 4 ure pred preiskavo. Pred preiskavo je nezaželeno uživanje alkohola in kajenje ter nošenje oprijetih oblačil. Prostor, v katerem poteka preiskava, mora biti toplotno ugoden za bolnika. Primerna pogoja sta sobna temperatura med 18°C in 25°C ter relativna vlažnost med 40 % in 75 %. Pogoji okolja morajo biti kontrolirani in ves čas merjeni. Bolnik mora biti v prostoru, kjer poteka meritev, vsaj 15 minut pred preiskavo, da telo doseže toplotno ravnovesje z okolico. Prav tako se priporoča, da bolnik v tem času miruje in da ima preiskovano mesto odkrito.^{5,15}

Standardi

Po izbruhu pandemije SARS-a se je izoblikovala skupina strokovnjakov iz celega sveta, ki je pet let pripravljala standard na področju uporabe termovizije v medicini z oznako IEC 80601-2-59:2008 Medicinska električna oprema-2-59. del: Posebne zahteve za osnovno varnost in bistvene lastnosti presejalnih termografov za spremljanje človekove temperature pri mrzlici. Temu standardu je sledilo tehnično poročilo delovne skupine z oznako ISO/TR 13154:2009 ISO/TR 80600: Medicinska električna



Slika 4: Termovizijske slike patoloških pojavov na področju dentalne medicine. Sialolitiza (levo) je vidna kot temperaturna razlika na mestu, kjer je nastal kamen. Rak vratu (sredina) predstavljajo bele lise na vratu, kjer je temperatura na površini kože višja. Mesto, kjer je nastala ranula (desno), ima za 0,3 °C višjo temperaturo od okolice prizadetega področja.

oprema—uvajanje, izvajanje in smernice za identifikacijo oseb v vročičnem stanju z uporabo presejalnih termografov. Omenjena dokumenta ne samo da narekujeja standarde v proizvodnji in praktični uporabi, ampak tudi opisujeta kalibracijske postopke. Merjenja za zaznavanje povišane telesne temperature zahtevajo kalibrirane termovizijske kamere s kratko žariščno razdaljo.² Za ustrezno kalibriranje je pomemben referenčni temperaturni vir.¹¹ Točnost merjenja je odvisna tudi od razdalje med merjencem in kamero.¹⁴ Predlagana razdalja je en meter, tako da je notranji očesni kot zajet z 9–16 piksli.² Pomembno je, da so pogoji okolice nadzorovani, saj spremembe sobne temperature in relativne vlažnosti vplivajo na meritve temperature. Trenutno standardi zajemajo le uporabo termovizijskih kamer v primeru povišane telesne temperature. S kalibracijo termovizijskih kamer je zagotovljena sledljivost do nacionalnih in mednarodnih etalonov za termodinamsko temperaturo. Samo na takšen način lahko pridemo do zanesljivih in primerljivih merilnih rezultatov.^{13,36}

Laboratorij za metrologijo in kakovost je na podlagi dolgoletnih izkušenj na področju termovizije dobil povabilo za sodelovanje pri reviziji standarda IEC 80601-2-59:2008.

Zaključek

Termovizija se je na energetskem, varnostnem, vojaškem ter številnih industrijskih področjih že izkazala za zanesljivo merilno metodo. Na podlagi predstavljenih primerov je razvidno, da je tudi v medicini možnost uporabe termovizije zelo široka. V mnogih primerih se bolezenska stanja pokažejo kot hiper- oz. hipotermič-

ni vzorci, kajti gre v osnovi predvsem za vnetja in povečanje oz. zmanjšanje pretoka telesnih tekočin v določenem tkivu. Tu se kaže potencial termovizije kot diagnostične metode, s katero je mogoče zaznati takšne termične anomalije na površini kože ali pa pri kirurškem posegu kar na samem tkivu. Pred že uveljavljenimi kliničnimi diagnostičnimi orodji, kot so ultrazvok, rentgen in mamografija, ima termovizija določene prednosti. Ta metoda je hitra, neinvazivna, brez stika in bolniku prijazna. Diagnostika s termovizijo za pacienta ni nevarna, saj ni izpostavljen ionizirajočemu sevanju. S termovizijskimi kamerami merimo temperaturo površine kože in ne omogočajo merjenja v globini. Problematika termovizije je predvsem v standardizaciji diagnostične metode, ki je nujno potrebna za pridobitev zanesljivih, primerljivih in sledljivih rezultatov. Standardizacija se ne navezuje le na tehnično opremo in njeno vzdrževanje, ampak tudi na uporabo oziroma postopek uporabe metode, ki vsebuje tudi priporočila o pripravi bolnika in o pogojih okolice. Primer takšne standardizacije je bil narejen na področju merjenja telesne temperature s termovizijskimi kamerami. Tako kot pri vseh slikovnih orodjih, ki se uporabljajo v medicini, ima tudi pri termoviziji velik vpliv pripadajoča programska oprema. Programi so vse bolj zmogljivi in omogočajo zdravniku obdelavo termogramov, kar olajša uporabo in poveča zanesljivost metode. Zanesljivost pa poveča tudi dobro poznavanje merilne problematike. Na podlagi termograma, pri katerem je merilni rezultat podan relativno, zgolj kot toplo ali hladno območje, je mogoče določiti trend. Zanesljive in primerljive meritve morajo biti opravljene s kalibrirano opremo, merilni rezultat pa podan v absolu-

tnih vrednostih. Poleg podatka o izmerjeni vrednosti s pripadajočo mersko enoto mora merilni rezultat vsebovati tudi informacije o korekciji, merilni negotovosti in faktorju pokritja.³⁷ Le na takšen način je zagotovljena sledljivost rezultatov do mednarodnega sistema enot SI in le takšne meritve omogočajo zanesljivejše odločanje medicinskega osebja o diagnozi ali o nadaljnjem poteku zdravljenja. Podobno se je merilna problematika že obravnavala pri merjenju krvnega tlaka z avtomatskimi oscilometričnimi sfigmomanometri.³⁸⁻⁴⁰ Tako kot v primeru oscilometričnih sfigmomanometrov mora stroka določiti priporočila, katerim bi morale termovizijske kamere ustrezati, da bi dosegle lastnosti (natančnost, zanesljivost, robustnost) referenčnih metod. Določila bi tudi postopke kalibriranja kamer, določanja rekalibracijskega intervala, postopka zagotavljanja sledljivosti izmerjenih vrednosti in tako primerljivosti rezultatov.

Prednost termovizije je tudi v ceni, saj je nakup in vzdrževanje opreme veliko cenejše v primerjavi z uveljavljenimi kliničnimi metodami. Uvajanje nove tehnologije

v vsakodnevno klinično prakso zahteva veliko število primerjalnih meritev z referenčnimi metodami. Da bi termovizija kot trenutno nova metoda na področju medicine pridobila na zaupanju in zanesljivosti, je nujno potrebno sodelovanje na multi- in interdisciplinarni ravni med medicinsko in tehnično stroko, saj je le tako možno doseči standardizacijo metode in zagotoviti primerljivost rezultatov po vsem svetu.

Laboratorij za metrologijo in kakovost na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani si kot nosilec nacionalnega etalona za termodinamsko temperaturo z dolgoletnimi praktičnimi izkušnjami in intenzivnim mednarodnim sodelovanjem na področju termometrije prizadeva uporabo termovizije kot merilno metodo razširiti tudi na področje medicine. Med pomembnejše dosežke laboratorija na področju medicine štejejo sodelovanje pri oblikovanju mednarodnega standarda za klinične termometre namenjene merjenju telesne temperature ter publikacije na temo ušesnih infrardečih termometrov.⁴¹⁻⁴⁴

Literatura

1. Ring EFJ. The historical development of thermal imaging in medicine. *Rheumatology* 2004; 43: 800-2.
2. Ring EFJ, McEvoy H, Jung A, Zuber J, Machin G. New standards for devices used for the measurements of human body temperature. *J Med Eng Technol* 2010; 34: 249-53.
3. Evropska komisija. Direktiva 2007/51/ES glede omejitev pri trženju nekaterih merilnih naprav, vsebujočih živo srebro, 2007. Strasbour, Francija.
4. Evropska komisija. Direktiva 2002/95/ES o omejevanju uporabe nekaterih nevarnih snovi v električni in elektronski opremi, 2003. Bruselj, Belgija.
5. Ng EY-K. A review of thermography as promising non-invasive detection modality for breast tumor. *Int J Therm Sci* 2008; 48: 849-59.
6. Pušnik I. Razvoj in analiza sistema za ovrednotenje metroloških parametrov in zagotavljanje sledljivosti brezkontaktnih termometrov [PhDThesis]. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko; 2004.
7. Miklavc A. Sistem za umerjanje termovizijskih kamer [PhDThesis] Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko; 2011.
8. Hildebrandt C, Raschner C, Ammer K An Overview of Recent Application of Medical Infrared Thermography in Sports Medicine in Austria. *Sensors* 2010; 10: 4700-4715.
9. Ring EFJ, Jones BF. The Historical Development of Thermometry and Thermal Imaging in Medicine. In: Bronzino JD. *Medical Devices and Systems*. 3rd ed. Boca Raton: CRC press, Taylor&Francis Group; 2006.
10. Ring EF, Ammer K. Infrared thermal imaging in medicine. *Phys Meas* 2012; 33: R33-R46
11. Ring EFJ, Jung A, Zuber J, Rutowski P, Kalicki B, Bajwa U. Detecting Fever in Polish Children by Infrared Thermography. 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography; 2008 Jul 2-5; Krakow, Poland. p. 125-8.
12. Mercer JB, Ring EFJ. Fever screening and infrared thermal imaging: concerns and guidelines. *Thermology International* 2009; 19: 67-9.
13. International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 80601-2-59: 2008 Medicinska električna oprema-2-59. del: Posebne zahteve za osnovno varnost in bistvene lastnosti presejalnih termografov za spremljanje človekove temperature pri mrzlici, 2008. Ženeva, Švica.
14. Cheung BMY, Chan LS, Lauder I, Kumana CR. Detection of Human Body Temperature with Infrared Thermographic Imaging: Accuracy and Feasibility in Detection of Fever in Human Subjects. Research Fund for the Control of Infectious Diseases, Final Report 2008.

15. Ring EF, Ammer K. Thermal Imaging in Diseases of the Skeletal and Neuromuscular Systems. In: Diakides M, Bronzino JD, Peterson DR. *Medical Infrared Imaging: Principles and Practices*. 1st ed. Boca Raton: CRC press; 2012.
16. Qi H, Kuruganti PT, Snyder WE. Detecting Breast Cancer from Thermal Infrared Images by Asymmetry Analysis, In: Diakides M, Bronzino JD, Peterson DR. *Medical Infrared Imaging: Principles and Practices*. 1st ed. Boca Raton: CRC press; 2012.
17. [17] Food and Drug Administration (FDA). *Consumer Health Information: Thermogram No Substitute for Mammogram*, 2011. Silver Spring, Maryland, USA.
18. Buzug TM, Schumann S, Pfaffmann L, Reinhold U, Ruhlmann J. Skin-tumour classification with functional infrared imaging. *Proceedings of the 8th IASTED International Conference Signal and ImageProcessing*; 2006 Aug 14–16; Honolulu, Hawaii, USA. p. 313–22.
19. Herman C, Cetingul M P. Quantitative visualization and detection of skin cancer using dynamic thermal imaging. *J Vis Exp* 2011; 51: 2679
20. Dub P, Drastich A, Novak Z, Riha I. Thermography in Nerve Root Diseases. *Thermology International* 2002; 12: 76–9.
21. Clark AT, Mangat JS, Tay SS, King Y, Monk CJ, White PA, et al. Facial thermography is a sensitive and specific method for assessing food challenge outcome. *Allergy* 2007; 62: 744–9.
22. Allen J, Oates CP, Chishti AD, Ahmed IAM, Talbot D, Murray A. Thermography and colour duplex ultrasound assessments of arterio-venous fistula function in renal patients. *Physiol Meas* 2006; 27: 51–60.
23. De Weerd L, Weum S, Mercer J B. The value of dynamic infrared thermography (DIRT) in perforator selection and planning of free DIEP flaps. *Ann Plast Surg* 2009; 63: 278–83.
24. Renkielska A, Nowakowski A, Kaczmarek M, Ruminski J. Burn depths evaluation based on active dynamic IR thermal imaging – A preliminary study. *Burns* 2006; 32: 867–75.
25. Zalewska A, Gralewicz G, Owczarek G, Wiecek B. Thermography in psoriasis vulgaris evaluation. *Proceedings of the IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference*; 2005 Sep 1–4; Shanghai, China. p. 627–30.
26. Harding JR, Wertheim DF, Williams RJ, Melhuish JM, Banerjee D, Harding KG. Infrared imaging in diabetic foot ulceration. *Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*; 1998 Oct 29 – Nov 1; Hong Kong, China. p. 916–8.
27. Ammer K. Cold challenge to provoke a vasospastic reaction in fingers determined by temperature measurements: a systematic review. *Thermol Int* 2009; 19: 109–18.
28. Bojkovski J, Đurđević D. Diagnostic of maxillofacial pathology. *XX IMEKO World Congress Metrology for Green Growth*; 2012 Sep 9–14; Busan, Republic of Korea.
29. Dąbrowski M, Dulski R, Żmuda S, Zaborowski P, Pogorzelski C. The use of thermovision camera to observe physiological and pathological conditions of oral cavity mucous membrane. *Infrared Phys Techn* 2002; 43: 265–9.
30. Varju G, Pieper CF, Renner JB, Kraus VB. Assessment of hand osteoarthritis: correlation between thermographic and radiographic methods. *Rheumatology* 2004; 43: 915–9.
31. Jesenšek Papež B, Palfy M, Turk Z. Infrared Thermography Based on Artificial Intelligence for Carpal Tunnel Syndrome Diagnosis. *J Int Med Res* 2008; 36: 1363–70.
32. Thomas D, Siahamsi G, Marion M, Boyle C. Computerised infrared thermography and isotopic bone scanning in tennis elbow. *Ann Rheum Dis* 1992; 51: 103–7.
33. Helmy A, Holdmann M, Rizkalla M. Application of Thermography for Non-Invasive Diagnosis of Thyroid Gland Disease. *IEEE T Bio-Med Eng* 2008; 55: 1168–75.
34. Sefton JM, Yazar C, Berry JW, Pascoe DD. Therapeutic massage of the neck and shoulders produces changes in peripheral bloodflow when assessed with dynamic infrared thermography. *J Altern Complement Med* 2010; 16: 723–32
35. Selfe J, Hardaker N, Whitaker J, Hayes C. An investigation into the effect on skin surface temperature of three cryotherapy modalities. *Thermol Int* 2009; 19: 121–6.
36. International Organization for Standardization. ISO/TR 13154: 2009 ISO/TR 80600: Medical electrical equipment – Deployment, implementation and operational guidelines for indentifying febrile humans using a screening thermograph, 2009. Ženeva, Švica.
37. Urad RS za standardizacijo in meroslovje. *Mednarodni slovar osnovnih in splošnih izrazov s področja meroslovja*. Ljubljana: Urad RS za standardizacijo in meroslovje; 1999.
38. Geršak G, Drnovšek J. Avtomatski merilniki krvnega tlaka za domačo rabo – Ali jim lahko zaupamo? *Zdrav Vest* 2009; 78: 1–7.
39. International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 80601–2-30: 2009 Medical electrical equipment–Part 2–30: Particular requirements for basic safety and essential performance of automated non-invasive sphygmomanometers, 2009. Geneva, Switzerland.
40. International Organization for Standardization (ISO). ISO 81060–2: 2013 Non-invasive sphygmomanometers–Part 2: Clinical investigation of automated measurement type, 2013. Geneva, Switzerland.
41. International Organization for Standardization (ISO). ISO 80601–2-56: 2009 Medical electrical equipment – Part 2–56: Particular requirements for basic safety and essential performance of clinical

- cal thermometers for body temperature measurement, 2009. Geneva, Switzerland.
42. Pušnik I, Miklavc A. Dilemmas in measurement of human body temperature. *Instrum Sci Technol* 2009; (5): 516–30.
 43. Pušnik I, Drnovšek J. Infrared ear thermometers – parameters influencing the IR reading and accuracy. *Phys Meas* 2005; 26: 1075–84.
 44. Pušnik I, van der Ham E, Drnovšek J. IR ear thermometers: what do they measure and how do they comply with the EU technical regulation?. *Phys Meas* 2004; 25: 699–708.