

Paweł KOWALSKI*
Robert SMYK*

BEZDOTYKOWY POMIAR TEMPERATURY Z WYKORZYSTANIEM MATRYCY IR Z KOMPENSACJĄ BŁĘDU BAZUJĄC NA WYZNACZANIU ODLEGŁOŚCI OD OBIEKTU

Artykuł przedstawia metody doboru parametrów algorytmu kompensacji błęd pomiaru temperatury przy użyciu czujnika termowizyjnego. W pracy przedstawiono analizę parametrów fizycznych obiektu oraz ich wpływ na dobór sensora do bezdotykowego pomiaru temperatury. Zaprezentowano również koncepcję urządzenia wyposażonego w termowizyjny czujnik matrycowy do autonomicznego pomiaru temperatury obiektu z automatyczną kompensacją błęd na podstawie odległości. Wykrycie obiektu oraz pomiar odległości czujnika temperatury od obiektu dokonywany jest poprzez analizę stereoskopowego obrazu z dwóch kamer.

SŁOWA KLUCZOWE: termowizja, bezdotykowy pomiar temperatury, kompensacja błęd, pirometr, robot pomiarowy

1. WSTĘP

Bezdotykowy pomiar temperatury obarczony jest pewnym błędem pomiarowym. Błąd ten może być spowodowany zarówno właściwościami fizycznymi badanego obiektu jak i otoczenia. Ciała rzeczywiste charakteryzują się m.in. różnymi wartościami emisyjności, co należy uwzględnić przy zdalnych pomiarach temperatury [1–3]. Znane są w literaturze również metody pomiaru temperatury z kompensacją błęd pomiarowego spowodowanego innymi czynnikami [1, 4, 5]. Algorytmy kompensacji uwzględniają wpływ takich czynników jak np. transmisyjność i emisyjność atmosfery, charakterystykę soczewek, detektorów, filtrów, wilgotność, ciśnienia i temperatury otoczenia, czy temperatury detektora. Z reguły pomiary termowizyjne prowadzone są w celu zbadania temperatury względnej lub obserwacji zmiany temperatury obiektu. W takim przypadku kompensacja błęd na podstawie odległości nie jest wymagana [2, 6].

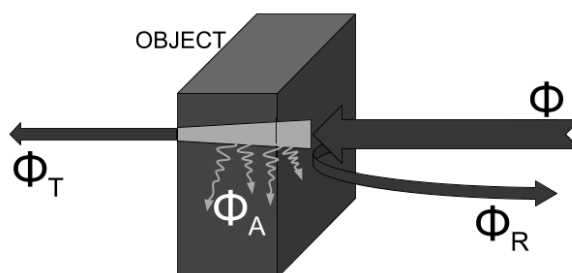
W ramach niniejszej pracy przeprowadzono badania eksperymentalne polegające na pomiarze temperatury w pomieszczeniu charakteryzującym się małą zmiennością warunków klimatycznych. Wyniki badań posłużyły do opracowa-

* Politechnika Gdańska.

nia modelu błędu pomiarowego a następnie algorytmu kompensacji tego błędu. W rozdziale 2 przedstawiono analizę parametrów fizycznych obiektu i ich wpływ na dobór czujnika do bezdotykowego pomiaru temperatury. W rozdziale 3 przedstawiono przebieg procedury pomiarowej, a w rozdziale 4 przedstawiono algorytm kompensacji błędu.

2. ANALIZA PARAMETRÓW FIZYCZNYCH OBIEKTU PRZY BEZDOTYKOWYM POMIARZE TEMPERATURY

W celu przeprowadzenia bezdotykowego pomiaru temperatury mierzona jest energia emitowana przez ciało. Każde ciało fizyczne o temperaturze wyższej od 0K jest źródłem promieniowania cieplnego zwanego także promieniowaniem temperaturowym. Monochromatyczne natężenie tego promieniowania zależy od długości fali oraz temperatury obiektu emitującego. Strumień cieplny Φ padający na ciało definiowany jest jako ilość ciepła w jednostce czasu (rys. 1). Strumień cieplny Φ może być przez ciało odbity w postaci Φ_R , przepuszczony w postaci Φ_T lub też pochłonięty w postaci Φ_A . Rozkład strumienia cieplnego opisywany jest zależnością $\Phi = \Phi_R + \Phi_T + \Phi_A$, zgodnie z prawem Kirchlhoffa [3].



Rys. 1. Rozkład strumienia cieplnego padającego na ciało fizyczne

W celu klasyfikacji właściwości ciał definiowane są współczynniki: absorpcji (ang. *absorbance*) $\alpha = \Phi_A / \Phi$, refleksyjności (odbicia, ang. *reflectance*) $\rho = \Phi_R / \Phi$, oraz przepuszczalności (ang. *transmittance*) $\tau = \Phi_T / \Phi$. Ze względu na różne wartości tych współczynników wyróżniamy trzy specyficzne przypadki. Ciało doskonale czarne (ang. *perfect blackbody*) pochłania całkowicie padające na nie promieniowanie cieplne niezależnie od długości fali. Ciało takie charakteryzuje się współczynnikami $\tau = 0$, $\rho = 0$, $\alpha = 1$. Ciało doskonale białe (ang. *perfect mirror*) odbija całkowicie padające promieniowanie, posiada współczynniki $\tau = 0$, $\rho = 1$, $\alpha = 0$. Ciało doskonale przezroczyste (ang. *perfect transparent body*) przepuszcza całkowicie padające promieniowanie, posiada współczynniki $\tau = 1$, $\rho = 0$, $\alpha = 0$. Prawo Kirchlhoffa dotyczące promieniowania

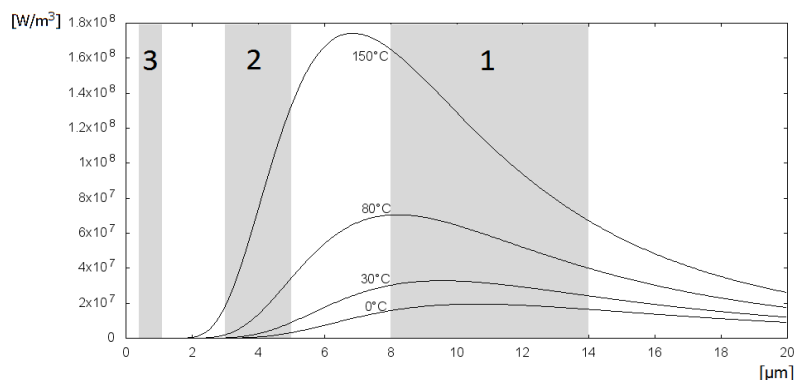
cieplnego przewiduje, że względna zdolność emisyjna ε (stosunek emitowanego promieniowania do promieniowania emitowanego przez ciało idealnie czarne o tej samej temperaturze) ciała nieprzezroczystego w równowadze termodynamicznej z otoczeniem powinna być równa współczynnikowi absorpcji α [7, 8]. Względna zdolność emisyjna ε będzie nazywana dalej emisyjnością. Ciało dla którego współczynnik ten dla całego zakresu długości fal oraz temperatur nie zmienia się $\varepsilon(\lambda, T) = const$ nazywane jest ciałem szarym. W obliczeniach technicznych większość ciał rzeczywistych można traktować jak ciało szare [3]. Monochromatyczne natężenie promieniowania (emitancja widmowa) ciała doskonale czarnego, wyrażone w jednostkach $[W/m^3]$, opisuje równanie Plancka

$$M_{\lambda}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)}, \quad (1)$$

gdzie λ długość fali wyrażona w $[\mu m]$, T temperatura w $[K]$, h oznacza stałą Plancka równą $h = 6,626175 \cdot 10^{-34}$ $[Js]$. Przyjmuje się, że prędkość światła w próżni wynosi $c = 2,9979246 \cdot 10^8$ $[m/s]$, a stała Boltzmanna $k = 1,380662 \cdot 10^{-23}$ $[J/K]$. Można zauważyć, że wraz ze wzrostem temperatury maksimum emitowanej energii z rozkładu Plancka przesuwa się w stronę krótszych fal. Zależność tą opisuje prawo Wiena $\lambda_{max} = b/T$, gdzie b jest stałą Wiena równą $b = 2,897\,772\,910 \cdot 10^{-3}$ $[mK]$ [9].

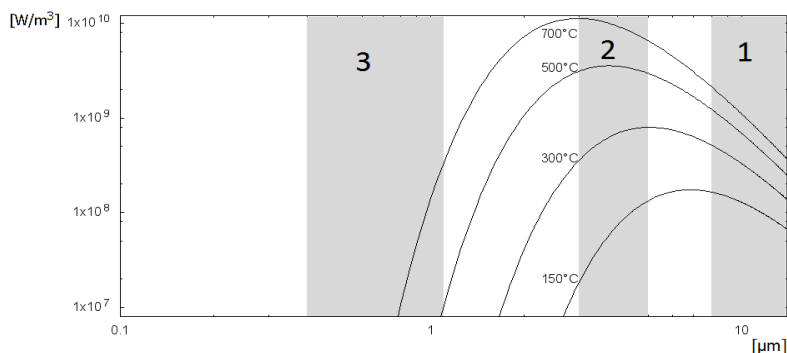
Korzystając z (1) stworzono wykresy emitancji widmowej ciała idealnie czarnego dla temperatur $0^{\circ}C$, $30^{\circ}C$, $80^{\circ}C$, $150^{\circ}C$, $300^{\circ}C$, $500^{\circ}C$ oraz $700^{\circ}C$ (rys. 2–3). Wykresy opracowano celem pokazania, że zakresy pracy czujników, związane z długością fali, odpowiednio dobiera się do zakresu mierzonej temperatury. Na wykresach ciemniejszym kolorem zaznaczono trzy okna transmisyjne atmosfery pokrywające się z typowymi zakresami pomiarowymi sensorów [10, 11]. W zaznaczonych zakresach długości fal atmosfera na dystansie 1 km i wysokości równej poziomowi morza posiada transmisyjność na poziomie ok. 90% [12]. Pierwszy zakres odnosi się do długości fal od 8 μm do 14 μm i pokrywa się z zakresem pomiarowym prezentowanego dalej pirometru [10]. Drugi zakres zawiera częstotliwości od 3 μm do 5 μm . W tym zakresie pracują kamery termowizyjne takie jak $\mu Core-275Z$, $Mini-Core HRC$, $MCT 3000$ [13]. Trzeci zaznaczony obszar od 0,4 μm do 1,1 μm odnosi się do zakresu długości fal rejestrowanych przez standardowe moduły kamer, np. OV2640 [14].

Jak widać z wykresu (rys. 2) maksimum funkcji dla temperatury do $150^{\circ}C$ leży najbliższej okna 1. W takim przypadku do pomiaru temperatury najodpowiedniejszy będzie czujnik pracujący w zakresie okna 1.



Rys. 2. Emitancja widoma ciała doskonale czarnego dla temperatur 0°C, 30°C, 80°C oraz 150°C

Zgodnie z rys. 3 przy temperaturze obiektu powyżej 300°C maksimum funkcji leży znacznie bliżej okna 2 niż okna 1, w takim przypadku do pomiaru temperatury odpowiedni będzie detektor działający w zakresie okna 2. Dla obiektów o temperaturze powyżej 500°C część emitowanego promieniowania zawiera się w zakresie okna 3. W tym przypadku w roli sensora może zostać wykorzystana standardowa kamera, przykładem jest tu moduł kamery OV2640.



Rys. 3. Emitancja widoma ciała doskonale czarnego dla temperatur 150°C, 300°C, 500°C oraz 700°C

3. PRZEBIEG PROCEDURY POMIAROWEJ

W celu przeprowadzenia eksperymentu polegającego na pomiarze temperatury w funkcji odległości zbudowano dedykowane urządzenie pomiarowe przedstawione na rys. 4. Urządzenie składa się z dalmierza stereoskopowego, pirometru oraz dwóch bezdotykowych czujników temperatury Omron D6T-8L-06 [15]. Czujnik tego typu składa się z matrycy ośmiu pikseli ułożonych w linii. Poje-

dyncze piksele matrycy, pełniące rolę niezależnych czujników zostały zrealizowane w postaci termostosu. Termostos tworzą warstwy termopary, których przy obecnym rozwoju układów scalonych może być kilkaset [16]. Kąt widzenia czujnika D6T-8L-06 wynosi $62.8^\circ \times 6^\circ$. W celu niezależnego pomiaru temperatury wykorzystano pirometr pistoletowy typu AR320 o zakresie pomiarowym od -32°C do 320°C oraz kącie widzenia obiektywu 5° [10]. Dalmierz wykorzystuje także dwie kamery do stereoskopowego pomiaru odległości. Parametry użytych kamer to: rozdzielczość 640×480 px oraz kąt widzenia 20° . Odległość obliczana jest na podstawie kątów obserwacji obiektu z kamer. Zbudowane urządzenie na dystansie do 5 m oblicza odległość z dokładnością ok. 4 cm. Pomiędzy kamerami zamontowane zostały dwa ośmio-pikselowe czujniki temperatury D6T-8L-06 (jeden ułożony horyzontalnie, drugi wertykalnie) wykorzystujące komunikację w standardzie I2C. W celu poprawnej komunikacji z czujnikami oraz akwizycji danych wykorzystano platformę STM32F411 [17]. W STM32F411 zaimplementowano oprogramowanie sterujące pracą czujników oraz konwersją surowych danych pomiarowych pochodzących z matrycy czujnika na wartości temperatur w stopniach Celsjusza. Wartości te są transmitowane w standardzie UART za pomocą konwertera VCOM-USB. Do wizualizacji wyników użyto komputera klasy PC wyposażonego w interfejs USB, przez który odbierano wartości temperatur.



Rys. 4. Urządzenie do pomiaru odległości i temperatury

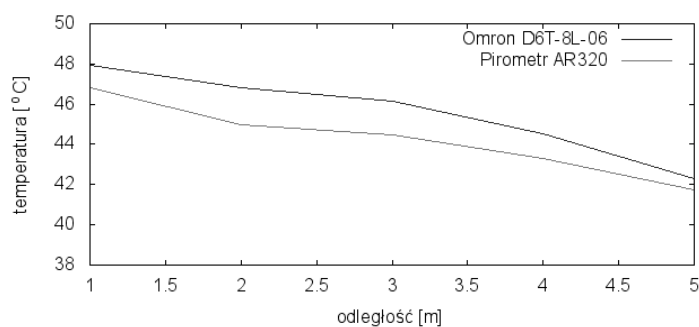
Podczas eksperymentu przebadano źródło ciepła o kształcie prostokątnym, wymiarach $60 \text{ cm} \times 120 \text{ cm}$. Początkowo pomiary zostały wykonane w czterech seriach z odległości od 1 do 5 m, w odstępach co 1 m. Wyniki pomiarów zawierające odległość L i temperaturę zmierzoną przez czujniki termowizyjne Omron D6T-8L-06 oraz pirometr AR320 zawarto w tabeli 1.

Dane przedstawione w tabeli 1 zostały zobrazowane na rys. 5. W tym przypadku różnica między wskazaniem czujników Omron i Pirometru nie przekracza 2°C .

Podczas pierwszych prób pomiarowych okazało się, że istnieje potrzeba wykonania pomiarów z większą liczbą próbek w serii. W celu automatyzacji akwizycji danych zbudowano autonomicznego robota (rys. 6).

Tabela 1. Uśrednione wyniki pomiarów przy pomocy urządzenia z dalmierzem stereoskopowym

| L[m] | D6T-8L-06[°C] | AR320[°C] |
|------|---------------|-----------|
| 1 | 47,95 | 46,825 |
| 2 | 46,825 | 45 |
| 3 | 46,175 | 44,5 |
| 4 | 44,55 | 43,275 |
| 5 | 42,3 | 41,75 |



Rys. 5. Temperatura obiektu w zależności od odległości przy pomiarze czujnikiem Omron oraz pirometrem



Rys. 6. Robot do automatycznego seryjnego pomiaru temperatury

Podwozie robota sterowane jest przy użyciu mikrokontrolera STM32F303 [18]. Pomiar odległości dokonywany jest za pomocą enkoderów kwadraturowych zamontowanych na silnikach napędowych, co w połączeniu z przekładniami 1:10 pozwala na uzyskanie rozdzielczości ok. 0,3 [mm/krok]. Część obsługującą czujniki oraz moduł nadawczy zrealizowano z wykorzystaniem mi-

kontrolera STM32F411RE [17]. Za pomocą mikrokontrolera surowe dane z czujników są przetwarzane na wartość temperatury w stopniach Celsjusza. Przesyłanie wyników odbywa się za pośrednictwem interfejsu USART z wykorzystaniem Bluetooth.

Procedura pomiarowa przy użyciu robota w pojedynczej serii składa się z 50 sekwencji. Każda sekwencja pomiarowa wykonywana jest ze stałym przyrostem odległości $\Delta L = 10$ cm, traktowanym jako odległość jednostkowa. Akwizycja danych w pojedynczej sekwencji polega na oddalaniu się robota na ΔL od aktualnej pozycji, zatrzymaniu, dokonaniu pomiaru oraz przesłania wyników do komputera PC. Czynność ta jest powtarzana aż do osiągnięcia dystansu 5 m. Po dokonaniu ostatniego pomiaru z odległości 5 m robot powraca do pozycji początkowej i rozpoczyna kolejną serię pomiarową.

W rezultacie wykonano kilkanaście serii pomiarowych. Zebrane dane posłużyły do stworzenia próbki wzorcowej. Próbka wzorcowa stworzona została poprzez zastosowanie filtru medianowego. Próbki zarchiwizowane w ramach jednej przykładowej serii zawarto w tabeli 2. Próbki pochodzące z jednej serii mogą służyć do strojenia modelu w pojedynczej iteracji w zaproponowanej metodzie kompensacji błędów opisanej dalej.

Tabela 2. Pomiar temperatury czujnikiem Omron z wykorzystaniem robota pomiarowego

| L [cm] | t_p [°C] | L [cm] | t_p [°C] | L [cm] | t_p [°C] |
|--------|------------|--------|------------|--------|------------|
| 10 | 44 | 180 | 44.5 | 350 | 43.8 |
| 20 | 43.8 | 190 | 44.5 | 360 | 43.7 |
| 30 | 43.7 | 200 | 44.5 | 370 | 43.5 |
| 40 | 43.7 | 210 | 44.7 | 380 | 43.3 |
| 50 | 43.6 | 220 | 44.8 | 390 | 42.8 |
| 60 | 43.7 | 230 | 44.9 | 400 | 42.6 |
| 70 | 43.8 | 240 | 44.9 | 410 | 42.2 |
| 80 | 43.8 | 250 | 44.8 | 420 | 41.9 |
| 90 | 44 | 260 | 44.8 | 430 | 41.9 |
| 100 | 43.9 | 270 | 44.6 | 440 | 41.8 |
| 110 | 44 | 280 | 44.6 | 450 | 41.6 |
| 120 | 44.1 | 290 | 44.6 | 460 | 41 |
| 130 | 44.2 | 300 | 44.5 | 470 | 40.4 |
| 140 | 44.4 | 310 | 44.5 | 480 | 39.4 |
| 150 | 44.5 | 320 | 44.3 | 490 | 38.4 |
| 160 | 44.5 | 330 | 44.1 | 500 | 37.6 |
| 170 | 44.5 | 340 | 44.1 | | |

4. METODA KOMPENSACJI BŁĘDU

Na podstawie próbki wzorcowej obliczono błąd bezwzględny e_{tp} jako

$$e_{tp} = t_r - t_p, \quad (3)$$

gdzie: t_r – temperatura rzeczywista, t_p – temperatura zmierzona.

Zbiór wartości błędu został użyty do stworzenia modelu funkcji błędu, której parametrem podstawowym jest odległość czujnika pomiarowego od mierzonego obiektu

$$e_{appr_i}(L_i) = \sum_{j=0}^n a_j f_j(L_i), \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

gdzie: $f_j(L) = L^j$, m – liczba próbek w serii wzorcowej, a – wektor współczynników służących do strojenia modelu, n – stopień wielomianu, i – indeks odległości. Błąd sumaryczny modelu przybliżającego błąd pomiaru temperatury można określić jako

$$S = \sum_{i=0}^m \left[e_{tp_i} - \sum_{j=0}^n a_j f_j(L_i) \right]^2, \quad (5)$$

gdzie: e_{tp} – błąd bezwzględny pomiaru temperatury.

W celu znalezienia współczynników a należy policzyć pochodne funkcji (5) po wszystkich współczynnikach a i przyrównać je do 0

$$\frac{\partial S}{\partial a_k} = -2 \left\{ \sum_{i=0}^m \left[e_{tp_i} - \sum_{j=0}^n a_j f_j(L_i) \right] f_k(L_i) \right\} = 0, \quad k = 0, 1, \dots, m \quad (6)$$

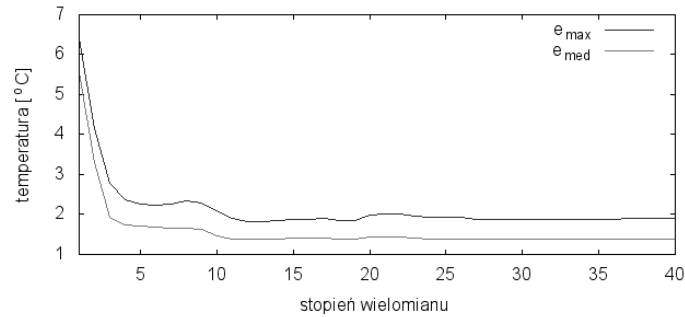
Po uporządkowaniu zależności (5) otrzymamy

$$\sum_{j=0}^m \left[\sum_{i=0}^n f_i(L_i) f_k(L_i) \right] a_j = \sum_{i=0}^n f_k(L_i) e_{tp_i}, \quad k = 0, 1, \dots, m \quad (7)$$

Rozwiązując układ równań (7) można uzyskać współczynniki strojące funkcję modelującą błąd bezwzględny. Skompensowana wartość mierzonej temperatury t_{appr} (rys. 8–9) wynika z zależności

$$t_{appr} = t_p + e_{appr}, \quad (8)$$

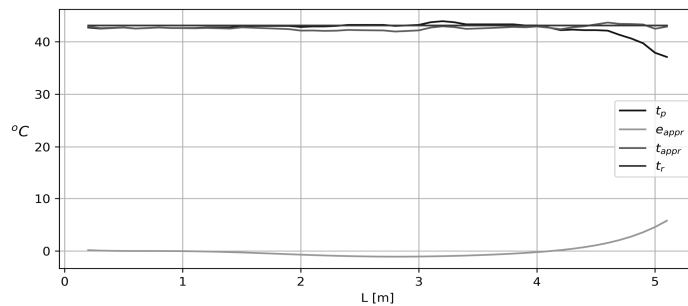
Uzyskany model błędu bezwzględnego wykorzystuje funkcję wielomianową. Przebadano wpływ wielkości stopnia wielomianu na dokładność aproksymacji. Do tego celu model został wystrojony przy pomocy próbki wzorcowej. Model błędu posłużył do korekcji zmierzonej temperatury obiektu. Pomiar został wykonany w 5 seriach. Po korekcji temperatury z zastosowaniem funkcji aproksymującej porównano temperaturę rzeczywistą z temperaturą aproksymowaną. Błąd w zależności od stopnia wielomianu został przedstawiony na rys. 7.



Rys. 7. Rozkład mediany oraz maksymalnego błędu w zależności od stopnia wielomianu aproksymującego

Lokalne minimum osiągnięte jest dla wielomianów 6 i 12 stopnia. Przy aproksymacji wielomianem 6 stopnia, maksymalny bezwzględny błąd określania temperatury nie przekracza 2.3°C , a mediana 1.8°C . W przypadku zastosowania wielomianu 12 stopnia wartości te wynoszą odpowiednio 1.8°C i 1.4°C . Zastosowanie aproksymacji wielomianem większego stopnia nie skutkuje zauważalną poprawą dokładności.

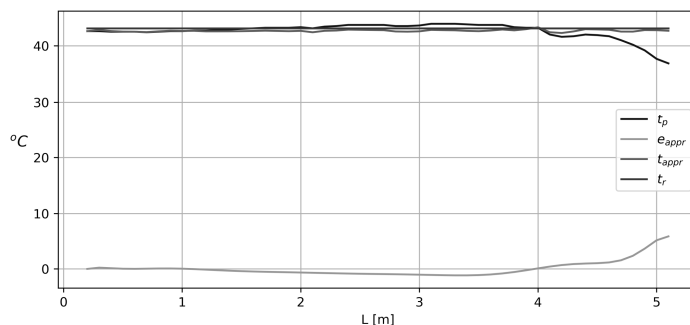
Model błędu dla aproksymacji wielomianem 6 stopnia (rys. 8) ma postać

$$e_{\text{appr}}(L) = 0.02058 \cdot L^6 - 0.297 \cdot L^5 + 1.651 \cdot L^4 - 4.267 \cdot L^3 + 5.007 \cdot L^2 - 2.681 \cdot L + 0.544 \quad (8)$$


Rys. 8. Kompensacja błędu pomiaru temperatury z wykorzystaniem aproksymacji wielomianowej 6 stopnia

Model błędu dla aproksymacji wielomianem 12 stopnia (rys. 9) ma postać

$$e_{\text{appr}}(L) = (-4.934 \cdot 10^{-3} \cdot L^{12}) + 0.1504 \cdot L^{11} - 2.022 \cdot L^{10} + 15.78 \cdot L^9 - 79.31 \cdot L^8 + 268.8 \cdot L^7 - 625.4 \cdot L^6 + 997.4 \cdot L^5 - 1069 \cdot L^4 + 739.4 \cdot L^3 - 307.6 \cdot L^2 + 67.67 \cdot L - 5.724 \quad (9)$$



Rys. 9. Kompensacja błędu pomiaru temperatury z wykorzystaniem aproksymacji wielomianowej 12 stopnia

Zaproponowana metoda kompensacji błędu umożliwia uzyskanie błędu bezwzględnego nie większego niż 2.3°C dla aproksymacji wielomianem 6 stopnia oraz 1.8°C dla aproksymacji 12 stopnia. Dalsze zwiększanie stopnia wielomianu nie wpływa na poprawę aproksymacji temperatury.

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wpływ temperatury obiektu na dobór sensora do bezdotykowego pomiaru temperatury. Do eksperymentu zostały wybrane czujniki pracujące w zakresie okna 1, ponieważ badany obiekt ($T \approx 317\text{K}$) w paśmie okna 1 posiada największą emitancję. W artykule zaproponowano metodę kompensacji błędu pomiaru temperatury przy użyciu czujnika termowizyjnego. Podczas eksperymentu pomiary zostały przeprowadzane w budynku, gdzie wybrane pomieszczenie charakteryzuje się małą zmiennością warunków klimatycznych. Z tego powodu kompensację zrealizowano przy uwzględnieniu jedynie odległości. Zaproponowana metoda kompensacji opiera się o algorytm aproksymacji średniokwadratowej. W pracy zaprezentowano również koncepcję urządzenia do pomiaru temperatury z wbudowanym algorytmem automatycznej kompensacji błędu pomiarowego. W celu przeprowadzenia pomiarów w kilkudziesięciu seriach opracowano autonomiczne urządzenie do akwizycji danych z dwóch czujników matrycowych.

LITERATURA

- [1] Neto E., Costa E., Maia M., Influence of Emissivity and Distance in High Voltage Equipments Thermal Imaging, 2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Latin America, Caracas 2006, ISSN 9781424402878.

-
- [2] Wesołowski M., Niedbała R., Hauser J., Wyznaczanie dyfuzyjności cieplnej przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering* 2014, No.79, pp. 269-278.
- [3] Rojek M., Metodologia badań diagnostycznych warstwowych materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej, *Open Access Library, Volume 2*, 2011, ISSN 2083-5191.
- [4] Özşarac S., Akar G. B., Atmospheric Effects Removal for the Infrared Image Sequences, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 9, pp. 4899-4909, Sept. 2015.
- [5] Petitcolin F., Vermote E., Land surface reflectance, emissivity and temperature from MODIS middle and thermal infrared data, *Remote Sensing of Environment*, Volume 83, Issues 1-2, pp. 112–134, November 2002.
- [6] Antczak I., Banaś A., Kapuścińska I., The use of thermovision in the estimation of thermal energy losses of buildings, *Structure and Environment*, Vol. 3, no. 4, 2011.
- [7] Kirchhoff G. R., 'Ueber das Verhältniss zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht,' *Annalen der Physik und Chemie*, 109, 275 (1860); Translated by Guthrie F. as Kirchhoff G., On the relation between the radiating and absorbing powers of different bodies for light and heat. *Philosophical Magazine. Series 4* 20: 1–21(1860).
- [8] Tanyi E. K., Burton B. T., Narimanov E. E., Noginov M. A., Thermal radiation of Er doped crystals: Studying the range of applicability of the Kirchhoff's law, 2016 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, CA, 2016, pp. 1-2.
- [9] US National Institute of Standards and Technology, The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty: Wien wavelength displacement law constant. [access: 01-02-2017].
- [10] Smart Sensor, Non-contact infrared thermometer Instruction Manual, MODEL:AR320, 2013.
- [11] FLIR Commercial Vision Systems B.V., Seeing through fog and rain with a thermal imaging camera, technical note, 2007.
- [12] Raytheon Vision Sytem, The Infrared Wall Chart, California 2009.
- [13] Flir, µCore-275Z, Mini-Core HRC, MCT 3000, Midwave Infrared Cooled Camera Core Products, 2012.
- [14] OmniVision Technologies, Inc., OV2640 Datasheet 2006.
- [15] Omron, Application Note 01 Usage of D6T-44L / -8L / -1A Thermal sensor, 2015.
- [16] Schilz J., THERMOELECTRIC INFRARED SENSORS (THERMOPILES) FOR REMOTE TEMPERATURE MEASUREMENTS; PYROMETRY, PerkinElmer Optoelectronics GmbH, Germany 2000.
- [17] STMicroelectronics, DS10314: STM32F411xC STM32F411xE Datasheet, 2016.
- [18] STMicroelectronics, STM32F100x4 STM32F100x6 STM32F100x8 STM32F100xB Low & medium-density value line, advanced ARM®-based 32-bit MCU with 16 to 128 KB Flash, 12 timers, ADC, DAC & 8 comm interfaces, 2015.

**CONTACTLESS TEMPERATURE MEASUREMENT USING IR MATRIX
WITH ERROR COMPENSATION BASED ON DISTANCE DETERMINATION**

The paper presents algorithm for compensation of temperature measurement error in contactless measurement method using IR sensor. An analysis of the physical parameters of the object for non-contact temperature measurement and its impact on the selection of sensors has been introduced. A concept of autonomic device for temperature measurement with automatic error compensation based on distance has been presented. Object detection procedure and measurement of the distance between object and device is realized through analysis of stereoscopic image from two cameras.

(Received: 30. 01. 2017, revised: 17. 02. 2017)