

Waldemar MINKINA, Robert BĄBKA, Walter WILD
 POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA, WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
 INSTYTUT ELEKTRONIKI I SYSTEMÓW STEROWANIA
 UNIVERSITÄT ROSTOCK

Ocena możliwości zastosowania miary średniokwadratowej do detekcji krawędzi obiektów na obrazach termowizyjnych

**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 1983 r., a doktora habilitowanego – w 1995 r. Jest autorem i współautorem około 70 publikacji oraz 6 patentów. Specjalizuje się w problematyce dotyczącej szeroko rozumianej termometrii, termografii komputerowej oraz pomiarów ciepłych. Odbył wielokrotnie staże zagraniczne w Instytutach Miernictwa Uniwersytetów: Karlsruhe, Berlina Zachodniego, Drezna, Federalnym Urzędzie Miar (PTB w Berlinie), Sankt Petersburga i Lwowa. W zakresie termografii komputerowej ściśle współpracuje z Instytutem Miernictwa Uniwersytetu Rostockiego. Jest członkiem Sekcji Kształcenia Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN, Polskiego Towarzystwa Techniki Sensorowej oraz Stowarzyszenia Elektryków Polskich, gdzie jest rzeczoznawcą w trzech grupach.



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.

**Prof. dr hab.
 Walter Albert WILD**



Profesor Uniwersytetu Rostockiego (Niemcy), dyrektor Instytutu Miernictwa i Techniki Regulacji na Wydziale Budowy Maszyn i Techniki Okrętowej Uniwersytetu Rostockiego. Stopnie naukowe uzyskuje w latach: doktora fizyki – w 1970 r., doktora habilitowanego – w 1977. Jest autorem i współautorem 140 publikacji oraz 7 patentów. Wygłosił około 156 referatów na krajowych i międzynarodowych Konferencjach w Niemczech, Polsce, Łotwie, Rosji, USA, Włoszech. Specjalizuje się w problematyce dotyczącej metod aplikacji termografii w technice. Z tego zakresu w Rostocku organizuje coroczne „Workshopy”. Ponadto Jego badania dotyczą powierzchni półprzewodników, systemów warstwowych, sensorów dla robotów spawalniczych oraz sterowania palnikami do spawania. Jest członkiem Niemieckiej Organizacji Profesorów, Nauczycieli Akademickich Metrologii (AHMT – Arbeitskreis der Hochschullehrer für Messtechnik), Niemieckiego Zrzeszenia Szkół Wyższych (Deutschen Hochschulverband), a także Towarzystwa Mecenatu Uniwersytetu Rostockiego.

Streszczenie

W artykule przedstawiono zastosowanie miary średniokwadratowej do detekcji krawędzi między dwoma obszarami izotermicznymi. Badania symulacyjne przeprowadzono w oparciu o prosty matematyczny model krawędzi. Miara średniokwadratowa została zastosowana jako miara rozproszenia sygnału w obszarze krawędzi. Detekcję położenia krawędzi przeprowadzono metodą poszukiwania maksimum z zastosowaniem aproksymacji miary rozproszenia funkcją ciągłą. W symulacjach uwzględniono wpływ zakłóceń na dokładność przedstawionego algorytmu lokalizacji krawędzi.

Abstract

The paper deals with an application of mean square measure to the edge detection between two isothermal areas. Simulation tests were based on a simple mathematical model of the edge. The mean square measure has been used as a measure of dispersion of edge neighbourhood. Edge location estimation has been conducted searching maximum value of the dispersion of samples by means of continuous function approximation. Simulation tests with and without noise have been carried out.

WSTĘP

W przypadku pomiarów termowizyjnych często zachodzi potrzeba rozgraniczenia obszarów o różnych temperaturach. Sytuacja ta ma zazwyczaj miejsce gdy dokonuje się pomiarów porównawczych. Granica nie zawsze przebiega wystarczająco „ostro” lub charakter przejścia z jednego obszaru o danej temperaturze do obszaru o innej temperaturze jest trudno wykrywalny. Zjawiska te wynikają np.

z faktu, że powierzchnie sąsiednie mogą charakteryzować się emisyjnością o porównywalnej wartości jak i z warunków samego pomiaru [1, 2, 4].

Większość metod analizy pól temperatury polega na przetworzeniu wartości pola temperatur na obraz tzw. „termogram”, będący interpretacją zależności temperatura-jasność lub temperatura-kolor. Dalszej analizy dokonuje się algorytmami cyfrowego przetwarzania obrazów. Doświadczenie wskazuje, że najczęściej nie jest możliwe zachowanie w termogramie informacji o rozdzielczości pomiaru z jednoczesnym utrzymaniem dynamiki przetwarzania: T_{max}/T_{min} . Wynika to m.in. z faktu, że dokładne pomiary są możliwe tylko przy dużej różnicy temperatury między obiektem mierzonym i temperaturą otoczenia [2], [4]. Alternatywnym podejściem w celu zidentyfikowania lub pomiaru interesujących cech, jest analiza pola temperatur bez przetwarzania na termogram.

Dodatni pierwiastek kwadratowy z wariancji próby może służyć za miarę rozproszenia w danym rozkładzie empirycznym uzyskanym z próby [6]. W przypadku analizy pola temperatur dwóch obszarów izotermicznych sąsiadujących ze sobą, można zauważyć, że zmiana wartości miary rozproszenia wartości temperatur na granicy tych obszarów pozwala zidentyfikować granicę między nimi.

DETEKCJA KRAWĘDZI

Metody identyfikacji krawędzi bazują na lokalizacji zmian pewnych cech podobzarów analizowanego obrazu [3, 7]. Przykładem zmiany tego typu jest nieciągłość, zmiana intensywności lub koloru w rozpatrywanym podobzarsze.

Istnieje kilka algorytmów detekcji krawędzi. Najprostszym z nich jest filtracja górnoprzepustowa, tłumiąca sygnały o niskich częstotliwościach przestrzennych a pozostawiająca sygnały o du-

zym zróżnicowaniu dla sąsiadujących pikseli obrazu. Ze względu na wzmocnienie szumu wyniki otrzymywane tą metodą są najczęściej niezadowolające, dlatego też jej zastosowanie jest ograniczone. Znacząco lepsze efekty uzyskuje się stosując metody specjalnego gradientu, których działanie opiera się na przetworzeniu obrazu z uwzględnieniem progu zmian w jego sygnale. Krawędź jest wyznaczana jedynie dla wartości wyników przetwarzania przekraczających wartość progową. Przedstawienie matematycznego modelu krawędzi oraz wyliczenie progu działania stanowi problem tzw. detektorów wzrostu. Są to funkcje których dziedziną jest wartość sygnału pikseli w obrazie a wartością decyduje o przynależności piksela do krawędzi. Najprostszymi funkcjami tego typu może być wyrażenie różnicy bezwzględnej wyrażającej gradient wartości sygnału intensywności $I(x,y)$ [7]:

$$D(x,y) = 3I(x,y) - I(x,y+1) - I(x+1,y) - I(x+1,y+1) \quad (1)$$

Najczęściej stosowanymi algorytmami wyznaczania gradientu są metody Sobela, Roberta oraz Prewitta. Przykładowo dla metody Sobela gradient wylicza się zgodnie ze wzorami [7]:

$$D_x = (I_{33} + 2I_{32} + I_{31}) - (I_{13} + 2I_{12} + I_{11}), \quad (2)$$

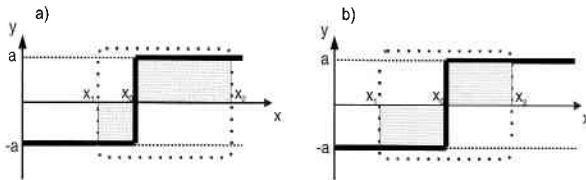
$$D_y = (I_{11} + 2I_{12} + I_{13}) - (I_{31} + 2I_{32} + I_{33}), \quad (3)$$

gdzie D_x i D_y są gradientami w kierunku x i y , a I_{xy} sygnałami pikseli obrazu z otoczenia piksela bazowego.

Realizacja powyższych algorytmów opiera się najczęściej na wyliczeniu splotu analizowanego obrazu i tzw. maski filtru reprezentowanej przez zestaw współczynników określających działanie danego algorytmu. Parametrem filtru jest również rozmiar maski – dla równań (2, 3) wynosi on 3 na 3 piksele.

W przypadku masek o dużych rozmiarach uzyskuje się większą odporność na zakłócenia lecz mniejszą rozdzielczość.

Proponowana metoda poszukiwania krawędzi polega na identyfikacji maksymalnej wartości sygnału w danym obszarze. Rysunek 1 przedstawia zasadę lokalizacji położenia wyidealizowanej krawędzi, która ogranicza obszary reprezentowane przez wartości sygnałów a i $-a$



Rys. 1. Zasada lokalizacji krawędzi metodą pomiaru wariancji:
a) prawdopodobieństwo uzyskania wartości a jest większe niż $-a$,
b) prawdopodobieństwa uzyskania wartości a i $-a$ są identyczne

Powyższy model w można zapisać w postaci dwupunktowego rozkładu prawdopodobieństwa. Prawdopodobieństwo uzyskania a lub $-a$ w obszarach określonych odpowiednio (x_0, x_2) oraz (x_1, x_0) wynosi:

$$P(Y = a) = P[X \in (x_0, x_2)] = p = \frac{x_2 - x_0}{x_2 - x_1}, \quad (4)$$

oraz

$$1 - p = \frac{x_0 - x_1}{x_2 - x_1}. \quad (5)$$

Dla rozpatrywanego rozkładu wariancja $V(y)$ w obszarze (x_1, x_2) wynosi [5]:

$$V(y) = 4a^2 p(1 - p) = 4a^2 (p - p^2). \quad (6)$$

Z przebiegu zmienności (6) wynika, że wariancja w rozpatrywanym obszarze osiąga wartość maksymalną dla

$$p = 0,5 \Rightarrow x_0 - x_1 = x_2 - x_0, \quad (7)$$

czyli określa współrzędną krawędzi. Powyższe zależności pozwalają na postawienie tezy że, maksimum wariancji w rozpatrywanym obszarze, może określać położenie krawędzi i być uważane za detektor wzrostu niezależny od a (eliminacja wpływu błędu systematycznego).

W przypadku bardziej ogólnym model (4) jest zbyt uproszczony z uwagi na ciągłą funkcję zmian sygnału między obszarami o nieznanym rozkładzie prawdopodobieństwa. W praktyce rozwiązaniem alternatywnym jest zastosowanie wariancji empirycznej z próby lub miary średniokwadratowej [6].

Dla próby o liczności N odchylenie standardowe wynosi:

$$s(N) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I})^2}, \quad (8)$$

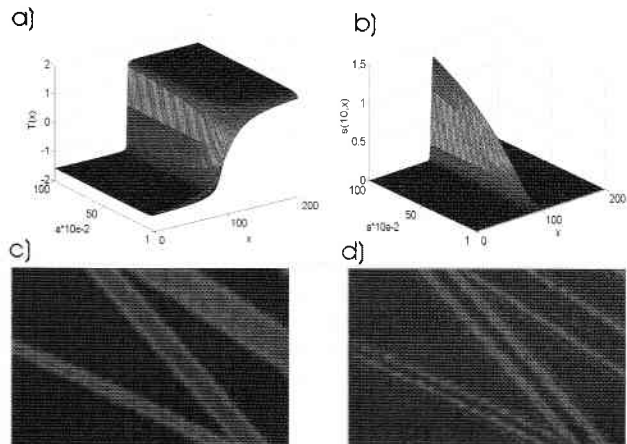
i jest miarą średniokwadratową rozproszenia. W wyrażeniu (8) przyjęto, że I_i to poziomy sygnał w podobzdarze obrazu, wartość $s(N)$ jest miarą zmian sygnału w rozpatrywanym podobzdarze N pikseli. Wynika z tego że, na granicy obszarów izomorficznych (tj. o stałej wartości sygnału w podobzdarze) wartość $s(N)$ przyjmie wartość maksymalną. W celu wyznaczenia położenia krawędzi obrazu, wyrażenie (8) można zapisać jako funkcję odległości względem geometrycznego punktu odniesienia w obrazie (np. od początku przyjętego układu współrzędnych obrazu) dla N próbek nieparzystych:

$$s(N, x) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} (I(x-ip) - \bar{I})^2}, \quad (9)$$

lub

$$s(N, x) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} (I(x-ip - \frac{p}{2}) - \bar{I})^2}, \quad (10)$$

dla N próbek parzystych, gdzie p jest rozmiarem geometrycznym piksela, x odległością od punktu odniesienia. Zależności wyżej przedstawione dla wymiaru y przyjmują takie same postaci jak wyrażenia (9, 10) dlatego też dalsze rozważania dotyczyć będą tylko jednego wymiaru.



Rys. 2. Graficzna interpretacja modelu krawędzi i jego detektora wzrostu $s(N,x)$,

a) funkcja $T(x) = \arctan(ax)$, $a \in (0,1;1)$,

b) rozkład odchylen standardowych z próby $s(10,x)$ dla funkcji $T(x)$

c) termogram obiektów o stałej temperaturze powierzchni,

d) krawędzie obiektów z rys. c wyznaczone metodą wyliczania miary średniokwadratowej w postaci obrazu odchylen standardowych.

W przypadku pomiarów temperatury metodami termowizyjnymi, obraz jest z macierzy wartości temperatur wyliczonych na podstawie sygnałów z macierzy detektorów, odbierających promieniowanie podczerwone pochodzące z badanego obszaru. W toku dalszych rozważań przyjmuje się badanie zmian temperatur właśnie

takiego pola. Na mocy powyższych ustaleń, zależności (4-6) są aktualne przy zamianie zmiennych intensywności sygnału obrazu I na sygnał wartości temperatury T .

Na rysunku 2 przedstawiono zależność między gradientem krawędzi między dwoma izotermicznymi obszarami. Jako model krawędzi przyjęto funkcję $T(x) = \arctg(ax)$ gdzie a jest parametrem decydującym o nachyleniu zbocza sygnału wartości temperatur między obszarami. Maksimum funkcji $s(N, x)$ wyznacza argument x dla którego sygnał $T(x)$ przyjmuje największy gradient. Wynika z tego wniosek, że wykrycie s_{max} pozwala na lokalizację krawędzi sygnału w sensie największego gradientu. Fakt ten ma poważne znaczenie w pomiarach termowizyjnych, w których pomiar różnic temperatur jest często o rzędy wielkości dokładniejszy od pomiaru bezwzględnego pola temperatur [4].

BADANIA SYMULACYJNE

Na podstawie przeprowadzonych rozważań wykonano szereg symulacji komputerowych w programie Matlab. Przyjęto jednowymiarowy model matematyczny krawędzi w postaci

$$T(x) = \arctan[a(x-b)], \quad (11)$$

dla $a=0,015$ oraz zmiennego przesunięcia b względem początku układu współrzędnych. W celu wyznaczenia wartości temperatury rejestrowanej przez poszczególne piksele detektora kamery termowizyjnej założono dyskretyzację sygnału $T(x)$ zmiennej x zakładając model uśrednionego sygnału pochodzącego z piksela detektora [8]:

$$I_{av} = \frac{1}{S} \iint_S I(s) ds, \quad (12)$$

który po uproszczeniu do przypadku jednowymiarowego, dla małych zmian wartości temperatur ma postać:

$$T(z) = \frac{1}{p} \int_{z-\frac{p}{2}}^{z+\frac{p}{2}} T(x) dx, \quad (13)$$

gdzie $T(z)$ wyznacza temperaturę zmierzoną przez piksel o współrzędnej z , zaś p jest szerokością piksela. W symulacjach uwzględniono różne wartości poziomu zakłóceń o rozkładzie $N(0,1)$ w sygnale $T(x)$.

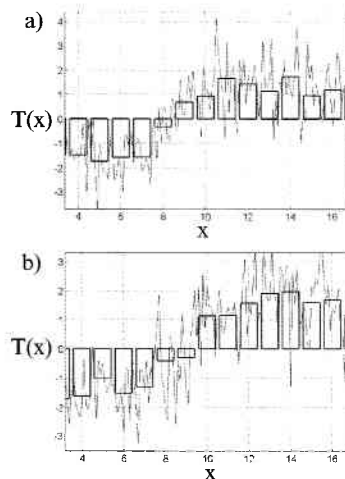
Zasadniczym celem symulacji było przeprowadzenie badań zastosowania miary średniokwadratowej rozproszenia jakim jest odchylenie standardowe z próby do określenia współrzędnych krawędzi rozważanej w sensie największego gradientu. Porównano zmiany $s(N, z)$ dla par sygnałów $T(z)$ wyliczonych dla tych samych zakłóceń, przy przesunięciu krawędzi sygnału $T(x)$ o wartość $0,5p$. Dla każdego przypadku wykreślono funkcję $s(N, z)$. Do wyznaczenia wartości współrzędnej x przy której $s(N, z)$ przyjmuje wartość maksymalną (b w (11)) zastosowano aproksymację metodą najmniejszych kwadratów punktów ($z, s(N, z)$) funkcją posiadającą jedno maksimum globalne. Zastosowanie funkcji w tej postaci uzasadniają rozważania w pracy [9] (badania gradientu w otoczeniu krawędzi dla splotu funkcji krawędzi z odpowiedzią impulsową systemu optycznego):

$$f(z) = \frac{1}{d\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(z-m)^2}{2d^2}\right], \quad (14)$$

której parametr m określa estymowaną wartość przesunięcia krawędzi b .

Rysunki 3 i 4 przedstawiają część symulacji przeprowadzonych dla liczby próbek $N = \{4, 6, 8, 10\}$ oraz dla $a=0,015$. Na rysunku 3 umieszczono dwa przypadki krawędzi zrealizowane za pomocą funkcji (11). Dla (a) parametr przesunięcia $b=8$, dla (b) $b=8,5$ przy czym w każdym przypadku dodano zakłócenie sygnałem o rozkładzie

normalnym $E(X)=0$ i $VAR(X)=1$ [$N(0,1)$]. Wykresy słupkowe reprezentują wartości $T(z)$ wyliczone zgodnie z zależnością (13) dla $p=1$. Przesunięcie względne (a) względem (b) wynosi wówczas $0,5$ piksela.



Rys. 3. Symulowany model krawędzi:

- a) model dla $T(8)=0$ z zakłóceniem o rozkładzie $I*N(0,1)$,
b) model dla $T(8,5)=0$ z zakłóceniem o rozkładzie $I*N(0,1)$

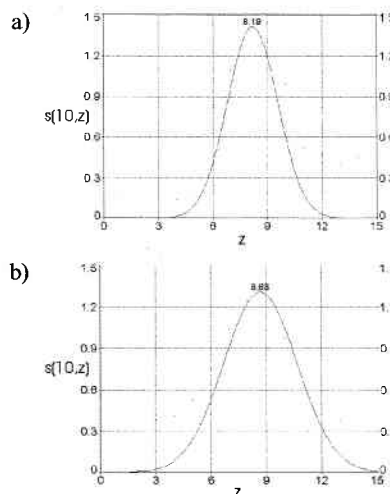
Na podstawie $T(z)$ wyznaczono funkcje odchylenia standardowego zgodnie z wyrażeniem (10). Wyniki wyznaczenia współrzędnych krawędzi przedstawiono na rysunku 4 i oznaczono odpowiednio jak dla przypadków (a) i (b) z rysunku 3.

Wyniki symulacji analizowano ze względu na dwa kryteria:

- a) dokładność wyznaczenia położenia krawędzi względem modelu określonego $T(x)$,
b) dokładność pomiaru przesunięcia o wartość $0,5$ piksela względem sygnału $T(z)$.

Ze względu na praktyczne zastosowanie metody, jako wartość prawdziwą przyjęto przesunięcie b , zaś wartość mierzoną $m=z$ (s_{max}). Błąd bezwzględny odniesiono do rozmiaru piksela p (we wszystkich przypadkach symulacji $p=1$) i oznaczono:

$$d_k = \frac{z(s_{max}) - b}{p} 100\% \quad (15)$$



Rys. 4. Wyniki symulacji dla modeli z rysunku 3:

- a) krawędź wyznaczona na współrzędnej $z = 8,19$ ($SSE=0,11$)
b) krawędź wyznaczona na współrzędnej $z = 8,68$ ($SSE=0,08$)

Dla błędu przesunięcia jako wartość prawdziwą przyjęto $0,5p=0,5$, a błąd przesunięcia d_p określono wyrażeniem:

$$d_p = \frac{\{z(s_{max}) - z_{0,5}(s_{max})\} - 0,5}{0,5} 100\% \quad (16)$$

W tabeli 1 przedstawiono otrzymane wyniki.

Zakład czynny		Liczba próbek N							
		4		6		8		10	
		d_i [%]	d_p [%]	d_i [%]	d_p [%]	d_i [%]	d_p [%]	d_i [%]	d_p [%]
0	23	2,3	15	1,6	12	1	3	1	
$0,1 * N(0,1)$	22	5,6	4,2	2,1	4,3	1,6	3	1,7	
$1 * N(0,1)$	120	5,6	62	3,2	34	2,6	56	2,4	

Tab. 1. Wartości błędów dla symulacji wyznaczone zgodnie z wyrażeniami (15-16)

Analizując wyniki symulacji można zauważyć że:

- pomiar przemieszczenia krawędzi w zakresie obszaru jednego piksela jest dokładniejszy od pomiaru bezwzględnego położenia krawędzi,
- pomiar przemieszczenia krawędzi w zakresie obszaru jednego piksela jest znacznie odporniejszy na zakłócenia od pomiaru bezwzględnego położenia krawędzi,
- przy dużym zakłóceniu zastosowanie pomiaru bezwzględnego położenia krawędzi nie jest możliwe,
- zwiększenie próby pomiarowej znacznie poprawia dokładność metody i uodparnia ją na zakłócenia.

WNIOSKI

Opierając się na wynikach symulacji komputerowej można stwierdzić, że proponowana metoda pozwala w pewnych warunkach na osiągnięcie dokładności lokalizacji krawędzi mniejszej od rozmiaru obejmowanego przez piksel pomiarowy. Ograniczeniem w tym przypadku jest wariancja sygnału zakłócającego która dodaje się do wariancji krawędzi. Sugeruje się określenie poziomu zakłóceń w sposób doświadczalny z uwagi na zróżnicowanie rozkładu losowego w sygnale reprezentującym krawędź. Proponowana metoda opiera się na możliwości dokładnego pomiaru różnic temperatur metodami termowizyjnymi i może znaleźć zastosowanie do dokładnego pomiaru przemieszczeń w układach automatyki urządzeń metalurgicznych lub w diagnostyce termowizyjnej. Model matematyczny krawędzi został dobrany na podstawie doświadczeń w analizie pól temperatury w przekrojach. Metoda ta jest obecnie często stosowana w diagnostyce termowizyjnej. W związku z tym, w dalszej części badań, zaproponowana metoda detekcji krawędzi zostanie zweryfikowana przez badania eksperymentalne.

LITERATURA

- [1] Chrzanowski K., Jankiewicz Z.: *Model błędów pomiaru temperatury za pomocą kamer termowizyjnych*; Metrologia i Systemy Pomiarowe Tom IV, Zeszyt 1-2, 1997.
- [2] Maldaque X.: *Basic Thermography*, Quantitative InfraRed Thermography 4, Łódź, Sept. 7-10, 1998,
- [3] Marenka S. Sadun A. Watkins CH. D.: *Nowoczesne metody przetwarzania obrazu*; WNT Warszawa 1995.
- [4] Minkina W.: *Technika pomiarów w podczerwieni w procesach technologicznych*; VI Sympozjum „Metrologia w Systemach Jakości – 3” Politechnika Świętokrzyska, Cedzyna k/Kielc 16-18.10.2000, str. 187-202.
- [5] Ott L.: *An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis*; Doxbury Press, Boston 1984.
- [6] Przewodnik: *Wyrażanie niepewności pomiaru*; Główny Urząd Miar, ISO 1995, wydanie polskie 1999 opracowane przez J. Jaworskiego.
- [7] Tadeusiewicz R.: *Systemy wizyjne robotów przemysłowych*; WNT Warszawa 1992, Rozdział 4 – Przetwarzanie obrazów.
- [8] Webb P.W.: *Thermal Imaging of Electronic Devices with Low Surface Emissivity*, IEE Proceedings – G. 138 (1991).
- [9] Shan Y. Boon G.W.: *Sub-pixel location of edges with non-uniform blurring: a finite closed-form approach*. Image and Vision Computing, 18/2000 p. 1015-1023

Wykaz oznaczeń:

I – intensywność, zmierzona i przetworzona wartość promieniowania odbieranego przez piksel detektora.

p – rozmiar piksela

$s(N,x)$ – odchylenie standardowe z próby dla N próbek rozłożonych centralnie względem współrzędnej x ,

$T(x)$ – temperatura, wartość sygnału ciągłego o współrzędnej x .

$T(z)$ – temperatura, wartość sygnału dyskretyzowanego dla pikseli detektora o współrzędnej z .