

ZASTOSOWANIE TRANSFORMACJI TOP-HAT DO PRZETWARZANIA SEKWENCJI TERMOGRAMÓW

Sebastian DUDZIK

Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Instytut Optoelektroniki i Systemów Pomiarowych
tel.: +34 325 08 56 e-mail: sebdud@el.pcz.czyst.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono przykłady użycia transformacji TOP-HAT do przetwarzania sekwencji termogramów. Zaprezentowano podstawy teoretyczne morfologii matematycznej w zastosowaniu do przetwarzania obrazów termalnych. Celem przetwarzania była korekcja niejednorodności nagrzania powierzchni próbki badanego materiału zawierającej defekty o różnych głębokościach. Do określenia rozmiaru i kształtu elementu strukturalnego użytego w transformacji TOP-HAT zaproponowano kryterium oparte na pojęciu odległości pomiędzy obiektami w wielowymiarowej przestrzeni cech. W wyniku badań stwierdzono, że największą wrażliwość na wielkość elementu strukturalnego wykazuje odległość euklidesowa.

Słowa kluczowe: Badania nieniszczące, termografia aktywna, morfologia matematyczna, transformata TOP-HAT.

1. WPROWADZENIE

1.1. Aktywna termografia w podczerwieni

Aktywna termografia w podczerwieni definiuje zbiór metod, pozwalających na wykrywanie nieciągłości w materiałach, w szczególności w pobliżu powierzchni badanej próbki [1-3]. W metodach termografii aktywnej powierzchnia próbki badanego materiału poddawana jest wymuszeniu cieplnemu o ściśle określonym przebiegu w czasie. Następnie przeprowadza się rejestrację niestabilnego pola temperatury na tej powierzchni z użyciem kamery termowizyjnej, współpracującej z kartą framegrabbera i odpowiednim oprogramowaniem [4]. W kolejnym etapie procedury badawczej przeprowadza się przetwarzanie zarejestrowanych sekwencji termogramów. Do tego celu wykorzystuje się zaawansowane procedury przetwarzania obrazów [5-7].

Oprócz wykrywania defektów możliwa jest ich charakteryzacja [2]. Pozwala ona na określenie głębokości defektu, pola powierzchni lub innych parametrów ilościowych. Bardzo ważnym warunkiem poprawnej identyfikacji defektów jest jednorodność nagrzania powierzchni badanej próbki, w szczególności jeżeli wyniki pomiarów termowizyjnych stanowią dane wykorzystywane w algorytmach uczenia maszynowego [8-10]. Niestety często w wyniku eksperymentu uzyskuje się nierównomierny rozkład strumienia cieplnego na badanej powierzchni. Z tego powodu niezbędna jest korekcja niejednorodności nagrzania [1].

1.2. Transformacja TOP-HAT

Morfologia matematyczna jest jednym z narzędzi wykorzystywanych w komputerowym przetwarzaniu obrazów [5]. Metody morfologiczne pozwalają na dokonywanie złożonych operacji, związanych z kształtem i wzajemnym położeniem elementów sceny analizowanego obrazu. Podstawą przetwarzania morfologicznego jest reprezentacja obrazu w postaci binarnej lub jako funkcji odwzorowującej poziomy jasności. Dodatkowo, niezwykle ważnym zagadnieniem jest dobór kształtu i rozmiaru elementu strukturalnego. Element strukturalny jest obrazem o ściśle określonym kształcie i rozmiarze. W trakcie działania procedur morfologicznych na pikselach obrazu i pikselach elementu strukturalnego są dokonywane operacje arytmetyczne, dlatego też dobór kształtu i rozmiaru elementu strukturalnego ma zasadniczy wpływ na wynik operacji morfologicznych [11].

Morfologia matematyczna udostępnia m.in. następujące operacje, użyteczne przy przetwarzaniu obrazów [6, 11]:

- dylacja,
- erozja,
- otwarcie morfologiczne.

W przypadku obrazu $J(x,y)$, zawierającego elementy (piksele) o wartościach rzeczywistych, dylację określa zależność:

$$D(J(x,y), B(r,s)) = \max_{r,s \in B(x,y)} \{J(x-r, y-s) + B(r,s)\}, \quad (1)$$

gdzie: $B(r,s)$ – element strukturalny.

Erozję obrazu $J(x,y)$ można przedstawić jako:

$$E(J(x,y), B(r,s)) = \max_{r,s \in B(x,y)} \{J(x+r, y+s) - B(r,s)\}. \quad (2)$$

Ostatecznie otwarcie morfologiczne obrazu $J(x,y)$ elementem strukturalnym $B(r,s)$ definiuje się jako następujące złożenie operacji dylacji i erozji:

$$O(J(x,y), B(r,s)) = D(E(J(x,y), B(r,s)), B(r,s)). \quad (3)$$

W niniejszej pracy, do przetwarzania sekwencji termogramów powierzchni badanych próbek materiału

zastosowano transformację TOP-HAT. Bazuje ona bezpośrednio na operacji morfologicznego otwarcia obrazu (zal. 3):

$$TH(J(x, y), B(r, s)) = J(x, y) - O(J(x, y), B(r, s)). \quad (4)$$

Analizując zależność (4) można stwierdzić, że transformata TOP-HAT, jako wynik transformacji (4), jest różnicą pomiędzy obrazem $J(x, y)$ a otwarciem tego obrazu przeprowadzonym z użyciem elementu strukturalnego $B(r, s)$. W niniejszej pracy, opisywane procedury morfologiczne zastosowano do termogramów powierzchni badanych próbek materiału zarejestrowanych w badaniach eksperymentalnych. W takim przypadku otwarcie morfologiczne (zal. 3) może być interpretowane jako niejednorodne tło termalne [12], natomiast zastosowanie transformacji TOP-HAT (zal. 4) winno prowadzić do skorygowania wpływu niejednorodnego nagrzania powierzchni badanej próbki materiału w polu widzenia termogramu.

1.3. Odległości w wielowymiarowej przestrzeni cech

Podstawowymi obiektami przetwarzanymi przez algorytmy uczenia maszynowego w zagadnieniach wykrywania i charakteryzacji defektów są przebiegi czasowe temperatury powierzchni badanej próbki, rejestrowane dla poszczególnych elementów tej powierzchni, reprezentowanych w polu widzenia termogramu przez piksele obrazu [9, 10]. Przebieg temperatury uzyskany dla wybranego piksela może być reprezentowany jako punkt w n -wymiarowej przestrzeni cech, przy czym cechy są określone jako kolejne chwile czasowe rejestracji procesu wymiany ciepła zachodzącego w badanej próbce. Przy tak ustalonej interpretacji możliwe jest obliczenie odległości pomiędzy obiektami. W niniejszej pracy przeprowadzono przetwarzanie morfologiczne sekwencji termogramów powierzchni badanej próbki przy różnych wielkościach i kształtach elementu strukturalnego. Do oceny efektywności przetwarzania zastosowano następujące kryteria:

- średnia odległość pomiędzy obiektami reprezentującymi piksele w obszarach defektów opisana zależnością:

$$\bar{D}_{def} = \frac{\sum_{k, l \in O_{def}} d_{k, l}}{N_{def}} \quad (\forall k \neq l), \quad (5)$$

gdzie: N_{def} – liczba par pikseli w obszarze defektów, $d_{k, l}$ – odległość obliczana dla każdej pary pikseli w obszarach defektów, O_{def} – zbiór pikseli należących do obszarów defektów.

- średnia odległość pomiędzy obiektami reprezentującymi piksele w obszarze tła (obszarze pozbawionym defektów) opisana zależnością:

$$\bar{D}_s = \frac{\sum_{k, l \in O_s} d_{k, l}}{N_s} \quad (\forall k \neq l), \quad (6)$$

gdzie: N_s – liczba par pikseli w obszarze tła, $d_{k, l}$ – odległość obliczana dla każdej pary pikseli w obszarze tła, O_s – zbiór pikseli należących do obszaru tła.

- różnica pomiędzy średnią odległością w obszarach defektów a średnią odległością w obszarze tła, opisana zależnością:

$$D = \bar{D}_{def} - \bar{D}_s \quad (7)$$

Kryteria określone wzorami (5)-(7) wymagają podania zależności definiujących metryki $d_{k, l}$. W niniejszej pracy wykorzystano trzy definicje odległości (metryk) pomiędzy obiektami, tj. odległość euklidesową, standaryzowaną odległość euklidesową oraz odległość Mahalanobisa. Odległość euklidesowa może być opisana za pomocą zależności [11]:

$$d_e = \sqrt{(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_l)(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_l)^T}, \quad (8)$$

gdzie: $\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_l$ – wektory reprezentujące obiekty w wielowymiarowej przestrzeni cech, T – operator transpozycji macierzy.

Standaryzowaną odległość euklidesową definiuje się jako [11]:

$$d_{se} = \sqrt{(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_l)\mathbf{V}^{-1}(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_l)^T}, \quad (9)$$

gdzie: \mathbf{V}^{-1} – macierz odwrotna do diagonalnej macierzy wariancji różnic pomiędzy odpowiadającymi sobie współrzędnymi wektorów \mathbf{x}_k i \mathbf{x}_l .

Odległość Mahalanobisa opisuje wyrażenie [11]:

$$d_m = \sqrt{(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_l)\mathbf{C}^{-1}(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_l)^T}, \quad (10)$$

gdzie: \mathbf{C} – macierz kowariancji.

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

2.1. Stanowisko pomiarowe

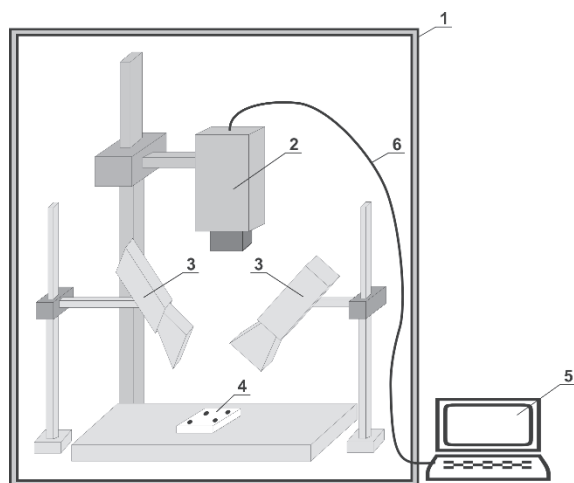
Badania eksperymentalne mające na celu rejestrację sekwencji termogramów powierzchni badanej próbki materiału przeprowadzono na stanowisku pomiarowym, którego schemat zaprezentowano na rysunku 1. W skład stanowiska wchodzi następujące elementy: zamknięta komora badawcza (1) pozwalająca na odizolowanie procesu pomiarowego od niekorzystnego wpływu promieniowania otoczenia, długofalowa, niechłodzona kamera termowizyjna FLIR ThermoCAM PM595 (2) z detektorem mikrobolometrycznym o rozdzielczości 320x240 pikseli, rozdzielczości termicznej NETD = 100 mK i dokładności w warunkach kalibracji ± 2 °C lub $\pm 2\%$, dwa źródła wymuszenia cieplnego (3) o łącznej mocy 500 W, badana próbka materiału (4), komputer osobisty (5) wyposażony w cyfrową kartę rejestracji sekwencji termogramów PCI IC2-DIG16 frame grabber firmy Imaging Technology i dedykowane oprogramowanie FLIR Researcher, sterujące kamerą.

2.2. Metodyka badań

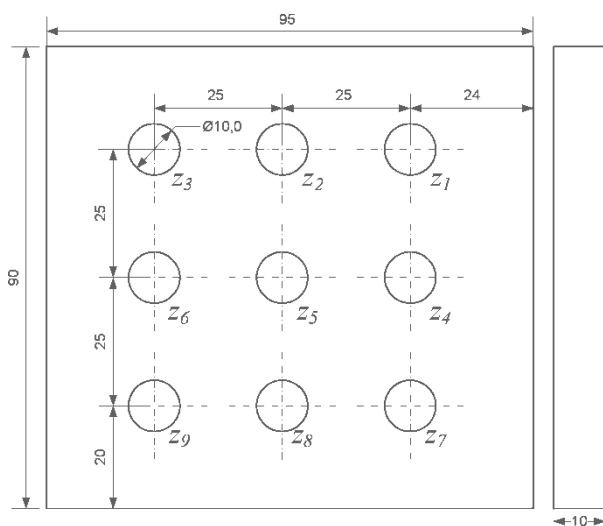
W badaniach eksperymentalnych użyto próbek wykonanej z polimetakrylanu metylu ze sztucznie wytworzonymi defektami powietrznymi. Dyfuzyjność próbki oszacowano na ok. $0,12 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Od spodniej strony próbki nawiercono dziewięć nieprzelotowych

otworów. Defekty powietrzne wykonano na głębokościach: $z_1 = 1,0$ mm, $z_2 = 1,2$ mm, $z_3 = 1,4$ mm, $z_4 = 1,6$ mm, $z_5 = 1,8$ mm, $z_6 = 2,0$ mm, $z_7 = 2,2$ mm, $z_8 = 2,4$ mm, $z_9 = 2,6$ mm względem nagrzewanej powierzchni próbki. Powierzchnię próbki pokryto matowym lakierem o pasmowym współczynniku emisyjności ε wynoszącym ok. 0,9. Rozmieszczenie defektów w próbce przedstawiono na rysunku 2.

W trakcie eksperymentu powierzchnia próbki była nagrzewana za pomocą źródeł wymuszenia cieplnego o całkowitej mocy elektrycznej 500 W. Nagrzewanie prowadzono przez 120 s. Przez cały czas trwania fazy nagrzewania rejestrowano termogramy powierzchni próbki.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe [8]



Rys. 2. Schemat badanej próbki wraz z rozmieszczeniem sztucznie wytworzonych defektów powietrznych

W eksperymencie zarejestrowano 120 termogramów, z częstotliwością próbkowania równą 1 Hz.

2.3. Wyniki badań

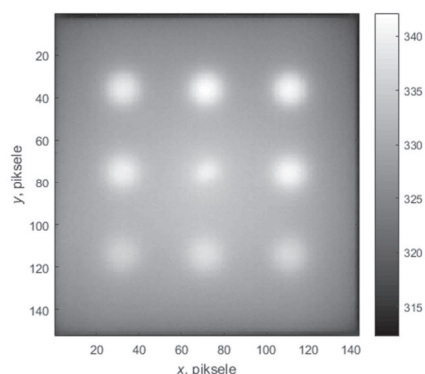
Przykładowy termogram sekwencji zarejestrowanej w trakcie badań eksperymentalnych zaprezentowano na rysunku 3. Termogram obrazuje pole temperatury powierzchni próbki w chwili czasowej $\tau = 100$ s względem początku fazy nagrzewania. Na skali barwnej przedstawionej na rysunku 3, wartości temperatury powierzchni próbki podano w Kelwinach.

3. PROCEDURA PRZETWARZANIA DANYCH

3.1. Etapy przetwarzania danych

Dane zarejestrowane podczas eksperymentów zostały następnie poddane przetwarzaniu. Procedura przetwarzania danych została podzielona na następujące etapy:

1. Zapis sekwencji termogramów w postaci trójwymiarowej macierzy temperatur (dwa wymiary przestrzenne i trzeci wymiar reprezentujący czas rejestracji).
2. Przeprowadzenie transformacji TOP-HAT dla wszystkich termogramów sekwencji, przy założonym kształcie i rozmiarze elementu strukturalnego.
3. Wyznaczenie odległości pomiędzy obiektami reprezentującymi piksele, z wykorzystaniem zależności (5)-(7), przy uwzględnieniu definicji (8)-(10).
4. Analiza wyników przetwarzania danych

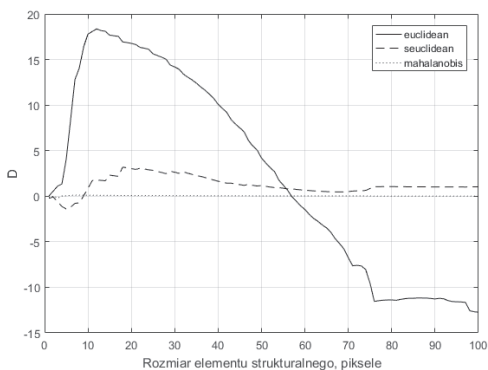


Rys. 3. Termogram powierzchni badanej próbki, zarejestrowany dla chwili czasowej $\tau = 100$ s od początku nagrzewania

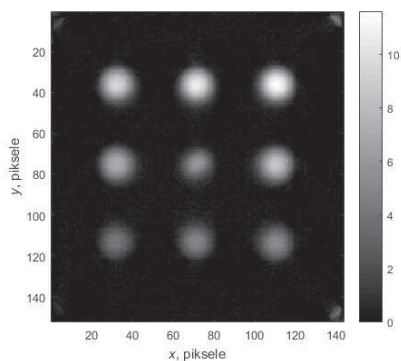
W niniejszej pracy, do określenia kształtu i rozmiaru elementu strukturalnego używanego w transformacji TOP-HAT zaproponowano nowatorską metodę opartą na optymalizacji kryterium opisanego zależnością (7).

W procedurach uczenia maszynowego, zarówno w zagadnieniach klasyfikacji, jak i regresji, obiekty reprezentowane przez przebiegi czasowe temperatury powierzchni badanej próbki stanowią dane wejściowe. Z punktu widzenia procedur automatycznego wykrywania defektów, niezbędne jest zachowanie jak największej odległości pomiędzy obiektami reprezentującymi defekty na różnych głębokościach (charakteryzacja przez rozróżnianie). Jednocześnie obiekty reprezentujące tło, znajdujące się w obszarach pozbawionych defektów, powinny być położone jak najbliżej od siebie. Dlatego też, wydaje się, że dla celów zwiększenia efektywności procedur uczenia maszynowego, rozmiar i kształt elementu strukturalnego powinien być tak dobrany, aby zależność (7) osiągała maksimum. Przebieg zależności (7) w funkcji rozmiaru elementu strukturalnego typu „disk” dla odległości opisanych zależnościami (8)-(10) przedstawiono na rysunku 4.

Transformatę TOP-HAT dla termogramu z rysunku 3, przeprowadzoną elementem strukturalnym typu „disk” o rozmiarze (średnicy) 12 pikseli przedstawiono na rysunku 5. Rozmiar użytego elementu strukturalnego odpowiada maksymalnej wartości kryterium (7), odczytanej z rysunku 4.



Rys. 4. Zależność różnicy pomiędzy średnią odległością w obszarach defektów a średnią odległością w obszarze tła (7) w funkcji rozmiaru elementu strukturalnego typu „disk”



Rys. 5. Transformata TOP-HAT termogramu powierzchni badanej próbki, $\tau = 100$ s od początku nagrzewania, element strukturalnego typu „disk” o rozmiarze 12 pikseli

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Analizując wyniki badań sformułowano następujące wnioski:

- Największą wrażliwość kryterium (7) na zmiany rozmiaru elementu strukturalnego zaobserwowano przy użyciu odległości euklidesowej – rysunek 4.
- Wartość kryterium (6) przy użyciu elementu strukturalnego typu „disk” o rozmiarze 12 pikseli wyniosła 36,6 dla termogramu oryginalnego oraz 3,8 dla transformaty TOP-HAT. W związku z tym można stwierdzić, że niejednorodność nagrzania w obszarze tła w sensie kryterium (6) zmalała ok. 10-cio krotne.
- W ramach dalszych prac planuje się badania opisywanej metody z użyciem elementów strukturalnych innych niż typu „disk” oraz ocenę jej efektywności w wykrywaniu

defektów z wykorzystaniem wybranych procedur uczenia maszynowego.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Maldague X.P.: „Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing”, John Wiley & Sons Interscience, New York 2001.
2. Gleiter A., Spiessberger C., Busse G.: „Phase angle thermography for depth resolved characterization”, Proc. 9th International Conference on Quantitative Infrared Thermography QiRT, July 2-5, Kraków, str. 435-441.
3. Dudzik S.: „A simple method for defect area detection using active thermography”, Opto-Electronics Review, Vol. 17, Issue 4, 2009, str. 338-344.
4. Minkina W., Dudzik S.: „Infrared Thermography – Errors and Uncertainties”, John Wiley & Sons, Chichester 2009.
5. Russ J.C.: „Image Processing Handbook”, CRC Press LLC 2002.
6. Malina W., Smiatcz M.: „Cyfrowe przetwarzanie obrazów”, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2008.
7. Nieniewski M.: „Segmentacja obrazów cyfrowych. Metody segmentacji wododziałowej”, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2005.
8. Dudzik S.: „Wyznaczanie głębokości defektów materiałowych z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych i aktywnej termografii dynamicznej”, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2013.
9. Dudzik S.: „Application of the naive Bayes classifier to defect characterization using active thermography”, Journal of Nondestructive Evaluation, (31) 4, 2012, str. 383-392.
10. Dudzik S., Two-stage neural algorithm for defect detection and characterization uses an active thermography, Infrared Physics and Technology, (71) 2015, str. 187-197
11. Serre J.: „Image analysis and mathematical morphology”, Academic Press, New York 1982.
12. Dudzik S.: „Zastosowanie morfologii matematycznej do wykrywania defektów materiałowych z wykorzystaniem aktywnej termografii w podczerwieni, rozdział 3 monografii “Wybrane problem współczesnej termografii i termometrii w podczerwieni” pod red. W. Minkiny, Wyd. Pol. Częstochowskiej, 2011, str. 62-78.

USE THE TOP-HAT TRANSFORMATION FOR PROCESSING OF THE THERMAL IMAGES SEQUENCES

In defect detection techniques applied in the active thermography, the learning machine algorithms are increasingly used. During experiments the surface of material sample is heated and the thermal response is obtained as an transient temperature field which is recorded in the form of a sequence of thermal images. In this work, the use of TOP-HAT transformation to the thermal images processing were presented. The purpose of the processing was the correction of the uneven heating of defective material sample. In the sample used in the research, the aerial defects at different depths were artificially prepared. In paper, it was proposed a novel method for determination of the structural element size and shape, used in the TOP-HAT transformation of a thermal images sequence. This method is based on the notion of distance between the objects existing in the multidimensional feature space. In this work the exemplary results of the processing of thermal images sequence with the TOP-HAT transform were presented. It was found, that the most sensitivity to size of the structural element used in the TOP-HAT transform procedure, is the Euclidean distance.

Keywords: non-destructive testing, active thermography, mathematical morphology, TOP-HAT transform.