

Roman WYŻGOLIK, Sebastian BUDZAN

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT AUTOMATYKI, ZAKŁAD POMIARÓW I SYSTEMÓW STEROWANIA,
Akademicka 16, 44-100 Gliwice

Wybrane zagadnienia pomiarów termowizyjnych

Dr inż. Roman WYŻGOLIK

Ukończył studia magisterskie na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej, na kierunku Automatyka i robotyka, specjalności Systemy pomiarowe. W 2003 roku, na tym samym wydziale uzyskał tytuł doktora nauk technicznych, gdzie pracuje na stanowisku adiunkta w Zakładzie Pomiarów i Systemów Sterowania. Jego zainteresowania skupiają się wokół szeroko rozumianych systemów pomiarowych, miernictwa przemysłowego, sejsmometrii górnictwa oraz oprogramowaniu w LabVIEW.



e-mail: roman.wyzgolik@polsl.pl

Dr inż. Sebastian BUDZAN

Ukończył studia magisterskie na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej, na kierunku Automatyka i Robotyka, specjalności Systemy Pomiarowe. W roku 2008, na tym samym wydziale uzyskał stopień doktora nauk technicznych, gdzie pracuje na stanowisku adiunkta w Zakładzie Pomiarów i Systemów Sterowania. Swoje zainteresowania naukowe koncentruje wokół metod przetwarzania obrazów 2D/3D w systemach pomiarowych, problematyki pomiarów termowizyjnych oraz oprogramowania systemów IT.



e-mail: sebastian.budzan@polsl.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wybrane parametry metrologiczne kamery termowizyjnej ThermoPro TP8, wykorzystywanej w badaniach własnych w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej. Parametry te wyznaczone zostały z wykorzystaniem technicznych ciał czarnych oraz wzorcowego termometru rezystancyjnego. Ograniczono się do wąskiego zakresu temperatur, w granicach temperatury otoczenia i temperatury ludzkiego ciała. Omówiono system pomiarowy pozwalający na przeprowadzenie badań uszkodzeń powierzchniowych metodą aktywnej termografii impulsowej. Badania przeprowadzono w zakresie wyboru optymalnego źródła fali cieplnej, czasu nagrzewania płyt testowych, jak również opracowania algorytmu, który pozwolił przeprowadzić eksperyment oraz dokonać detekcji. Ponadto omówiono algorytm do detekcji twarzy oraz oczu. Badanie przeprowadza się w celu dokładnego określenia położenia oraz rozmiarów twarzy oraz oczu, w których następnie ustala się statystykę temperatury (temp. minimalna, maksymalna, średnia).

Słowa kluczowe: termowizja, metrologia, przetwarzanie obrazów, badania nieniszczące, detekcja twarzy.

Selected problems of infrared thermography

Abstract

In the paper selected metrological parameters of a ThermoPro TP8 infrared camera are presented. The camera is used in research in the Institute of Automatic Control of the Silesian University of Technology. The metrological parameters were investigated based on the reference black bodies and a reference platinum resistance thermometer for precise temperature measurements of the black bodies. The temperature range was limited to the ambient and human body temperature. The ThermoPro TP8 infrared camera is a typical industrial – inspection camera, and requires the validation for biomedical applications. The stability, temperature error and “object in scene” tests were performed. The results show that the stability after 75 minutes was within $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ (a very good result), but the temperature error in the temperature range of interest was significant. In addition, two applications of infrared cameras are presented. The first is the active thermography for non destructive testing, mainly the pulsed thermography. A simple measuring stand for investigations of the defects in plexi (PMMA) tiles with the reference holes ($\pm 0,05$ mm accuracy in diameter and depth) was constructed. The research conducted was aimed at selection of the optimal source of heat waves, the warm-up time for test plates, as well as developing the algorithm for detection of defects in the plexi test plates, with simultaneous determination of the defect position and diameter. The third application of infrared cameras for which the research was carried out is the human face detection system. A number of algorithms was tested. One of them is presented – the algorithm which uses patterns to detect the face and eyes. The experiment was performed to determine the precise location and size of the face and eyes, and then the determined temperature statistics (the minimum, maximum and average temperature).

Keywords: thermovision, metrology, image processing, non-destructive testing, face detection.

1. Parametry metrologiczne kamer termowizyjnych na przykładzie badań kamery TP8

Z punktu widzenia użytkownika kamery termowizyjnej, istotnymi parametrami są: zakres mierzonych temperatur, niepewność pomiaru temperatury, możliwość nastawiania współczynnika emisyjności obiektu pomiaru oraz rozdzielczość termiczna użytego w kamerze detektora. Wiadome jest, że na niepewność pomiaru temperatury z wykorzystaniem kamery termowizyjnej, jak w każdym innych pomiarach bezstykowych temperatury, istotny wpływ ma przede wszystkim emisyjność obiektu jak i warunki otoczenia. Odpowiednie parametry zadaje się w kamerze przed wykonaniem pomiaru.

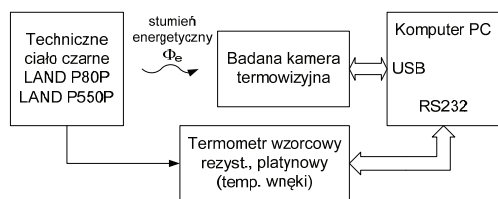
Przyjmując, że znana jest emisyjność obiektu oraz, że pomiar przeprowadzany jest w idealnych warunkach (wylimowano wszystkie potencjalne źródła błędów, kamera posiada aktualne świadectwo wzorcowania) niepewność pomiaru temperatury podana przez producenta kamery jest miarodajna. W praktyce przemysłowej należy liczyć się z niepewnością pomiaru temperatury rzędu kilku stopni Celsjusza i to w przypadku stykowej metody pomiaru. W przypadku obiektów o wysokiej temperaturze taki błąd jest akceptowalny. Problem pojawia się, gdy temperatura obiektu nie różni się znacząco od temperatury otoczenia. Wówczas, nawet gdy znamy emisyjność obiektu, istotny jest wpływ otoczenia na wynik pomiaru. Ponadto nie można zaniedbać takich parametrów kamery jak stabilność wskazań w czasie, czy możliwości wystąpienia dryftu wskazania (offsetu) – stałego, bądź zmiennego w czasie. Takim przypadkiem są pomiary biomedyczne.

Jeżeli z medycznego punktu widzenia istotne są na przykład różnice w rozkładzie temperatury, wówczas niepewność pomiaru temperatury podawana przez producenta kamery termowizyjnej, zazwyczaj 1%, bądź 2% wskazania nie jest tak istotna jak rozdzielczość termiczna. Inaczej jest, gdy pomiar termowizyjny ma służyć określeniu temperatury wewnętrznej człowieka, bazując najczęściej na wyznaczeniu temperatury kącików oczu z termogramu. Taka aplikacja kamer termowizyjnych jest szeroko opisywana w literaturze [1, 2, 3].

Dla posiadanej kamery, ThermoPro TP8 firmy Wuhang Guide Infrared Co., przeprowadzono kilka z zalecanych badań, między innymi czas stabilizacji wskazań, błędu pomiaru temperatury w zakresie wokół temperatury otoczenia i temperatury wewnętrznej ciała człowieka oraz wpływu obiektu w scenie. Na układ pomiarowy, poza badaną kamerą, składały się techniczne ciała czarne P80P oraz P550P firmy LAND, wzorcowy rezystancyjny termometr platynowy do pomiaru temperatury wnęki wyżej wymienionych ciał czarnych, komputer PC z oprogramowaniem. Deklarowana przez producenta emisyjność technicznych ciał czarnych wynosi 0,995, czas stabilizacji temperatury wnęki 30 – 60 minut. Schemat stanowiska pokazano na rys. 1.

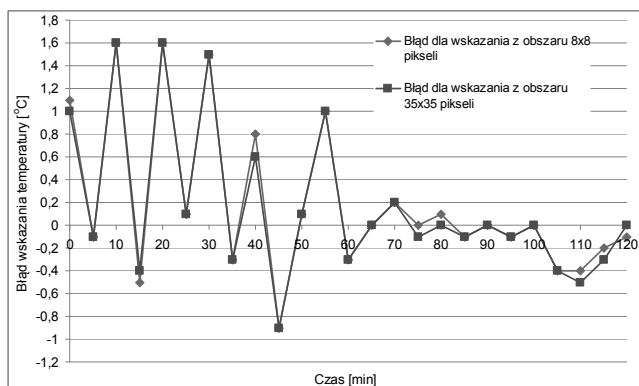
Badana kamera termowizyjna charakteryzowała się następującymi parametrami: detektor mikrobolometryczny niechłodzony 384x288 pikseli, zakres długości fal 8-14 μm ., rozdzielczość termiczna 0,08°C (dla temperatury 30°C), deklarowana niepewność pomiaru temperatury $\pm 2^\circ\text{C}$ lub $\pm 2\%$ wskazania.

Pomiaru czasu stabilizacji wskazań dokonano dla temperatury wnętrza technicznego ciała czarnego P80P nastawionej na 0°C. Termogramy wnętrza ciała czarnego rejestrowano w przeciągu 2 godzin, co 5 minut. Wyznaczono błąd odczytu temperatury z obszaru centralnego wnętrza, przy czym z termogramów wybrano obszary o rozmiarach 35x35 pikseli oraz 8x8 pikseli, dla których wyliczono temperatury średnie. Wyniki przedstawiono na rys. 2.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego do wyznaczania parametrów metrologicznych kamery termowizyjnej ThermoPro TP8

Fig. 1. Scheme of the measuring stand for investigation of metrological parameters of the ThermoPro TP8 infrared camera

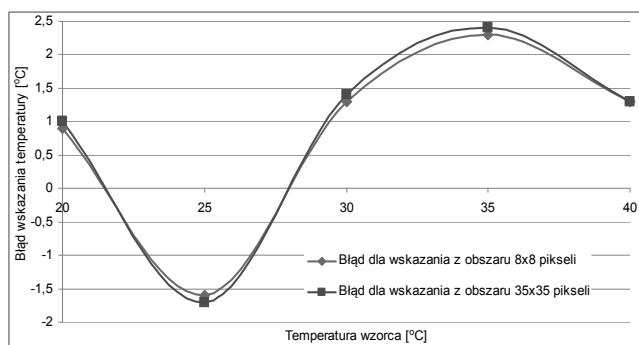


Rys. 2. Wyniki pomiaru czasu stabilizacji wskazań badanej kamery

Fig. 2. Results of stability test for the camera under tests

Po czasie około 75 minut uzyskano stabilność wskazań z błędem $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Fluktuacje widoczne po czasie 100 minut są spowodowane nieznanym zakłóceniem pomiaru.

Błąd pomiaru temperatury wyznaczono w zakresie od 20°C do 40°C, po wcześniejszej stabilizacji wskazań kamery. Podobnie jak przy badaniu stabilizacji wskazań, wskazanie temperatury wyznaczono jako średnią z wybranych obszarów termogramu. Wyniki, pokazane na rys.3 wykazały znaczny błąd pomiaru.



Rys. 3. Wyniki wyznaczenia błędu pomiaru temperatury w zadanym zakresie pomiarowym

Fig. 3. Results of temperature error in the chosen measuring range

Wpływ obiektu w scenie zbadano umieszczając w polu widzenia kamery termowizyjnej, poza technicznym ciałem czarnym, kubek z wodą o temperaturze 42°C. Termogram prezentujący doświadczenie pokazano na rys.4. Temperatura wnętrza ciała czarnego ustawiona była na 30°C. Temperaturę wnętrza przed i po wprowadzeniu obiektu w scenie wyznaczono jako średnią z obszaru 20x20 pikseli. Wyniosła ona odpowiednio 30,3°C oraz 31,5°C, co daje bardzo dużą różnicę wskazań, +1,2°C.



Rys. 4. Obraz z kamery TP8 z zakłóceniem w postaci obiektu w scenie
Fig. 4. Thermal image from infrared camera TP8 disturbed with an object in the scene

Kamera termowizyjna będąca obiektem badań jest typową kamerą przemysłową-inspekcyjną, spodziewano się więc nienajlepszych rezultatów, jeśli chodzi o przydatność kamery do zastosowań biomedycznych. Starano się na drodze własnego doświadczenia przekonać o tym, jak istotna jest kalibracja kamery – najlepiej przed każdym pomiarem, oraz zapewnienie właściwych warunków pomiaru przez minimalizację zakłóceń od obiektów otaczających.

Bardzo ciekawie zagadnienia związane z walidacją pomiarów z wykorzystaniem kamer termowizyjnych i kalibracją kamer podano w [4, 5]. We wskazanych publikacjach podano opis i parametry metrologiczne opracowanych, na potrzeby badań termowizyjnych w medycynie, technicznych ciał czarnych i punktów stałych. Uzyskiwane niepewności rozszerzone (dla współczynnika rozszerzenia $k = 2$) wynoszą odpowiednio $\pm 0,2$ i $\pm 0,4^\circ\text{C}$. W naszym przypadku niepewności są większe. Niepewności standardowe kształtują się następująco: nastawionej temperatury $\pm 0,3^\circ\text{C}$, stabilizacji temperatury $\pm 0,06^\circ\text{C}$, niejednorodności rozkładu temperatur we wnętrzu ciała czarnego $\pm 0,12^\circ\text{C}$, emisyjności ciała czarnego $\pm 0,11^\circ\text{C}$. Wynikowa niepewność rozszerzona ($k = 2$) wynosi zatem $\pm 0,7^\circ\text{C}$.

2. Zastosowania termografii aktywnej

Termografia w podczerwieni znajduje zastosowania również w badaniach nieniszczących maszyn, urządzeń, różnego rodzaju obiektów. Badanie nieniszczące ma na celu wykrycie defektu wraz z określeniem jego wymiarów. Do najczęściej stosowanych metod badań nieniszczących należy zaliczyć metodę wizyjną, penetracyjną, magnetyczną, prądów wirowych, radiologiczną, ultradźwiękową oraz termowizyjną. Wyróżnia się termografię pasywną oraz aktywną. W termografii pasywnej w procesie wykrywania defektów wykorzystuje się tylko i wyłącznie zjawisko emitowania promieniowania cieplnego przez badany obiekt. W termografii aktywnej natomiast wykorzystuje się dodatkowe źródło sygnału pobudzającego, wprowadzającego energię cieplną do badanego obiektu. Ze względu na charakter zmian sygnału pobudzającego w czasie, badania termowizyjne dzielimy na [6]:

- modulacyjną,
- impulsową,
- impulsowo-fazową.

Termografia modulatoryjna wykorzystuje fakt nagrzewania badanego materiału przez źródło ciepła o zmiennym natężeniu. Na podstawie uzyskanych termogramów wyznacza się mapę przesunięć fazowych, które to pozwalają dokładnie wyodrębnić defekt. Stanowisko pomiarowe (rys. 5) zostało opracowane dla zadań termografii impulsowej, w której sygnał pobudzający stanowi jednokrotny impuls energii o określonym czasie trwania >1 s. Po zakończeniu nagrzewania rejestruje się sekwencję termogramów. Na jej podstawie określa się rozkład temperatury na powierzchni badanego obiektu w czasie określonym horyzontem badania. Termografia impulsowo-fazowa stanowi swego rodzaju wykorzystanie zalet obydwu w/w rodzajów badań.

Na stanowisko pomiarowe składa się kamera termowizyjna ThermoPro TP8, halogen o mocy 500 W, komputer klasy PC oraz autorskie oprogramowanie. W badaniach eksperymentalnych wykorzystano płyty wykonane z polimetakrylanu metylu o wymiarach 210x140x10 mm. W płytach wykonano defekty o określonych średnicach oraz głębokościach. Najmniejszy defekt posiadał średnicę 2 mm i głębokość 2,5 mm, natomiast największy defekt charakteryzowany był średnicą 10 mm i głębokości 5 mm. Defekty zostały wykonane laserem o dokładności 0,05 mm. Płyty jednostronnie zostały pokryte czarnym, matowym lakierem wysokotemperaturowym. Po tej stronie płyt rejestrowane były termogramy.



Rys. 5. Stanowisko laboratoryjne termografii aktywnej-impulsowej
Fig. 5. Laboratory stand for active-impulse thermography

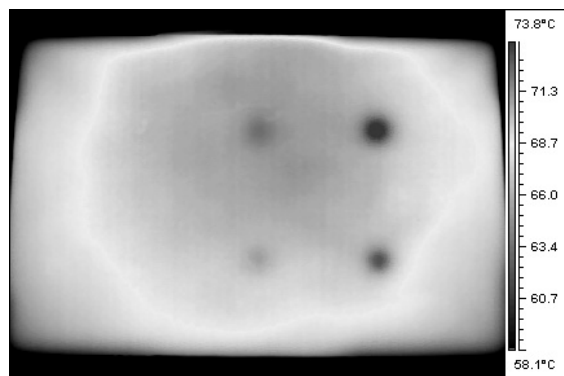
Przeprowadzono wstępne badania polegające na doborze odpowiedniego źródła impulsu cieplnego, czasu trwania impulsu oraz horyzontu czasowym rejestracji termogramów. Kryterium wyboru źródła stanowił równomierny rozkład temperatury na powierzchni testowanych płyt. Wybrane termogramy zaprezentowano na rys. 6 oraz rys. 7. Jedynie halogen o mocy 500 W spełnił postawione kryterium. Czas trwania impulsu został ustalony eksperymentalnie na 240 s, jako optymalny dla badanych płyt. Dla innych materiałów należałoby określić optymalny czas trwania impulsu, czyli czas nagrzewania badanych płyt. Zbyt mała wartość czasu nie pozwoli na uwidocznienie defektów, zbyt wysoka wartość może spowodować uszkodzenie badanych płyt oraz znacznie zwiększa czas trwania rejestracji termogramów, co związane jest z wydłużonym czasem oddawania energii przez badane płyty. Horyzont czasowy jest parametrem determinującym fazę akwizycji termogramów, zależny jest przede wszystkim od czasu trwania impulsu pobudzającego, jak również materiału z jakiego jest wykonany badany obiekt, co związane jest z dyfuzyjnością tego materiału.

Akwizycja termogramów stanowi pierwszy etap badań nieniszczących. Drugim etapem, równie ważnym, jeżeli przyjmiemy próbę zautomatyzowania procesu wykrywania defektów jest algorytm przetwarzania termogramów.

W proponowanym rozwiązaniu wykorzystuje się opracowany przez autorów algorytm, wykorzystujący techniki przetwarzania obrazów cyfrowych 2D dostosowanych do termogramów.

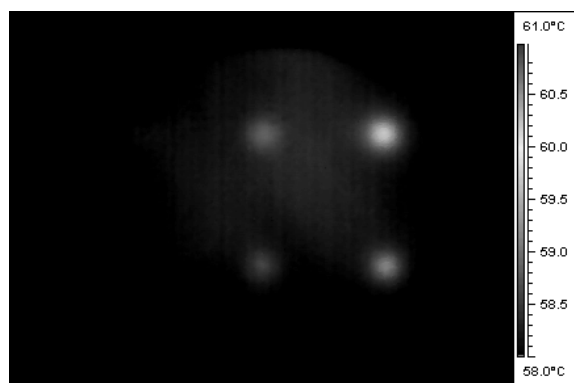
Przetwarzanie wstępne ma na celu usunięcie z termogramu informacji nieistotnych z punktu widzenia samej analizy pod kątem wykrywania defektów, to jest szumy pomiarowe, krawędzie o zmiennej skokowo temperaturze. Do tych zadań wykorzystuje się wygładzanie termogramu oraz odcięcie skrajnych pikseli termogramu. Na tym etapie wyznaczane są również parametry termogramu, tj. najniższa, najwyższa oraz średnia temperatura.

Proces wykrywania defektów wykorzystuje operacje morfologiczne. Mianowicie segmentację metodą rozrostu, co pozwala na wstępne określenie obszarów zainteresowania – prawdopodobnych defektów, oraz erozję i dylatację, co pozwala na poprawienie jakości obszarów. Decyzja o zakwalifikowaniu obszaru do grupy defektów podejmowana jest po analizie profilu liniowego temperatury, defekt charakteryzuje się minimalną temperaturą w badanym obszarze.



Rys. 6. Termogram testowej płyty nr 3 dla czasu nagrzewania 240 sekund oraz czasu akwizycji $t=15$ sekund

Fig. 6. Thermogram of the test plate No. 3 for heating time 240 seconds and acquisition time $t=15$ second



Rys. 7. Termogram testowej płyty nr 3 dla czasu nagrzewania 240 sekund oraz czasu akwizycji $t=90$ sekund

Fig. 7. Thermogram of the test plate No. 3 for heating time 240 seconds and acquisition time $t=90$ second

Przeprowadzone badania eksperymentalne wykazały efektywność proponowanego rozwiązania w zakresie defektów o średnicy powyżej 4 mm i głębokości większej od 2,5 mm. W odniesieniu do średnicy defektów algorytm pozwolił na określenie średnicy defektów ze średnią dokładnością $\pm 0,3$ mm, natomiast efektywność detekcji defektów była na poziomie 94%.

Dalsze prace badawcze prowadzone będą przede wszystkim w zakresie określenia głębokości defektów, jak również rozszerzenia klasy badanych materiałów, jak również typu i kształtu defektów.

3. Detekcja twarzy w termogramach

Metody detekcji twarzy w termogramach wykorzystują fakt emisji promieniowania energii przez ludzkie ciało. Energia rejestrowana jest poprzez matrycę detektorów, zamontowaną w kamerze termowizyjnej. Ludzka skóra charakteryzuje się współczynnikiem emisyjności $\varepsilon=0.98$. Dodatkowo każdy człowiek ma charakterystyczną tylko dla siebie, unikalną twarz, tym samym rozkład temperatury na twarzy jest unikalny. Ludzka twarz i ciało cechuje się średnią temperaturą oscylującą wokół 30 °C.

Prowadzone badania w Instytucie Automatyki w zakresie algorytmów detekcji twarzy w termogramach skupiają się na optymalizacji czasowej i dokładnościowej wykrywania i oceny położenia twarzy oraz oczu, jak również badaniu obrazów powstałych z fuzji obrazy wizyjnego i termogramu.

Opracowano algorytm wykorzystujący metody oparte na wzorcach, a w szczególności transformatę Hougha [7, 8] w jej losowej modyfikacji. Transformata pozwala na parametryczny opis poszukiwanego kształtu, jakim w przypadku zarówno twarzy, jak i oczu jest elipsa. Jest ona odporna na szумы pomiarowe, nieciągłości temperatury w termogramie, natomiast nie pozwala ona na jednoznaczne określenie, czy wykryty obiekt jest twarzą, bądź oczami. Do tego celu wykorzystuje się algorytm weryfikacji. Opiera się on na wprowadzonych regułach geometrycznych, które muszą spełnić zarówno twarz, jak i oczy. Taka metoda weryfikacji ogranicza jednak możliwości dowolnego ustawienia twarzy względem kamery termowizyjnej. Dopuszcza się wychylenie w osi pionowej o 15 stopni. Badania eksperymentalne wykonano w laboratorium pomiarów termowizyjnych w Zakładzie Pomiarów i Systemów Sterowania w Instytucie Automatyki. Eksperyment przeprowadzono dla bazy 20 zdjęć testowych osób (pracowników i studentów w Instytucie Automatyki).



Rys. 8. Testowy termogram z zaznaczonymi obszarami twarzy (T) oraz oczu (O1, O2)

Fig. 8. Testing thermal image with recognized regions of the face (T) and eyes (O1, O2)

Na rysunku 8 zaprezentowano przykładowy termogram twarzy. W wykrytych obszarach twarzy (T) oraz oczu (O1, O2) możliwe jest dokładne określenie wartości temperatury średniej, maksymalnej oraz minimalnej (tab. 1).

Opracowane rozwiązanie, pozwalające na lokalizację oczu, wykorzystano następnie po wprowadzeniu rozszerzenia algorytmu do oceny temperatury kącików oczu, których temperatura daje dokładną informację o temperaturze wewnętrznej ludzkiego ciała. W obszarach oczu O1 oraz O2 wyszukuje się niezależnie punkt o maksymalnej temperaturze, następnie przeprowadza się segmen-

tację metodą rozrostu z krokiem homogeniczności obszaru równym 0,1°C. Punktem startowym, tzw. ziarnem dla segmentacji jest punkt o najwyższej temperaturze w obszarze oka. Jakość wykrytego obszaru poprawiana jest poprzez operację morfologiczną otwarcia i zamknięcia. Dla twarzy widocznej na rysunku 8 temperatura kącików oczu wyniosła dla strony lewej i prawej 36,5 °C.

Tab. 1. Wartości temperatury badanych obszarów
Tab. 1. Temperature values for regions of interest

Region	Temp. średnia [°C]	Temp. maks. [°C]	Temp. min. [°C]
T	36,1	36,5	28,0
O1	36,5	36,5	34,8
O2	36,6	36,5	34,4

4. Wnioski

Problematyka pomiarów termowizyjnych w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej jest nowym kierunkiem badań, realizowanym od końca 2009 roku. Przewidywane jest prowadzenie badań w trzech obszarach. Pierwszym, związanym z kalibracją kamer termowizyjnych i walidacją pomiarów wykonywanych przy ich użyciu. Drugim, związanym z badaniami nieniszczącymi oraz trzecim, związanym z detekcją twarzy oraz postaci w obrazach termowizyjnych.

W artykule w sposób przeglądowy przedstawiono zagadnienia związane z własnościami metrologicznymi kamer termowizyjnych z punktu zastosowań biomedycznych, poparte badaniami własnymi kamery ThermoPro TP8. Przedstawiono dwa wybrane zastosowania kamer termowizyjnych, w badaniach nieniszczących z wykorzystaniem termowizji aktywnej oraz w detekcji twarzy w termogramach.

5. Literatura

- [1] Ring E.F.J., Jung A., Zuber J., Rutkowski P., Kalicki B., Bajwa U.: Detecting Fever in Polish Children by Infrared Thermography. QIRT 2008 (materiały konferencyjne, str. 125 - 128).
- [2] Więcek B., Strykowska M., Strykowski R., Strzelecki M.: Wybrane biomedyczne zastosowania termowizji. Informatyka Automatyka Pomiaru w gospodarce i ochronie środowiska, nr 1, 2011.
- [3] Mercer J.B., Ring E.F.J.: Fever screening and infrared thermal imaging: concerns and guidelines. Thermology International 19(3), 67-69, 2009.
- [4] Machin G., Simpson R., Broussely M.: Calibration and validation of thermal imagers. QIRT 2008 (materiały konferencyjne, str. 555 - 562).
- [5] Simpson R., McEvoy H., Machin G. (i inni): Inf-Field-of-View Thermal Image Calibration System for Medical Thermography Applications. Int. J. Thermophysics, 29, 1123-1130, 2008.
- [6] Więcek B., De Mey G.: Termowizja w podczewrieni. Podstawy i zastosowania. PAK, 2011.
- [7] Budzan S.: System detekcji twarzy i oczu w obrazach 2D z wykorzystaniem transformaty Hougha. Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), r.85, nr 2, 29-32, 2009.
- [8] Hough P.V.C.: Method and means for recognizing complex patterns, U.S. Patent 3,0699,654, 1962.

otrzymano / received: 02.08.2011

przyjęto do druku / accepted: 05.09.2011

artykuł recenzowany