

Antoni NOWAKOWSKIPOLITECHNIKA GDAŃSKA, KATEDRA INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI,
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk**Obrazowanie termiczne w podczerwieni w diagnostyce medycznej – stan i perspektywy**

Prof. dr hab. inż. Antoni NOWAKOWSKI



Twórca i przez 22 lata kierownik Katedry Inżynierii Biomedycznej na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej. Jego zainteresowania obejmują zagadnienia związane z biocybernetyką i inżynierią biomedyczną, pomiarami wielkości nieelektrycznych, monitoringiem środowiska - wody i powietrza, sensorami, nieinwazyjną diagnostyką medyczną. Opublikował ponad 400 prac naukowych, uzyskał 13 patentów, jest autorem wielu wdrożeń, wypromował 17 doktorów.

e-mail: antowak@biomed.eti.pg.gda.pl

Streszczenie

Omówiono stan i perspektywy rozwoju techniki obrazowania termicznego w podczerwieni w diagnostyce medycznej. Jest to dziedzina szybko rozwijająca się, o sporych możliwościach aplikacyjnych ze względu na unikalne cechy łączące możliwości obrazowania zarówno procesów fizjologicznych, funkcjonalnych, jak i badań o charakterze strukturalnym. W szczególności omówiono postępy w rozwoju Aktywnej Termografii Dynamicznej. Przedstawiono wybrane zastosowania w praktyce klinicznej, które zilustrowano wynikami uzyskanymi we współpracy z szeregiem klinik GUMed.

Słowa kluczowe: termografia w podczerwieni, aplikacje medyczne, ADT.

IR-thermal imaging in medical diagnostics – the state of the art and perspectives**Abstract**

This paper is devoted to developments of IR-thermal imaging in medicine. Most authors active in this field issued the monograph [1]. Some of them are members of the *European Society of Thermology*; some are specialists in QIRT – *Quantitative InfraRed Thermography*, too. Recently they participated to the 132 ICB Seminar “*Advances of InfraRed thermal imaging in medicine*” in Warsaw, July 2013. Here the conclusions of this meeting are summarised. IR-thermal imaging for many years was classified; finally in sixties of XX Century in the USA one of military cameras was applied to medical diagnostics, starting a new imaging modality [2]. Discovery of this technology in medicine was regarded at this time as almost a miracle – a versatile and absolutely non-invasive, objective and quantitative modality. Unfortunately due to lack of standards and miss-use of cameras in thermal mammography, medical professionals for many years gave up this modality. It took many years to recover this very useful technology and to place it as one of the most important modern diagnostic tools, again [3]. The milestone factors are quantification of IR-thermal imaging in 80-ties, development of quantitative NDT (non-destructive testing) methods in 90-ties [4], development of compact IR-cameras with FPA un-cooled detectors, around 2000 [5] and development of dynamic IR-thermal imaging algorithms: active dynamic thermography ADT and thermal tomography TT [6], thermographic signal reconstruction TSR [7], which made the technology matured, relatively inexpensive and easily available on the market. Some results of research grants devoted to applications of thermography in medical diagnostics performed in the Department of BME GUT with several clinics of GUMed are shown.

Keywords: IR-thermal imaging, medical diagnostics, ADT.

1. Wprowadzenie

Tekst tej pracy ma odniesienie do aktualnie wydanej monografii [1], w której prace z obszaru termografii w medycynie opublikowała większość obecnie aktywnych w tej dziedzinie autorów. Część z nich to członkowie *the European Society of Thermology*, organizacji łączącej kilka narodowych stowarzyszeń termologii w medycynie, niektórzy są też aktywni w stowarzyszeniu QIRT –

Quantitative InfraRed Thermography. Ostatnio wielu z nich uczestniczyło w 132 Seminarium “*Advances of InfraRed thermal imaging in medicine*” zorganizowanym w Międzynarodowym Centrum Biocybernetyki w Warszawie, 1–3 lipca 2013, gdzie dyskutowano postępy termografii w medycynie.

Obrazowanie termiczne w podczerwieni staje się jedną z bardziej popularnych technik diagnostyki w medycynie. Rozpoczęło się spektakularnie, gdy na początku lat sześćdziesiątych XX wieku wypróbowano wojskową kamerę podczerwieni do zobrazowania rozkładów temperatury na powierzchni ciała ludzkiego [2]. Pierwsze aplikacje dotyczyły wykrywania nowotworów piersi i oceny ran oparzeniowych, ale potencjalnie pojawiły się możliwości bardzo uniwersalnego diagnozowania wszystkich przypadków powodujących zwiększenie lub spowolnienie metabolizmu, manifestowane przez zmiany temperatury na powierzchni ciała pacjenta. Niestety nadmierny entuzjazm świata medycznego szybko został ostudzony niezbyt dobrymi wynikami tej diagnostyki, co było spowodowane słabą wówczas jakością kamer podczerwieni i brakiem procedur standardowych. Historia ta była szczegółowo opisana w pracach pokazujących rosnące ponownie znaczenie termografii w medycynie [3, 5]. Istotne wydarzenia w rozwoju technologii podczerwieni obejmują cyfryzację kamer w latach 80-dziesiątych, rozwój metod badań nieniszczących dekadę później [4], następnie postępy technologii detektorów podczerwieni, a w szczególności opracowanie stosunkowo tanich, niechłodzonych matryc FPA (focal plane array), około roku 2000 [5], wreszcie opracowanie i zastosowanie w diagnostyce medycznej metod badań dynamicznych: ADT - aktywnej termografii dynamicznej i TT - tomografii medycznej [6], a także TSR - algorytmów rekonstrukcji sygnału termograficznego [7], co w efekcie spowodowało, że termografia stała się technologią dojrzałą i łatwo osiągalną ze względu na szybko malejące ceny dobrych kamer.

Wymienione wyżej sposoby analizy obrazów termicznych w podczerwieni obejmują:

1. Klasyczną, statyczną termografię podczerwieni - ST, gdzie pomiar dotyczy rozkładów temperatury na powierzchni ciała pacjenta – są to z natury badania funkcjonalne, niespecyficzne; sygnałem jest wartość bezwzględna temperatury lub jej różnica.
2. Badania właściwości termicznych tkanki, najczęściej określane na drodze analizy termicznych procesów przejściowych, po zastosowaniu znanego pobudzenia termicznego, metody ADT i TT; są to badania strukturalne, pokazujące rozkłady geometryczne tkanki o zmienionych właściwościach termicznych, to jest przewodności i pojemności cieplnej.

Są to dwa odmienne sposoby pomiaru, niosące inną jakościowo informację diagnostyczną. Każda z tych metod ma swoje zalety, ale i ograniczenia, co opisano w kolejnych paragrafach.

W dalszej części przedyskutowano najważniejsze problemy z zakresu zastosowań obrazowania termicznego w podczerwieni w medycynie. Przykłady ilustrujące rozwój takich aplikacji pochodzą głównie z prac zrealizowanych w Katedrze Inżynierii Biomedycznej Politechniki Gdańskiej we współpracy z szeregiem klinik Gdańskiego Uniwersytetu Medycznego. Ze względu na przeglądowy charakter pracy zachęcamy do sięgnięcia do cytowanych pozycji, gdzie szczegółowo opisano wyniki prowadzonych badań.

2. Termografia statyczna w medycynie

ST wizualizuje rozkłady temperatury na powierzchni ciała pacjenta. Jest to ważna informacja diagnostyczna mówiąca o właściwościach funkcjonalnych organizmu. Uwidacznia obszary o podwyższonym metabolizmie, np. zwiększonym ukrwieniu, manifestowane przez podwyższenie temperatury, jak i o obniżo-

nym metabolizmie czy martwicy – obniżona temperatura. Obszar zastosowań klinicznych termografii jest bardzo obszerny, patrz np. [5], warto jednak podkreślić, że pomimo wielu lat doświadczeń wartość diagnostyczna mierzona dokładnością, czułością i specyficznością metody pozostaje ograniczona, przykładowo w ocenie ilościowej ran oparzeniowych na poziomie ok. 80% [8].

Sytuacji tej nie zmieniają w zasadniczy sposób postępy technologii w konstrukcji termograficznych kamer pomiarowych, gdyż ograniczenia wynikają głównie z tytułu procesów fizjologicznych i warunków środowiskowych. Jednak zwiększenie rozdzielczości geometrycznej do poziomu sięgającego nawet megapikseli i rozdzielczości temperaturowej kamer niechłodzonych do poziomu 50-80 mK, przy rejestracji nawet 60 obrazów na sekundę powoduje, że technicznie obrazy statyczne i wolnozmiennie są wyśmienitej jakości, a widoczny ostatnio spadek cen takiej aparatury i jej duża podaż powodują, że jest ona łatwo dostępna i w porównaniu z innymi zaawansowanymi systemami obrazowania diagnostycznego relatywnie tania. Fakty te powodują widoczny wzrost zainteresowania taką aparaturą i jej rosnące znaczenie w diagnostyce medycznej. Warto dodać, że w Chinach popularność takiej aparatury jest ogromna, znacznie przewyższając sytuację na rynkach amerykańskim i europejskim.

Na ile wiarygodny jest sygnał podczerwieni rejestrowany przez kamerę termograficzną? Odpowiedź na tak zadane pytanie nie jest łatwe. Bardzo korzystną cechą tkanki biologicznej jest wysoka wartość jej współczynnika emisji, około 0,98, a więc prawie idealnie - tyle, co tzw. ciało doskonale czarne. Z tego punktu widzenia sygnał podczerwieni jest wiarygodny, choć wymaga kalibracji uwzględniającej warunki pomiaru. Z drugiej strony wszelkie środki medyczne czy kosmetyczne mogą wpływać na wartość tego parametru, jak i na metabolizm organizmu, co wprowadzać może spore błędy w odczycie wartości bezwzględnej temperatury. Dodatkowo bardzo duży wpływ na rozkłady temperatury na powierzchni ciała mają warunki klimatyczne: temperatura, przepływ i wilgotność powietrza, sposób ochrony przed czynnikami zewnętrznymi itp. W efekcie pomiary realizowane z dokładnością paru stopni Celsjusza uchodzą za dokładne. Jak widać mierzona wartość temperatury nie jest zbyt wiarygodnym parametrem i nie powinna stanowić podstawy decyzji diagnostycznych. Dużo bardziej wiarygodne diagnostycznie są informacje o różnicach i gradientach temperatury, szczególnie biorąc pod uwagę symetrię ciała ludzkiego.

Znaczenie ST stale rośnie, a głównymi czynnikami powodującymi zwiększenie wiarygodności diagnostyki termicznej są prace normalizacyjne i standaryzacja procedur rejestracji obrazów termicznych w praktyce klinicznej [9]. W szczególności zalecane jest posiadanie w laboratorium diagnostycznym referencyjnego źródła podczerwieni o stabilizowanej temperaturze, co pozwala na kontrolę wskazań kamer z matrycami detektorów niechłodzonych [10]. Przykładem znaczenia prac normalizacyjnych są dokumenty opracowane w związku z zastosowaniem termografii w badaniach przesiewowych zorganizowanych na lotniskach w celu powstrzymania epidemii SARS [11, 12]. Z drugiej strony wciąż sporo pozostaje do zrobienia, gdyż dla pełnej akceptacji obrazów termograficznych w systemach PACS niezbędne jest dostosowanie kamer do standardów HL7 i DICOM [13].

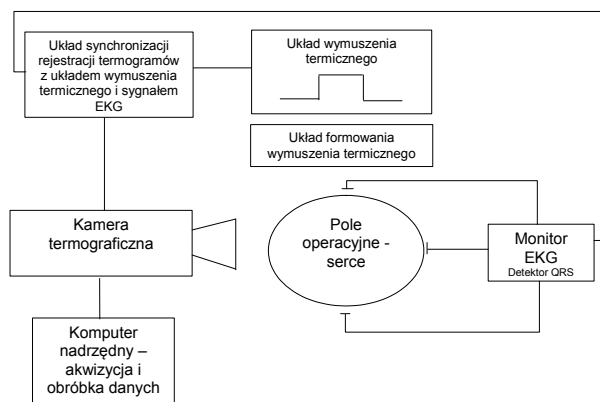
Zakres zastosowań ST poszerza się obejmując takie zagadnienia, jak medycyna fizykalna [14], ocena stanu neuropsychologicznego [15], czy ocena wysiłku fizycznego w ćwiczeniach sportowych [16]. Zagadnieniom specyficznych aplikacji poświęcono wiele monografii, np. w [17] opisano wyniki badań nad możliwościami wykorzystania termografii jak i sygnałów elektrycznych do oceny procedur interwencji kardiologicznych. Odrębne studia dotyczą możliwości oceny procesu gojenia ran pooperacyjnych [18], praca w toku. Jak widać zakres zastosowań techniki obrazowania termicznego w podczerwieni jest bardzo szeroki i ze względu na łatwość pomiaru i brak bezpośredniego kontaktu z pacjentem chętnie ciągle poszerzany.

3. Wizualizacja rozkładów parametrów termicznych tkanek

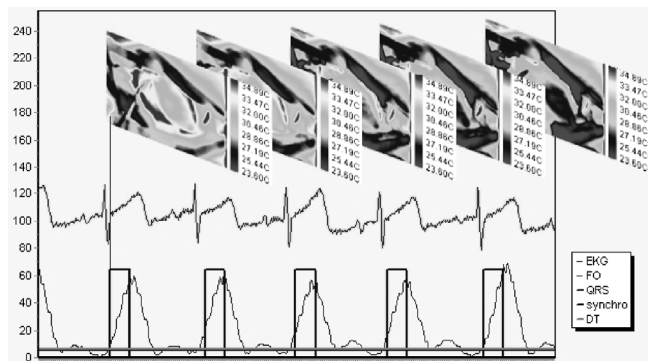
Wykorzystując typowe kamery termograficzne możliwe jest badanie właściwości termicznych tkanek, w szczególności na niezbyt dużych głębokościach [6]. Wykorzystuje się w tym celu dodatkowe pobudzenie termiczne badanego obszaru, rys.1. W tym miejscu należy wprowadzić pojęcie termicznego modelu badanej tkanki czy struktury biologicznej. Pomiar obejmuje rejestrację termicznych procesów przejściowych na powierzchni badanej struktury i na podstawie algorytmów rekonstrukcji identyfikację parametrów zastępczego modelu termicznego badanego obiektu. Zagadnieniami takimi zajmuje się stosunkowo niewiele zespołów badawczych. Nasz zespół uważa się za prekursora aktywnej termografii dynamicznej ADT i tomografii termicznej TT w aplikacjach medycznych. Najważniejsze nasze prace dotyczyły ilościowej oceny głębokości ran oparzeniowych [19, 20, 21, 22, 23]; nie mniej pracy poświęciliśmy możliwościom implementacji tych algorytmów w kardiologii [24, 25, 26, 27]. Należy dodać, że badania termicznych procesów przejściowych pozwalają na zdecydowaną poprawę jakości obrazów parametrycznych w stosunku do zwykłych obrazów ST. Tutaj należy wymienić algorytm TSR, który jest w znacznym stopniu zbliżony do ADT i pozwala na uzyskanie spektakularnych obrazów, ukazujących miejsca ukrwienia płatów skóry i tkanki podskórnej (naczynia perforujące) [7]. Podobnie w pracy [28] omówiono technikę wspomagania wyboru płatów tkanki w celu wykonania operacji przeszczepów przy rekonstrukcji piersi, po mastektomii.

W porównaniu z ST zastosowane algorytmy analizy obrazów są w tym przypadku znacznie bardziej skomplikowane. Po pierwsze, rejestrowana jest seria obrazów ilustrujących przejściowe procesy termiczne. W tym czasie niestety może wystąpić szereg artefaktów ruchowych – pacjent oddycha, może się poruszyć itp. Tak, więc najpierw należy zastosować procedury dopasowania obrazów w serii, tak by piksele obrazu odpowiadały temu samemu punktowi na ciele pacjenta. Nie zawsze jest to łatwe, szczególnie, gdy mamy do czynienia z dużymi i zazwyczaj nieliniowymi odkształceniami, np. przy obserwacji serca w trakcie interwencji kardiologicznych. W takim przypadku pomagają rejestracja obrazów synchronizowanych pracą elektryczną serca. Przypadek pomiaru ADT zilustrowany jest na rysunkach 1 i 2, które pokazują stanowisko pomiarowe i zarejestrowane przebiegi sygnałów elektrycznych i obrazów termicznych w trakcie obserwacji zabiegu kardiologicznego [17].

Badania pacjentów po oparzeniach są prostsze, gdyż problem artefaktów ruchowych jest niewielki. Stanowisko do takich badań, wyposażone w kriostat chłodzący pokazano na rys. 3 [24].



Rys. 1. Stanowisko ADT w badaniach kardiologicznych
Fig. 1. ADT set for cardiosurgery application



Rys. 2. Zarejestrowane przebiegi elektryczne EKG, ICG i obrazy termograficzne
Fig. 2. ECG and ICG signals and thermal images registration



Rys. 3. Stanowisko pomiarowe ADT w warunkach klinicznych badań oparzeń
Fig. 3. ADT set in clinical measurements of burns

4. Perspektywy

Obserwowany rozwój obrazowania termicznego w podcierwieni napawa optymizmem, gdyż technika ta staje się coraz bardziej dostępna i akceptowalna w warunkach klinicznych. Niewątpliwie najbliższa przyszłość, to systemy łączące klasyczne badania ST i metody dynamiczne – ADT i TSR. Metody te uzupełniają się i ich połączenie poprawia czułość, specyficzność i dokładność badań. TT - najbardziej zaawansowana algorytmicznie tomografia termiczna [21, 29] to ze względu na skomplikowane i czasochłonne obliczenia wciąż technologia przyszłości.

5. Literatura

- [1] Medical Infrared Imaging. Principles and Practices, eds. Diakides M., Bronzino J., Peterson D., New York, CRC Press, 2013.
- [2] Barnes R.B.: Thermography and its Clinical Applications, Annals of the New York Academy of Sciences, V.121, art.1, 34-48, 1964.
- [3] Ring E.F.J.: The historical development of temperature measurement in medicine, Infrared Physics and Technology, 49, 297-301, 2007.
- [4] Maldague X.P.: Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing, John Wiley & Sons, Inc. 2001.
- [5] Nowakowski A., Kaczmarek M., Rumiński J., Hryciuk M.: Postępy tomografii: aplikacje medyczne. Wydawnictwo Gdańskie, Gdańsk, 2001.
- [6] Nowakowski A.: Quantitative Active Dynamic Thermal IR-Imaging and Thermal Tomography in Medical Diagnostics, in Medical Infrared Imaging, ed. Diakides NA, Bronzino JD, CRC Taylor&Francis, p. 7-1 – 7-29, 2008.
- [7] Liu W.M., Maivelett J., Kato G.J., Taylor VI J.G., Yang W.C., Liu Y.C., Yang Y.G. and Gorbach A.M.: Reconstruction of thermographic signals to map perforator vessels in humans. Quantitative InfraRed Thermography Journal, vol. 9, 123-133, 2012.
- [8] Renkielska A., Nowakowski A., Kaczmarek M., Dobke M.K., Grudziński J., Karmoliński A., Stojek W.: Static thermography

revisited – an adjunct method for determining the depth of the burn injury. Burns, 31: 768-775, 2005.

- [9] Ring E.F.J., Ammer K.: The technique of infrared imaging in medicine. Thermology international, 10,1, 7-14, 2000.
- [10] Ammer K.: The Glamorgan protocol for recording and evaluation of thermal images of the human body. Thermology international, 18, 125–144, 2008.
- [11] ISO/ TC121/SC3-IEC SC62D Particular requirements for the basic safety and essential performance of screening thermographs for human fever detection.
- [12] ISO/TR 13154:2009 ISO TR 80600 Medical Electrical Equipment - deployment, implementation and operational guidelines for identifying febrile humans using a screening thermograph.
- [13] Rumiński J.: Representation of thermal infrared imaging data in the DICOM using XML configuration files, Proceedings of 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Lyon, p. 258-262, 2007.
- [14] Cholewka A., Knefel G., Stanek A., Kawecki M., Nowak M., Sieroń A., Drzazga Z.: Thermal imaging and TC oximetry measurements of hyperbaric oxygen therapy (HBO) effects on trophic ulceration of the crura, J. Therm. Anal. Calorim. 108(1), 25-31, 2012.
- [15] Shastri D., Merla A., Tsiamyrtzis P. and Pavlidis I.: Imaging facial signs of neurophysiological responses, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 56, no. 2, 477-484, 2009.
- [16] Arfaoui A., Polidori G., Tair R., Popa C.: Infrared Thermography in Sports Activity. w R.V. Prakash [Ed.], Infrared Thermography. InTech, 621-624, 2012.
- [17] Nowakowski A., red., Analiza technik diagnostycznych i terapeutycznych w celu oceny procedur kardiologicznych, AOW EXIT, 2008.
- [18] Nowakowski A., Moderhak M., Mazur-Milecka M., Siondalski P.: Deskrytory obrazowania w podcierwieni dla obiektywnej oceny gojenia ran pooperacyjnych, XVIII Konferencja Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna, Gdańsk, 2013.
- [19] Nowakowski A., Kaczmarek M., Rumiński J., Hryciuk M., Renkielska A., Grudziński J., Siebert J., Jagielak D., Rogowski J., Roszak K., Stojek W.: Medical applications of model based dynamic thermography, Thermosense XXIII, Proc. SPIE, Vol. 4360, 492-503, 2001.
- [20] Hryciuk M., Nowakowski A.: Multilayer thermal model of healthy and burned skin, Proc. 2nd European Medical and Biological Engineering Conference, EMBEC'02, v. 3, Pt. 2., 1614-1617, Vienna, 2002.
- [21] Nowakowski A., Kaczmarek M., Hryciuk M.: Tomografia termiczna. W: Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna 2000. tom VIII: Obrazowanie biomedyczne. Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa, 615-696, 2003.
- [22] Renkielska A., Nowakowski A., Kaczmarek M., Rumiński J.: Burn depths evaluation based on active dynamic IR thermal imaging – A preliminary study, Burns, Vol. 32, pp. 867-875, 2006.
- [23] Rumiński J., Kaczmarek M., Renkielska A., Nowakowski A.: Thermal parametric imaging in the evaluation of skin burn depth, IEEE Transaction on Biomedical Engineering, Vol. 54, 2, pp. 303-312, 2007.
- [24] Nowakowski A., red.: Rozwój diagnostyki termicznej metodami detekcji podcierwieni - ilościowa diagnostyka ran oparzeniowych i inne aplikacje, AOW EXIT, 2009.
- [25] Kaczmarek M., Nowakowski A., Suchowirski M., Siebert J., Stojek W.: Active dynamic thermography in cardiosurgery, QIRT Journal, v. 4, no. 1, 107-123, 2007.
- [26] Nowakowski A., Kaczmarek M., Stojek W., Trzeciak B., Topolewicz J., Rogowski J., Siebert J.: IR-thermal monitoring of cardiosurgery interventions, 4th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering; IFMBE Proceedings, eds. V. Sloten [et al], ISSN 1680-0737; vol. 22, CD-ROM, pp. 1329-1333, Springer, 2008.
- [27] Nowakowski A., Kaczmarek M.: Active Dynamic Thermography - Problems of implementation in medical diagnostics, Quantitative InfraRed Thermography Journal, V. 8/1, 89-106, 2011.
- [28] de Weerd L., Weum S., Mercer J.B.: The value of dynamic infrared thermography (DIRT) in perforator selection and planning of free DIEP flaps. Annals of plastic surgery, 63 (3), 274-279, 2009.
- [29] Bajorek M., Nowakowski A.: Identyfikacja defektów strukturalnych z wykorzystaniem uproszczonego algorytmu tomografii termicznej, PAK, 10, 1146 – 1149, 2011.