

Tomasz SOSNOWSKI¹, **Henryk MADURA**¹, **Krzysztof FIRMANTY**¹, **Jarosław BAREŁA**¹,
Grzegorz BIESZCZAD¹, **Jarosław KUBICKI**²

¹WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

²BUMAR PCO S. A., ul. Jana Nowaka-Jeziorańskiego 28, 03-982 Warszawa

Zautomatyzowane stanowisko do wyznaczania wartości parametrów i kalibracji obserwacyjnych kamer termowizyjnych

Dr inż. Tomasz SOSNOWSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Od 1996 roku jest pracownikiem Wojskowej Akademii Technicznej. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2003. Zajmuje się problematyką związaną z projektowaniem i programowaniem systemów cyfrowych, cyfrową analizą sygnału, analizą obrazu termograficznego, a także zastosowaniem układów programowanych i mikroprocesorowych w technice podczerwieni i analizie sygnałów wibroakustycznych. Autor i współautor ponad 60 publikacji.



e-mail: tSosnowski@wat.edu.pl

Dr hab. inż. Henryk MADURA

Specjalista w dziedzinie optoelektroniki, techniki podczerwieni i termowizji. Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1976). Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w roku 1983, a stopień doktora habilitowanego w 1999 roku. W latach 1991-1997 zastępca dyrektora Instytutu Optoelektroniki. Opublikował ponad 180 artykułów i referatów konferencyjnych. Autor i współautor 25 wdrożeń i 16 patentów. Od 2000 roku profesor Wojskowej Akademii Technicznej.



e-mail: hmadura@wat.edu.pl

Dr inż. Krzysztof FIRMANTY

Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2003 w zakresie elektroniki - specjalność optoelektronika. Adiunkt w Instytucie Optoelektroniki WAT. Autor i współautor ponad 50 publikacji. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się na metrologii urządzeń podczerwieni. Zajmuje się pracami z zakresu techniki podczerwieni, w szczególności zastosowaniem kamer termowizyjnych w pomiarach i badaniach naukowych oraz pracami projektowymi.



e-mail: kfirmanty@wat.edu.pl

Dr inż. Jarosław BAREŁA

Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej (1997). Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2004 w zakresie elektroniki - specjalność optoelektronika. Adiunkt w Instytucie Optoelektroniki WAT. Głównym obszarem jego pracy jest programowanie systemów mikroprocesorowych, projektowanie odbiorników promieniowania w zakresie podczerwieni, prowadzenie badań przyrządów noktowizyjnych i termowizyjnych. W swoim dorobku naukowym posiada ponad 30 publikacji.



e-mail: jbarela@wat.edu.pl

Dr inż. Grzegorz BIESZCZAD

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (2008) - specjalność Teleinformatyka. Obecnie pracownik Zakładu Techniki Podczerwieni i Termowizji w Instytucie Optoelektroniki WAT. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2012. Zajmuje się problematyką związaną z projektowaniem systemów cyfrowych, programowaniem układów mikroprocesorowych i układów FPGA oraz zagadnieniami związanymi z cyfrowym przetwarzaniem obrazów, w tym obrazów termowizyjnych.



e-mail: gbieszczad@wat.edu.pl

Mgr inż. Jarosław KUBICKI

Absolwent kierunku Elektronika i Telekomunikacja, Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, Akademii Górniczo - Hutniczej w Krakowie (2003). Konstruktor elektronik w przedsiębiorstwie Bumar PCO S.A. Zajmuje się termowizją, przetwarzaniem obrazu i systemami wbudowanymi. Współautor wdrożonych do produkcji seryjnej urządzeń termowizyjnych.



e-mail: j.kubicki@pcosa.com.pl

Streszczenie

Kamery termowizyjne znajdują zastosowanie w coraz większej liczbie dziedzin nauki, techniki i życia. Wynikiem tego jest produkcja względnie niedrogich kamer termowizyjnych, które muszą zostać poddane kalibracji i ocenie zakładanych parametrów. W artykule zostało przedstawione zautomatyzowane stanowisko do pomiaru parametrów i kalibracji kamery termowizyjnej. Zostały opisane wszystkie elementy stanowiska takie jak moduł przemieszczeń liniowych i techniczne ciała doskonale czarne. Opisano również algorytmy i procedury wyznaczania parametrów i współczynników kalibracyjnych kamery termowizyjnej.

Słowa kluczowe: termowizja, kamera termowizyjna.

A test stand for evaluation and calibration of thermal camera parameters

Abstract

Technological development in the field of infrared and thermal imaging has caused that thermal imaging cameras are used in more and more fields of science, technology and life. In the paper there is presented an automatic measurement and calibration stand capable of measuring the fundamental parameters of a thermal imaging camera. All components of the module, such as a linear motion controller and an actuator or a technical perfect black body are described. An algorithm for determining calibration parameters of the thermal imaging camera is presented. In the paper there are discussed the basic parameters of the calibrated infrared camera, the IR

Capture device to capture data from the infrared camera via a specialized bus called the VideoBus. The UPCD and VideoBus standards are described. The paper presents the IRDiag software for recording the measurement data and determining the parameters and NUC correction factors used for infrared cameras. The software also allows control of all elements of the measurement stand and automation of most tasks performed by a user during the standard calibration procedure. The measurement stages are described and presented in the form of software window screenshots. The measurement stand was tested with regard to the accurate evaluation of parameters and calibration coefficients.

Keywords: thermal vision, thermal imaging camera.

1. Wstęp

Rozwój technologiczny w dziedzinie podczerwieni i termowizji spowodował, że kamery termowizyjne znajdują zastosowanie w coraz większej liczbie dziedzin nauki, techniki i życia. Liczba zastosowań kamer termowizyjnych stale rośnie. Znajdują one zastosowanie nie tylko w takich dziedzinach jak sprzęt wojskowy [5], policyjny, w medycynie, czy w badaniach naukowych ale także w bardzo wielu innych dziedzinach [1] jak motoryzacja, systemy alarmowe, systemy nadzoru produkcji.

Kamera termowizyjna rejestruje promieniowanie podczerwone pochodzące od obserwowanych obiektów i jest zbudowana z takich podstawowych elementów jak [3]: matryca detektorów

podczerwieni, obiektyw dla danego zakresu podczerwieni, układy elektroniczne zapewniające odczyt sygnału z detektora oraz rejestrację i analizę sygnału. Na jakość działania kamery ma wpływ bardzo wiele parametrów kamery [2, 3, 4, 6]. W celu określenia jakości badanej kamery należy zmierzyć i wyznaczyć wiele parametrów kamery takich jak czułość, niejednorodność, NETD.

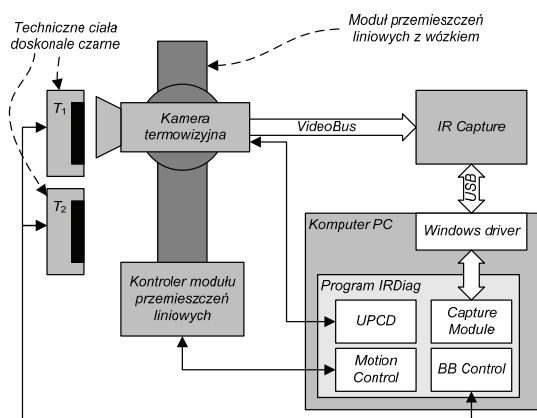
Jednym najbardziej zaawansowanym technologicznie elementem kamery termowizyjnej jest matryca detektorów podczerwieni. Charakterystyczną cechą matrycy detektorów podczerwieni jest niejednorodność odpowiedzi (sygnału elektrycznego) poszczególnych detektorów na takie samo wymuszenie (moc padającego promieniowania podczerwonego). Efektem niejednorodności jest występowanie w obrazie termicznym generowanym przez matrycę tzw. stałego wzorca szumu FPN (fixed pattern noise). Niejednorodność odpowiedzi matrycy na strumień jednorodnego promieniowania jest powodowana rozrzutem technologicznym detektorów matrycy i układu odczytu. W związku z tym należy dokonać korekcji niejednorodności NUC (non-uniformity correction) [2, 7], na podstawie, wyznaczonych wcześniej, współczynników korekcji.

Wyznaczenia parametrów i współczynników NUC dokonuje się na specjalnym stanowisku pomiarowym.

2. Budowa stanowiska do pomiaru parametrów kamery termowizyjnej

W celu wyznaczenia parametrów kamer termowizyjnych zostało opracowane specjalne zautomatyzowane stanowisko pomiarowe. Stanowisko składa się z następujących elementów:

- kamera termowizyjna,
- dwa ciała doskonale czarne o temperaturze T_1 i T_2 ,
- modułu przemieszczeń liniowych z wózkiem,
- kontroler modułu przemieszczeń liniowych,
- mechaniczny wyłącznik krańcowy,
- urządzenie do przechwytywania danych IR Capture,
- komputer z oprogramowaniem IRDiag.



Rys. 1. Schemat stanowiska do rejestracji danych i wyznaczania parametrów kamery termowizyjnej

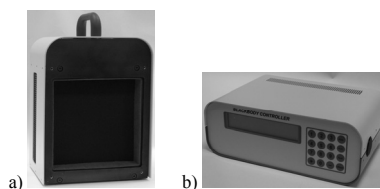
Fig. 1. Schematic diagram of the stand for data acquisition and parameter evaluation of a thermal imaging camera

Schemat blokowy stanowiska do rejestracji danych i wyznaczania parametrów kamery termowizyjnej został zaprezentowany na rys. 1. Kamera termowizyjna przekazuje dane obrazowe do urządzenia przechwytyjącego dane IR Capture za pomocą specjalnie zaprojektowanej magistrali VideoBus. Komputer klasy PC umożliwia odbieranie danych z IR Capture (za pośrednictwem magistrali USB). Dodatkowo za pomocą komputera jest sterowany moduł przemieszczeń liniowych oraz kamera termowizyjna.

Do automatycznej zmiany obserwowanego przez kamerę termowizyjną ciała doskonale czarnego został zastosowany moduł przemieszczeń liniowych MLA-SIC z programowalnym kontrolerem. Moduł stanowi kompletne urządzenie do realizacji przemieszczeń liniowych Konstrukcja modułu oparta na bazie profilu aluminiowego, prowadnicy liniowej i wózka zapewnia precyzyjne

i powtarzalne pozycjonowanie. Moduł napędzany jest silnikiem krokowym, a ruch obrotowy kół zębatych zamieniany jest na przemieszczenie liniowe za pomocą paska zębatego. Do wózka modułu przemieszczeń liniowych został przykręcony na stałe uchwyty do zamocowania kamery, który umożliwia precyzyjne i powtarzalne montowanie kamery termowizyjnej. Sterowanie silnikami modułu odbywa się przy pomocy wbudowanego kontrolera, posiadającego możliwość ustalenia dowolnego położenia wózka. Kontroler realizuje polecenia przesłane przez oprogramowanie IRDiag za pośrednictwem interfejsu MODBUS-RTU.

Jednym z najważniejszych elementów składowych stanowiska do wyznaczania parametrów kamer termowizyjnych są powierzchniowe techniczne ciała doskonale czarne. Na stanowisku znajdują się dwa ciała doskonale czarne BB-6-P opracowane i wykonane w Instytucie Optoelektroniki WAT (rys. 2).



Rys. 2. Techniczne ciała doskonale czarne BB-6-P (a) oraz sterownik ciała (b) opracowane w Instytucie Optoelektroniki

Fig. 2. Technical blackbody radiation source BB-6-P (a) blackbody controller (b) developed in the Institute of Optoelectronics

Zadaniem ciał czarnych jest wygenerowanie promieniowania podczerwonego równomiernie oświetlającego matrycę detektorów kalibrowanej kamery termowizyjnej. Jednocześnie strumień generowanego promieniowania jest zależny od temperatury ciała doskonale czarnego. W związku z tym ciało doskonale czarne musi cechować się wysokim współczynnikiem emisyjności i bardzo dobrą stabilnością zadanej temperatury. Dodatkowo ze względu na dokładność wyznaczanych parametrów różnica temperatury między ciałami doskonale czarnymi powinna być większa niż 10°C . W tabeli (tab. 1) zostały umieszczone wybrane parametry ciała doskonale czarnego.

Tab. 1. Podstawowe parametry technicznego ciała doskonale czarnego BB-6-P opracowanego i wykonanego w IOE WAT

Tab. 1. Basic parameters of the technical black body BB-6-P developed in the IOE WAT

Parametr	Wartość
Rozmiar powierzchni ciała doskonale czarnego	6"x6"
Zakres stabilizacji temperatury absolutnej	+10°C ÷ 95°C (dla temperatury otoczenia 25°C)
Zakres stabilizacji temperatury różnicowej	-15°C ÷ 70°C
Jednorodność rozkładu temperatury	±0,014
Emisyjność	0,97
Stabilność krótkookresowa	±0,005°C (ΔT<10°C)
Stabilność długookresowa	±0.010°C (ΔT<10°C)
Czas stabilizacji temperatury	<180 s (ΔT<10°C)
Rozdzielczość wyświetlania	0,001°C
Zakres temperatury pracy	+5°C ÷ 45°C
Interfejs komunikacji z komputerem	RS232C

Kamera termowizyjna komunikuje się z komputerem poprzez port RS-485 za pomocą opracowanego w IOE WAT protokołu UPCD (Universal Protocol of Communication Devices). Badana kamera termowizyjna posiada także specjalne wyjście wyposażone magistralę VideoBus, za pośrednictwem której są rejestrowane dane pomiarowe. VideoBus jest magistralą danych obrazowych i składa się z 14-bitowej magistrali danych, sygnału synchronizacji pionowej i poziomej oraz sygnału strobowego [3].

Stanowisko badawcze - pomiarowe do wyznaczania parametrów i kalibracji kamery termowizyjnej zostało przedstawione na rys. 3.

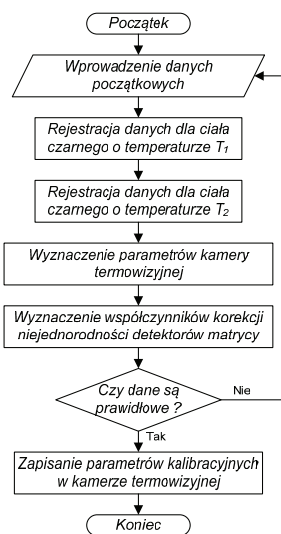


Rys. 3. Zautomatyzowane stanowisko do wyznaczania parametrów i kalibracji kamery termowizyjnej

Fig. 3. The automated stand for determining the calibration parameters of a thermal imaging camera

3. Algorytm pomiaru i wyznaczania parametrów kamery termowizyjnej

W celu wyznaczenia parametrów i współczynników korekcji NUC dla kamery termowizyjnej należy zarejestrować odpowiedzi detektorów matrycy, na które pada jednorodne promieniowanie ze źródeł o różnej wartości temperatury. W związku z tym należy przeprowadzić szereg czynności, których schemat przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat blokowy algorytmu pomiaru parametrów i wyznaczania współczynników korekcji niejednorodności kamery termowizyjnej

Fig. 4. Block diagram of the algorithm for measurement of parameters and determination of the non-uniformity correction factors of an infrared camera

Na początku pomiaru parametrów i wyznaczania współczynników korekcji niejednorodności kamery termowizyjnej należy wprowadzić dane początkowe. Dane te zawierają informacje dotyczące ustawianych pozycji pomiarowych. Optymalne położenie wózka z kamerą względem ciała doskonale czarnych jest wyznaczane w czasie procedury kalibracyjnej stanowiska przed przeprowadzeniem pierwszego pomiaru.

Podczas inicjalizacji wózek modułu przemieszczania liniowego przesuwa się w kierunku pozycji początkowej, aż do momentu włączenia wyłącznika krańcowego. Zadziałanie wyłącznika powoduje zatrzymanie wózka oraz wyzerowanie licznika kroków. Po wyzerowaniu licznika kroków wózek ustawia się w pozycji pierwszej, w której kamera termowizyjna „widzi” ciało doskonale czarne o temperaturze T_1 . Następuje odczyt danych z kamery termowizyjnej, po czym wózek przemieszcza się o określoną liczbę kroków w celu przeprowadzenia odczytu danych dla ciała doskonale czarnego o temperaturze T_2 .

Po zarejestrowaniu odpowiednich danych pomiarowych następuje wyznaczenie współczynników korekcji niejednorodności detektorów matrycy. Zostają również wyznaczone parametry określające jakość matrycy detektorów.

Dzięki wstępnej ocenie poprawności otrzymanych wyników istnieje możliwość powtórzenia całego procesu pomiarów w przypadku, gdy dane okażą się nieprawidłowe. Jeżeli wyznaczone współczynniki korekcji niejednorodności i parametry kamery termowizyjnej okażą się prawidłowe, to następuje zapisanie parametrów kalibracyjnych w kamerze termowizyjnej i proces pomiarowy zostaje zakończony.

W czasie pomiarów na stanowisku zarejestrowane są dane pomiarowe zawierające K obrazów, z których każdy ma M wierszy i N kolumn. Sygnał odczytywany z każdego detektora matrycy jest rejestrowany w postaci napięcia o wartości $U(m,n,k,T)$. Oznaczenie $U(m,n,k,T)$ określa sygnał w postaci napięcia odczytany z detektora położonego w m – tym wierszu i n – tej kolumnie na k – tym obrazie (ramce), który został wywołany promieniowaniem obiektu o temperaturze T .

Korekcja niejednorodności odpowiedzi matrycy detektorów podświetlonych polega na skorygowaniu odpowiedzi każdego detektora według równania [7, 8]:

$$U^*(m,n,k,T) = G(m,n) \cdot U(m,n,k,T) + O(m,n). \quad (1)$$

Współczynniki $G(m,n)$ i $O(m,n)$ opisane są wyrażeniami [7]:

$$G(m,n) = \frac{\tilde{U}(T_2) - \tilde{U}(T_1)}{\bar{U}(m,n,T_2) - \bar{U}(m,n,T_1)}, \quad (2)$$

$$O(m,n) = \frac{\tilde{U}(T_1) \cdot \bar{U}(m,n,T_2) - \tilde{U}(T_2) \cdot \bar{U}(m,n,T_1)}{\bar{U}(m,n,T_2) - \bar{U}(m,n,T_1)}, \quad (3)$$

gdzie:

$$\bar{U}(m,n,T) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K U(m,n,k,T), \quad (4)$$

$$\tilde{U}(T) = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \bar{U}(m,n,T). \quad (5)$$

Czułość kamery termowizyjnej można wyznaczyć poprzez pomiar odpowiedzi detektorów matrycy na obraz z rozciągniętego źródła promieniowania mającego cechy ciała doskonale czarnego w dwóch różnych wartościach temperatury T_1 i T_2 . Temperatury T_1 i T_2 powinny znajdować się w okolicy 300 K. Czułość każdego detektora matrycy jest określona następującym równaniem [7, 8]:

$$R(m,n) = \frac{U(m,n,k,T_2) - U(m,n,k,T_1)}{T_2 - T_1} \cdot \frac{1}{\Omega_{norm}(m,n)}. \quad (6)$$

Natężenie promieniowania musi zostać skorygowane za pomocą współczynnika korygującego Ω_{norm} wyznaczonego dla każdego detektora jako funkcja kąta bryłowego w stosunku do centralnie umieszczonego detektora [6].

Kolejnym parametrem służącym do oceny działania kamery termowizyjnej jest wartość skuteczna szumu. Wartość skuteczną szumu detektorów w matrycy wyznacza się za pomocą równania:

$$noise(m,n) = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K [U(m,n,k) - \bar{U}(m,n)]^2}. \quad (7)$$

Jednym z ważniejszych parametrów kamery termowizyjnej jest różnica temperatury równoważna szumowi NETD (noise equivalent temperature difference). Parametr NETD dla detektora (m,n) jest wyznaczany za pomocą równania:

$$NETD(m,n) = \frac{noise(m,n)}{R(m,n)}. \quad (8)$$

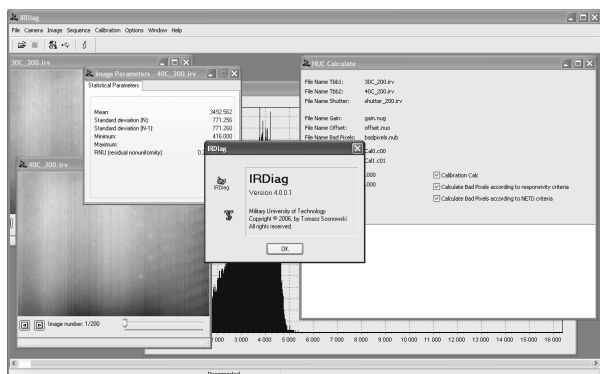
Część detektorów w matrycy mikrobolometrycznej może być uszkodzona. Wykrywanie uszkodzonych detektorów odbywa się na podstawie danych pomiarowych zebranych na stanowisku badawczym. Za uszkodzone detektory uważa się te, które nie spełniają jednego z poniższych warunków:

$$R(m,n) \in (0,8 \cdot \bar{R}, 1,2 \cdot \bar{R}), \quad (9)$$

$$NETD(m,n) < 1,5 \cdot \overline{NETD}(m,n). \quad (10)$$

4. Oprogramowanie IRDiag

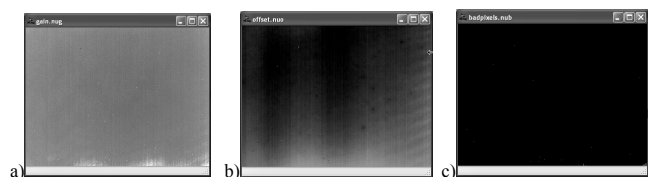
W celu wyznaczenia współczynników korekcji NUC oraz parametrów kamery termowizyjnej należy wykonać szereg pomiarów odpowiedzi detektorów matrycy dla dwóch różnych wartości temperatury ciał doskonale czarnych. Minimalizacja wpływu zmian parametrów pracy matrycy na wynik pomiarów jest możliwa, gdy pomiary odbywają się w krótkich odstępach czasu. W tym celu zostało zbudowane specjalne stanowisko pomiarowe, gdzie zmiana obserwowanego obiektu następuje automatycznie. Rejestracja danych pomiarowych niezbędnych do wyznaczenia współczynników korekcji NUC i parametrów kamery termowizyjnej odbywa się za pomocą oprogramowania IRDiag. Ponadto oprogramowanie IRDiag pozwala na obliczenie podstawowych parametrów statystycznych obrazów takich jak wartość średnia, odchylenie standardowe, histogram. Na rys. 5 przedstawiono przykładowe okna programu.



Rys. 5. Przykładowe okna programu IRDiag
Fig. 5. Exemplary software window of the IRDiag software

W oprogramowaniu IRDiag jest zaimplementowany specjalny kreator pozwalający wykonać wszystkie wymagane czynności przy jak najmniejszej ingerencji użytkownika. Za pomocą kreatora są uruchamiane funkcje sterujące poszczególnymi elementami stanowiska jak np. modułu oprogramowania Motion Control. Dzięki temu w znacznym stopniu zostaje zmniejszone prawdopodobieństwo popełnienia błędu przez operatora stanowiska.

Na rys. 6 zostały przedstawione przykładowe okna programu zawierające wyznaczone współczynniki korekcji Gain i Offset, wyznaczony rozkład uszkodzonych pikseli (BadPixels).



Rys. 6. Przykładowe okna programu IRDiag zawierające rozkład przykładowych współczynników Gain (a), Offset (b) i BadPixels (c) dla badanej kamery termowizyjnej

Fig. 6. Exemplary software windows of the IRDiag software with Gain (a), Offset (b) and BadPixels (c) calibration arrays determined for the evaluated infrared camera

5. Wnioski

W pracy przedstawiono stanowisko badawczo-pomiarowe oraz algorytm rejestracji danych pozwalający wyznaczyć współczynniki kalibracyjne dla znanej dwupunktowej metody kalibracji niejednorodności odpowiedzi detektorów matrycy. Uzupełniono oprogramowanie IRDiag o kreator umożliwiający zautomatyzowane przeprowadzenie pomiarów oraz przetestowano procedury i funkcje do sterowania elementami stanowiska.

Opracowane stanowisko do pomiaru i wyznaczania parametrów oraz wyznaczania współczynników korekcji niejednorodności NUC umożliwia przeprowadzenie automatycznej kalibracji kamery termowizyjnej oraz pozwala na wyznaczenie jej podstawowych parametrów. Opracowany algorytm pomiaru parametrów i wyznaczania współczynników korekcji niejednorodności kamery termowizyjnej pozwolił na poprawne zarejestrowanie danych pomiarowych. Zastosowanie modułu przemieszczania liniowego wraz ze sterownikiem i kontrolerem z napisanym oprogramowaniem sprawiło, że zaprojektowane stanowisko badawczo – pomiarowe jest w pełni zautomatyzowane. Moduł liniowy pozwala na ustawienie wózka z kamerą termowizyjną z wymaganą dokładnością i powtarzalnością. Ma to znaczący wpływ na dokładność wykonywanych pomiarów, ponieważ zmniejsza się prawdopodobieństwo wystąpienia błędu wynikającego z nieprecyzyjnego ustawienia kamery termowizyjnej względem ciała doskonale czarnego oraz z wpływu operatora na proces pomiarowy. Ważną właściwością zaprojektowanego stanowiska badawczo - pomiarowego jest możliwość rejestrowania obrazu z kalibrowanej kamery termowizyjnej w czasie rzeczywistym. Dzięki takiemu rozwiązaniu użytkownik na podstawie obrazu, który jest wyświetlany na monitorze, może skorygować ustawienia wszystkich elementów stanowiska pomiarowego.

W wyniku przeprowadzonych badań potwierdzono, że wyznaczone na stanowisku współczynniki korekcyjne dla detektorów matrycy w obserwacyjnej kamerze termowizyjnej są prawidłowe

Praca naukowa współfinansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

6. Literatura

- [1] Bieszczad G., Krupiński M., Madura H., Sosnowski T.: Thermal Camera for Autonomous Mobile Platforms, Vision Based Systems for UAV Applications, Studies in Computational Intelligence Volume 481, 2013, pp. 95-114.
- [2] Perry D. L., Dereniak E. L.: Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors, Opt. Eng. 32(8), 1854-1859 (Aug 01, 1993).
- [3] Sosnowski T., Bieszczad G., Kastek M., Madura H.: Digital image processing in high resolution infrared camera with use of programmable logic device, Proceedings of SPIE Vol. 7838, 78380U (2010).
- [4] Bieszczad G., Sosnowski T., Madura H., Kastek M., Barela J.: Adaptable infrared image processing module implemented in FPGA, Proceedings of SPIE Vol. 7660, 76603Z (2010).
- [5] Sosnowski T., Madura H., Bieszczad G., Kastek M., Chmielewski K.: Construction, parameters, and research results of thermal weapon sight, Proc. SPIE 8193, 81933S (2011).
- [6] Bieszczad G., Gogler S., Sosnowski T., Madura H., Kucharz J.: Determining the responsivity of microbolometer FPA using variable optical aperture stop Proceedings of SPIE 8541-56 (2012).
- [7] Orzanowski T., Sosnowski T., Madura H.: Metoda korekcji czułości matrycowych detektorów podczerwieni, Pomiar Automatyka Kontrola PAK Vol. 57 nr 10, s. 1108-1111, 2011.
- [8] Tissot J. L.: Uncooled Infrared Detectors: State of the Art, VII Konferencja Krajowa Termografia i Termometria w Podczerwieni TTP2006, Ustroń-Jaszowiec, 16-18 listopada 2006, s. 9-23.

otrzymano / received: 14.06.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.08.2013

artykuł recenzowany / revised paper