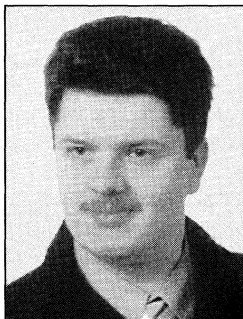


**Robert BĄBKA, Waldemar MINKINA**POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA, WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY  
INSTYTUT ELEKTRONIKI I SYSTEMÓW STEROWANIA**Wpływ charakterystyki kalibracji kamery termowizyjnej na dokładność podpixselowego pomiaru położenia krawędzi obiektów termicznych**

Mgr inż. Robert BĄBKA

Urodzony w 1971 r. Absolwent Wydziału Elektrycznego. Od 1996 roku pracuje w Instytucie Elektroniki i Systemów Sterowania Politechniki Częstochowskiej na stanowisku asystenta. Obecnie zajmuje się problematyką pomiarów i przetwarzania sygnałów dla systemów automatyki, w szczególności zastosowaniem technik pomiarów termowizyjnych. Jest autorem lub współautorem 14 publikacji.



Dr hab. inż. Waldemar Andrzej MINKINA

Profesor nadzwyczajny Politechniki Częstochowskiej; kieruje Zakładem Techniki Mikroprocesorowych, Automatyki i Pomiarów Ciepłych; obecnie także dyrektor Instytutu Elektroniki i Systemów Sterowania na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 1983r, a doktora habilitowanego – w 1995r. Jest autorem i współautorem 1 monografii, około 70 publikacji oraz 6 patentów.



*Cd. notki biograficznej w artykule na stronie 5.*

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono wpływ charakterystyki kalibracyjnej kamery termowizyjnej na dokładność podpixselowego pomiaru położenia krawędzi obiektów termicznych. Opisane zjawisko ma miejsce w przypadku identyfikacji parametrów geometrycznych obiektów na podstawie obrazu pola temperatury przekształconego do postaci termogramu. W oparciu o matematyczny model krawędzi zaprezentowano metodę wyznaczania błędu systematycznego pochodzącego od rozpatrywanego przekształcenia. Załączono wyniki obliczeń błędów dla kamery ThermoCAM PM 595 w różnych warunkach pomiarowych.

**Abstract**

An influence of the calibration curve of the IR camera on the sub-pixel edge location accuracy has been presented in the paper. The intensity signal, proportional to the emittance received from measured area by the infrared detector is converted to the temperature signal, which makes the thermal image. According to the Stefan-Boltzmann law a relationship between a temperature and an emittance is strongly non-linear. This nonlinearity causes a geometrical distortion of the measured object dimensions. In case of the geometry measurements, the most sensitive seems to be the sub-pixel edge location measurements.

The paper deals with the bias error problem using thermal images as a basis to the sub-pixel edge location measurements. Introducing the edge model, the method of the bias error estimation has been presented. There were conducted calculations specifying constraints of applications which bias error can be omitted. As an example the results for the infrared system ThermoCAM PM 595 have been included.

**Wstęp**

W przypadku pirometrów, interpretacja natężenia promieniowania w punkcie sprowadza się do określenia temperatury. Zastosowanie matrycy detektorów podczerwieni pozwala na interpretację przestrzenną promieniowania emitowanego przez badany obiekt. W przypadku zastosowania zaawansowanych technik obróbki termogramu [2,6,11] istnieje możliwość pozyskania szerszych informacji o parametrach obiektu, również geometrycznych.

Obecnie, pomiary parametrów geometrycznych obiektów termicznych przeprowadza się w celu porównania obrazu termicznego z obrazem pasma widzialnego uzyskanego równoległe z pomiarem termowizyjnym. Pozwala to na wprowadzenie koordynacji współrzędnych np. dla potrzeb korekcji emisyjności kierunkowej

badanego obiektu [9]. W pewnych przypadkach istnieje jednak możliwość otrzymania parametrów geometrycznych obiektów bezpośrednio z termogramów. Próby takie zostały podjęte z powodzeniem w zakresie pomiaru położenia krawędzi obiektów termicznych z uzyskaniem dokładności podpixselowej [2,3,6].

Metody wyznaczania krawędzi z dokładnością podpixselową opierają się na aproksymacji informacji pochodzących z obrazu obiektu na podstawie matematycznego modelu krawędzi [1,2,3,6]. Dokładność odwzorowania tego modelu decyduje o dokładności pomiaru. W przypadku zastosowania termogramu wprowadzany jest błąd przesunięcia krawędzi w stronę niższych temperatur, spowodowany przeliczaniem promieniowania z obiektu za pomocą funkcji opisującej krzywą kalibracji kamery termowizyjnej.

W pracy przedstawiono model krawędzi z uwzględnieniem takich parametrów jak: temperatura odniesienia (niższa temperatura krawędzi) oraz przyrost temperatury na krawędzi. Przeprowadzono analizę błędów pochodzących od wpływu funkcji opisującej krzywą kalibracji kamery.

**1. Modele krawędzi**

Idealna krawędź jest rozpatrywana jako funkcja skoku jednostkowego określona w dziedzinie przestrzeni. W rzeczywistości obraz krawędzi otrzymany w systemie optycznym jest zniekształcony przez aberracje soczewek oraz zjawisko rozproszenia. Zjawiska te są odpowiedzialne za zniekształcenia geometryczne obrazu jak i za efekt rozmycia krawędzi obiektów. W przypadku pomiaru położenia krawędzi z dokładnością podpixselową, ostatni z efektów ma najbardziej znaczący wpływ na dokładność pomiaru i musi zostać uwzględniony w modelu matematycznym krawędzi.

Zarówno dla systemów optycznych jak i dla systemów rejestrujących promieniowanie w zakresie podczerwieni stopień rozmycia jest określany przez funkcje rozproszenia SRF (Spread Response Function). Dla przypadku jednowymiarowego, funkcja ta odpowiada funkcji rozproszenia dla linii – LSF (Line Spread Function) [10]:

$$\text{LSF}(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

gdzie  $\sigma$  jest parametrem rozmycia linii związanym rozdzielczością przestrzenną kamery. Funkcja LSF jest powiązana z funkcją odpowiedzi skokowej systemu optycznego przez równanie:

$$\text{ESF}(x) = \int \text{LSF}(x), \quad (2)$$

gdzie  $\text{ESF}(x)$  jest funkcją rozmycia krawędzi (Edge Spread Function) i opisuje obraz krawędzi otrzymany na powierzchni detekto-

ra kamery termowizyjnej. Uwzględniając (1) oraz (2), model matematyczny krawędzi z uwzględnieniem zjawiska rozmycia może być wyrażony równaniem:

$$ESF(x, \sigma) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sigma \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}\sigma}\right), \quad (3)$$

ESF ( $x, \sigma$ ) reprezentuje sygnał natężenia promieniowania z krawędzi odebrany przez detektor kamery. Dla celów modelowania krawędzi, wyrażenie (3) można zmodyfikować wprowadzając parametry:  $u_0$  – natężenia promieniowania pochodzące od niższej temperatury krawędzi oraz  $\Delta u$  – przyrost natężenia promieniowania na krawędzi. Wówczas wzór (3) przyjmie postać:

$$ESF(x, \sigma, u_0, \Delta u) = u_0 + \Delta u \cdot \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2 \cdot ESF(x, \sigma)}{\sigma \sqrt{2\pi}} \right). \quad (4)$$

W celu uzależnienia modelu od temperatury należy uwzględnić równanie [5,7,8]:

$$u(T) = \frac{A}{\exp\left(\frac{B}{T}\right) - C}. \quad (5)$$

Wprowadzając zmienne:  $T_0$  – temperatura odniesienia (niższa temperatura krawędzi),  $\Delta T$  – zakres wartości temperatury na krawędzi, można zapisać:

$$u_0 = u(T_0), \quad (6)$$

$$\Delta u = u(T_0 + \Delta T) - u(T_0). \quad (7)$$

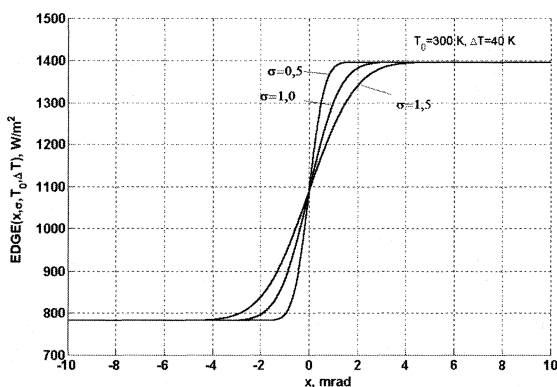
Uwzględniając wyrażenia (5), (6) i (7) i podstawiając do wzoru (4) model krawędzi przyjmie postać:

$$EDGE(x, \sigma, T_0, \Delta T) = \frac{A}{\exp\left(\frac{B}{T_0}\right) - C} + \frac{1}{2} \left[ \frac{A}{\exp\left(\frac{B}{T_0 + \Delta T}\right) - C} - \frac{A}{\exp\left(\frac{B}{T_0}\right) - C} \right] \left( 1 + \frac{2 \cdot ESF(x, \sigma)}{\sigma \sqrt{2\pi}} \right), \quad (8)$$

gdzie: A, B, C – stałymi kalibracji kamery termowizyjnej.

Funkcja EDGE ( $x, \sigma, T_0, \Delta T$ ) przedstawia rozkład natężenia promieniowania w kierunku prostopadłym do krawędzi z uwzględnieniem parametrów optyki kamery termowizyjnej oraz temperatury w otoczeniu krawędzi. Na rys. 1 przedstawiono wynik modelowania na podstawie (8) dla 3 różnych wartości  $\sigma$  dla  $T_0=300\text{K}$  oraz  $\Delta T=40\text{K}$ . Wartości parametrów A, B, C przyjęto jak dla kamery ThermoCAM PM 595 nr 11890191 dla zakresu pomiarowego  $-40 \div 120^\circ\text{C}$ . Wynoszą one:  $A=101920$ ,  $B=1463.4$ ,  $C=1$ . W przypadku zastosowania termogramu do identyfikacji położenia krawędzi, ma miejsce następujące przekształcenie:

$$T(x) = \frac{B}{\ln\left(\frac{A}{u(x)} - C\right)}, \quad (9)$$



Rys. 1. Model krawędzi według wzoru (8) dla 3 wartości  $\sigma$

które po podstawieniu do wzoru (8) modyfikuje model krawędzi do postaci:

$$EDGE(x, \sigma, T_0, \Delta T) = \frac{B}{\ln\left(\frac{A}{EDGE(x, \sigma, T_0, \Delta T)} - C\right)}. \quad (10)$$

Pomiar położenia krawędzi w metodach podpixelowych opiera się metodach identyfikacji punktu przegięcia funkcji sygnału krawędzi [1,2,6]. W przypadku modelowym, najprostszym rozwiązaniem jest badanie maksimum pierwszej pochodnej w otoczeniu współrzędnej krawędzi.

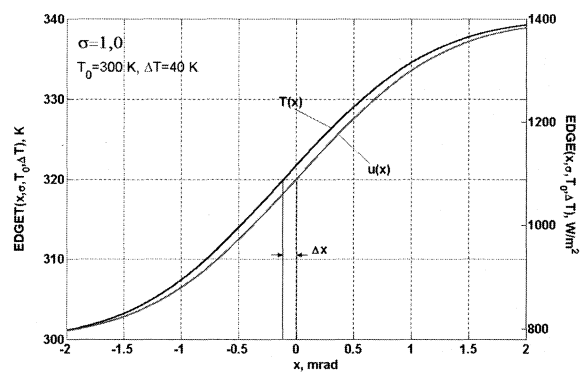
Zastosowanie nieliniowego przekształcenia (9) powoduje zmianę położenia punktu maksymalnej wartości pierwszej pochodnej wyrażenia (8) względem maksimum pierwszej pochodnej wyrażenia (10). Dla modelu natężenia promieniowania (8) poszukiwane jest maksimum:

$$\frac{U(T_0 + \Delta T) - U(T_0)}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2}\right) = \max, \quad (11)$$

natomiast dla modelu termicznego (10):

$$\frac{B}{\ln\left(\frac{A}{EDGE(x, \sigma, T_0, \Delta T)} - C\right)^2} \cdot \frac{B}{EDGE(x, \sigma, T_0, \Delta T)^2} \cdot \left[ \frac{A}{EDGE(x, \sigma, T_0, \Delta T)} - C \right] \left[ \frac{U(T_0 + \Delta T) - U(T_0)}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2}\right) \right] = \max, \quad (12)$$

Rys. 2 przedstawia graficzną interpretację przesunięcia położenia krawędzi dla modeli (8) i (10). Współrzędne położenia krawędzi wyznaczono zgodnie z definicjami (11) i (12). Należy zauważyć, że błąd wynikający z przekształcenia (9) powoduje otrzymanie przesunięcia krawędzi w stronę niższych temperatur. W związku z tym, w przypadku obiektów o temperaturze wyższej od temperatury otoczenia, wymiary obiektu zostaną zawyżone. Jest to ogólnie znana właściwość zobrazowania termicznego obiektów ciepłych, którą w niniejszej pracy wyjaśniono na gruncie matematycznym.

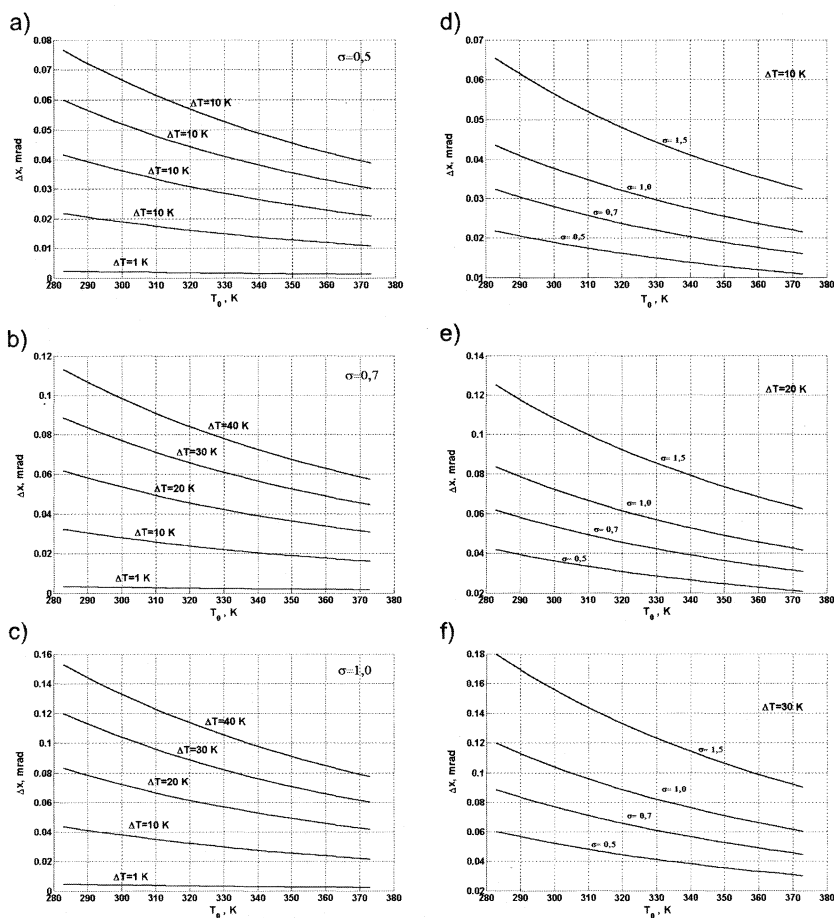


Rys. 2. Przesunięcie położenia krawędzi  $\Delta x$  po zastosowaniu przekształcenia  $u(x) \rightarrow T(x)$  (8)

## 2. Wyniki obliczeń

Na podstawie przeprowadzonych rozważań dokonano wycieżeń błędów wynikających z zastosowania termogramu do pomiaru położenia krawędzi obiektów termicznych z dokładnością podpixelową. Obliczenia przeprowadzono dla kamery ThermoCAM PM 595 z uwzględnieniem pierwszego zakresu pomiarowego tj.  $-40 \div 120^\circ\text{C}$ . Wartości temperatury odniesienia krawędzi przyjęto  $T_0=293 \div 380\text{K}$ . Założono 5 wartości rozpiętości temperatur na krawędzi:

$\Delta T = \{1 \text{ K}, 10 \text{ K}, 20 \text{ K}, 30 \text{ K}, 40 \text{ K}\}$ . W celu określenia wpływu parametrów optyki kamery przyjęto  $\sigma = \{0,5 \text{ mrad}, 0,7 \text{ mrad}, 1 \text{ mrad}, 1,5 \text{ mrad}\}$ . Wyniki obliczeń przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Błąd krzywej kalibracji dla różnych wartości parametrów:  $\sigma$ ,  $T_0$ ,  $\Delta T$ : a, b, c – przy stałej wartości  $\sigma$ ; d, e, f – przy stałym  $\Delta T$

Przyjęty w obliczeniach parametr  $\sigma$  jest wielkością jednoznacznie określającą stopień „rozmycia” systemu termowizyjnego, jednak najczęściej podawanym parametrem jest rozdzielczość przestrzenna kamery termowizyjnej [4,8]. W pracy [4] podano szereg definicji rozdzielczości przestrzennej (stosowanych przez różnych producentów) oraz zależności wiążących ją z parametrem  $\sigma$ . Dla definicji stosowanej przez firmę FLIR [5] związek ten ma postać [4]:

$$\sigma = \frac{\text{SRF}(0,5)}{1,35}, \quad (13)$$

gdzie SRF (0,5) dla kamery ThermoCAM PM 595 wynosi 1,3 mrad ( $\sigma = 0,96$ ).

### 3. Wnioski

Ocena stopnia przesunięcia krawędzi wprowadzanego przez uwzględnienie krzywej kalibracji kamery termowizyjnej ma znaczenie w przypadku zastosowania termogramów jako danych pomiarowych do wyznaczania parametrów geometrycznych obiektów termicznych. Analizując otrzymane wyniki (rys. 3) można stwierdzić, że pogorszenie rozdzielczości przestrzennej (reprezentowane przez  $\sigma$ ) może znacznie wpłynąć na pogorszenie wyników pomiaru. Należy uwzględnić również fakt, że wartość  $\sigma$  nie jest stała i zależy od ustawienia ostrości optyki kamery podczas

miaru. Także ze wzrostem  $\Delta T$  rośnie stopień przesunięcia krawędzi  $\Delta x$ .

W pomiarach położenia krawędzi z dokładnością podpikselową przy zastosowaniu systemów wizyjnych otrzymuje się dokładności rzędu  $0,01 \div 0,1$  piksela [1]. W zakresie podczerwieni długofalowej, w pracach [3,6] uzyskano wyniki pomiarów położenia krawędzi z dokładnością 0,1 piksela. Dla kamery termowizyjnej ThermoCAM PM 595, przyjmując optykę  $24^\circ \times 18^\circ$  oraz matrycę detektorów  $320 \times 240$  pikseli, rozmiar piksela wyniesie 1,3 mrad. Oznacza to, że błąd względny jest równy 0,13 piksela. Porównując otrzymaną wartość z wynikami obliczeń, można stwierdzić, że przekształcenie sygnału promieniowania obiektu przez krzywą kalibracji, wprowadza błąd systematyczny porównywalny z dokładnością metody pomiaru. Oznacza to również ograniczoną stosowalność termogramów jako danych do precyzyjnych pomiarów parametrów geometrycznych.

### Literatura

- [1] G. W. BOON, Y. SHAN: *Sub-Pixel Location of Edges With Non-Uniform Blurring: A Finite Closed-Form Approach*. Image and Vision Computing, 18 (2000) str. 1015-1023,
- [2] R. BĄBKA, W. MINKINA: *Badania symulacyjne przydatności miary średniokwadratowej do analizy pól temperatur rejestrowanych systemem termowizyjnym*, Materiały XI Sympozjum „Modelowanie i symulacja systemów pomiarowych”, Krynica, 17-21.09.2001, str. 129-136,
- [3] R. BĄBKA, W. MINKINA: *Sub-pixel edge location in thermal images using a meansquare measure*, 7<sup>th</sup> International Conference on Infrared Sensors and Systems (IRS'2002), 14-16.05.2002 (w druku),
- [4] K. CHRZANOWSKI: *Ocena skuteczności obserwacyjnych urządzeń termograficznych*. Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 1990,
- [5] FLIR: *Research & Development (R&D) Level II -2000*. Infrared Training Course – International (itc-i),
- [6] W. MINKINA, R. BĄBKA, W. WILD: *Ocena możliwości zastosowania miary średniokwadratowej do detekcji krawędzi obiektów w obrazach termowizyjnych*, Pomiary Automatyka Kontrola 47 (2001) Nr 11 str. 9-12,
- [7] W. MINKINA, P. RUTKOWSKI, W. WILD: *Podstawy pomiarów termowizyjnych*, Pomiary Automatyka Kontrola 46 (2000) Nr 1, część I – str. 7-10, część II – str. 11-14,
- [8] W. MINKINA: *Podstawy pomiarów termowizyjnych*, Pomiary Automatyka Kontrola 47 (2001) Nr 11, część III – str. 5-8,
- [9] P. SAWICKI, R. STEIN, B. WIĘCEK: *Directional emissivity correction by photogrammetric 3D object reconstruction*; Proceedings of 60 Seminar on Quantitative Infrared Thermography (QIRT'98), Łódź, 7-10.08.1998,
- [10] J. WOŹNICKI: *Podstawowe techniki przetwarzania obrazu*, WKŁ, Warszawa 1996,
- [11] B. WIĘCEK, S. ZWOLENIK: *Systemy termalno-optyczne, przegląd najnowszych rozwiązań*; III Konferencja Termografia i Termometria w Podczerwieni (TTP'96), Warszawa, 7-29.11.1996, str. 151-156.