

# PORÓWNANIE WYBRANYCH METOD WYZNACZANIA OBSZARU PŁOMIENIA W WIZYJNYM SYSTEMIE DIAGNOSTYCZNYM

**Daniel Sawicki, Andrzej Kotyra**

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Instytut Elektroniki i Techniki Informatycznych

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono porównanie wybranych metod wykrywania krawędzi dla obrazów spalania pyłu węglowego. Porównano metodę gradientową Canny'ego z metodą zbiorów poziomowych oraz metodą opartą o model konturu aktywnego Chan-Vese. Wyniki badań pokazują, że metoda korzystająca z modelu Chan-Vese dobrze odwzorowała brzeg obszaru.

**Słowa kluczowe:** wykrywanie brzegu obszaru, płomień, spalanie, kontur aktywny

## COMPARISON OF SELECTED FLAME AREA DETECTION METHODS IN VISION DIAGNOSTIC SYSTEM

**Abstract.** This paper presents comparison edge detection method of combustion pulverized coal. Compared method are: Canny edge detection operator, level set method and Chan-Vese active contour method. Experimental results show that edges extracted with method based on Chan-Vese active contour model gives good result.

**Keywords:** edge detection, flame, combustion, active contour

### Wstęp

Wykorzystanie płomienia jako źródła informacji o procesie spalania jest jednym ze sposobów diagnozowania tego procesu. Dzięki analizie obrazu płomienia można uzyskać informację o stanie procesu praktycznie bez żadnych opóźnień. Jest to szczególnie istotne w przypadku spalania paliw charakteryzujących się dużą zmiennością właściwości fizykochemicznych. Do tej grupy należą m.in. mieszaniny biomasy i węgla, których spalanie jest najbardziej rozpowszechnionym w Polsce sposobem wykorzystania paliw odnawialnych [5].

Płomień towarzyszy egzotermicznym reakcjom utleniania. Obecność płomienia związana jest więc z miejscem w przestrzeni, gdzie taki rodzaj reakcji występuje. Trudno jest jednak w takim przypadku wskazać granicę oddzielającą przestrzeń, w której spalanie występuje, ponieważ stężenia reagentów nie zmieniają się w sposób skokowy. Głównym źródłem promieniowania w płomieniu pyłowym jest obłok rozgrzanych do wysokiej temperatury cząstek stałych (pyłu węglowego, sadzy, popiołu itp.). Ponieważ koncentracja świecących cząstek nie zmienia się skokowo, nie można wyróżnić krawędzi płomienia, jak np. w przypadku ciała stałego. Występujące w płomieniu zjawiska pochłaniania i rozpraszania promieniowania wprowadzają dodatkowe niejednoznaczności w określeniu granicy płomienia.

Z tego względu istotnym jest zbadanie różnych algorytmów pozwalających na wykrycie krawędzi płomienia, pod kątem ich wykorzystania w układzie diagnostyki procesu spalania [5]. W tym celu porównano metody Canny'ego [3], zbiorów poziomowych [4] oraz aktywnego konturu [1, 2] dla obrazów zarejestrowanych w czasie testów spalania mieszanin pyłu węglowego i biomasy w warunkach laboratoryjnych przy różnych wydatkach powietrza i paliwa. Pod uwagę brano zmienność uzyskiwanych wartości pola powierzchni płomienia wyznaczonego w czasie trwania wspomnianych testów.

### 1. Metody gradientowe

Algorytm Canny'ego jest jednym z niewielu filtrów wykrywania krawędzi zaprojektowanym w oparciu o czysto analityczne podejście do konstrukcji filtrów tego typu. W zależności od wartości i układu współczynników w maskach filtrujących, wykrywają linie mające określony kierunek, na przykład pionowe, poziome lub ukośne [3].

Pierwszym etapem działania algorytmu jest redukcja szumów filtrem Gaussa, a następnie wyznaczenie pierwszej pochodnej obrazu, jako pochodnej tej funkcji. Oba działania wykonywane są z wykorzystaniem masek jednowymiarowych działających oddzielnie w kierunku wierszy i w kierunku kolumn. Wartości

pierwszej pochodnej dla maski pionowej wyznaczone są zgodnie z równaniem:

$$G_{\sigma}(x)' = \left( -\frac{x^2}{\sigma^2} \right) \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

gdzie:  $\sigma$  – odchylenie standardowe,  $x$  – pozycja piksela w masce w kierunku wierszy.

Analogicznie według wzoru (1) wyznaczone są wartości dla maski poziomej. W wyniku konwolucji obrazu z każdą z masek, otrzymujemy składowe gradientu w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach. Wartości odpowiedzi i kierunek krawędzi obliczane są zgodnie z wzorami (2) oraz (3):

$$G_{mag} = \sqrt{(S_x)^2 + (S_y)^2} \quad (2)$$

$$G_{dir} = \arctan S_y / S_x \quad (3)$$

gdzie:  $S_x$  – maska pozioma, wyznacza wartość gradientu w kierunku wierszy,  $S_y$  – maska pionowa, wyznacza wartość gradientu w kierunku kolumn.

Kolejnym etapem jest proces polegający na ograniczaniu lokalnych wartości niemaksymalnych (non-maximum suppression). Pikselem krawędzi będzie ten, dla którego wartość odpowiedzi krawędzi będzie większa od wartości pikseli sąsiednich, leżących w tym samym kierunku. Końcowy etap to procedura binaryzacji z histerezą z wykorzystaniem dwóch wartości progowych, wysokiego progu  $Th$  oraz niskiego  $Tl$ .

Algorytm Sobela polega na wyznaczeniu pochodnej kierunkowej za pomocą operacji dwuwymiarowego dyskretnego splotu macierzy obrazu z macierzą 3x3 charakterystyczną dla danego kierunku zwaną jądrem przekształcenia. Macierze te są antysymetryczne w stosunku do kierunku wykrywanej krawędzi. Zbiór 8 macierzy pozwala na określenie kierunku od  $0^\circ$  do  $315^\circ$  z krokiem  $45^\circ$ . Dla kierunku  $0^\circ$  wykrywane są krawędzie pionowe, a dla  $90^\circ$  – krawędzie poziome. Operacja splotu wyznacza w pierwszym przypadku estymatę pochodnej cząstkowej względem osi X, a drugim względem osi Y. Otrzymane wartości pochodnych cząstkowych definiują wektor gradientu dla każdego punktu obrazu.

Algorytm Roberta to jeden z najwcześniejszych algorytmów wykrywania krawędzi, który został zaproponowany już w 1963 roku. Zasada działania polega na obliczeniu różnic luminancji pikseli położonych koło siebie po przekątnych, a następnie dodaniu ich wartości bezwzględnych. Obliczenie różnic można zapisać jako spłot macierzy obrazu z każdą z przedstawionych poniżej macierzy o wymiarach 2x2

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Wynikiem tych operacji są dwie macierze przedstawiające pochodne kierunkowe obliczone dla kierunków 135° oraz 45°. Wynikowy obraz krawędzi powstaje po obliczeniu pierwiastka z sumy kwadratów elementów obu macierzy.

## 2. Metoda zbiorów poziomicowych

Metoda zbiorów poziomicowych jest to technika numeryczna, za pomocą której można śledzić figury poszukiwanego obiektu oraz optymalizować ich kształt. Podstawową zaletą metody jest możliwość wykonywania obliczeń numerycznych związanych z krzywymi lub płaszczyznami w układzie kartezjańskim bez konieczności ich parametryzowania [4, 6]. Idea metody zbiorów poziomicowych sprowadza się do analizy i wyznaczania ruchu granicy hiperpowierzchni  $\Gamma$  obszaru  $\Omega$  w polu prędkości  $v(u, v, w)$ . Prędkość może zależeć od położenia, czasu, geometrii  $\Gamma$  oraz warunków zewnętrznych. Zdefiniowana jest funkcja  $\phi(\mathbf{x}, t)$  nazwaną zbiorem funkcji poziomic. Granica  $\Gamma$  określona jest jako zbiór gdzie funkcja  $\phi(\mathbf{x}, t)=0$ ,  $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ . Funkcja  $\phi(\mathbf{x}, t)$  przyjmuje następujące wartości:

$$\begin{aligned} \phi(\mathbf{x}, t) &> 0 \text{ dla } \mathbf{x} \in \Omega_1 \\ \phi(\mathbf{x}, t) &< 0 \text{ dla } \mathbf{x} \in \Omega_2 \\ \phi(\mathbf{x}, t) &= 0 \text{ dla } \mathbf{x} \in \partial\Omega = \Gamma(t) \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie  $\Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \partial\Omega = \Omega$ . Zbiór funkcji poziomic posiada reprezentację niejawną, niewymagającą podania funkcji opisującej tak jak w przypadku jawnym. Funkcja jest definiowana poprzez określenie wartości w każdym punkcie.

Różniczkując  $\phi(\mathbf{x}(t), t)=0$  względem  $t$  otrzymano równanie:

$$\frac{\partial \phi(\mathbf{x}(t), t)}{\partial t} + v \cdot \nabla \phi(\mathbf{x}(t), t) = 0 \quad (6)$$

gdzie  $\nabla$  jest operatorem gradientu. W przypadku trójwymiarowym można zapisać:

$$v \cdot \nabla \phi(\mathbf{x}(t), t) = u\phi_x + v\phi_y + w\phi_z \quad (7)$$

Rozważając ruch w kierunku normowanym pole prędkości można przedstawić równaniem:

$$v = F \cdot \mathbf{n} \quad (8)$$

gdzie  $\mathbf{n}$  jest zdefiniowane jako:

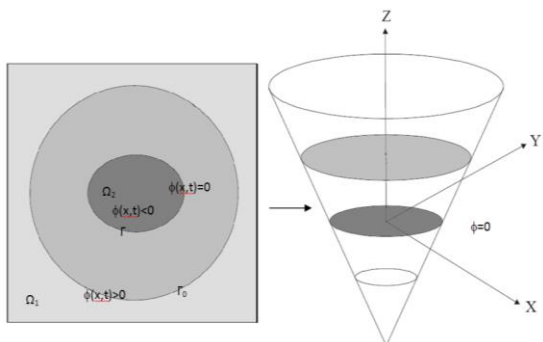
$$\mathbf{n} = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \quad (9)$$

Do równania (8) podstawiono równanie (9) i wynik podstawiono do (6) mając na uwadze zależność  $\nabla \phi \cdot \nabla \phi = |\partial \phi|^2$  otrzymano podstawowe równanie zbiorów poziomicowych [10]:

$$\frac{\partial \phi(\mathbf{x}(t), t)}{\partial t} + F \cdot |\nabla \phi(\mathbf{x}(t), t)| = 0 \quad (10)$$

gdzie:

$$|\nabla \phi(\mathbf{x}(t), t)| = \sqrt{\sum_{i=1}^n \phi(x_i(t), t)^2} \quad (11)$$



Rys. 1. Zerowy zbiór poziomicowy oraz rozpatrywany obszar

## 3. Model konturu aktywnego Chan-Vese

Algorytm Chan-Vese do segmentacji obrazu wykorzystuje uproszczony model Mumford-Shah i funkcję zbiorów poziomicowych [2, 7]. Algorytm ten nie wymaga stosowania wielu obszarów startowych w celu wykrycia bardziej złożonych kształtów obiektów. W tej metodzie  $\Omega$  jest obszarem obrazu  $I(x, y)$ , który można podzielić na wewnętrzny  $\Omega_1$  i zewnętrzny  $\Omega_2$  obszar ograniczony konturem  $\phi$  o intensywności odpowiednio  $c_1$  i  $c_2$ . Funkcja celu konturu aktywnego została zdefiniowana następująco:

$$F(\phi, c_1, c_2) = \mu \cdot L(\phi) + v \cdot S_0(\phi) + \lambda_1 \int_{\Omega_1} |I - c_1|^2 dx dy + \lambda_2 \int_{\Omega_2} |I - c_2|^2 dx dy \quad (12)$$

gdzie  $L(\phi)$  jest długością  $\phi$ ,  $S_0(\phi)$  jest wewnętrznym obszarem  $\phi$ ,  $\mu, v \geq 0$ ,  $\lambda_1, \lambda_2 > 0$  są współczynnikami odpowiednich wyrażeń funkcji celu. Minimalizując funkcję celu (11) otrzymano następujące równania:

$$\begin{cases} c_1(\phi) = \frac{\int_{\Omega} I(x, y) H_{\varepsilon}(\phi) dx dy}{\int_{\Omega} H_{\varepsilon}(\phi) dx dy} \\ c_2(\phi) = \frac{\int_{\Omega} I(x, y) (1 - H_{\varepsilon}(\phi)) dx dy}{\int_{\Omega} (1 - H_{\varepsilon}(\phi)) dx dy} \\ \frac{\partial \phi}{\partial t} = \delta_{\varepsilon}(\phi) \left[ \mu \nabla \cdot \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} - v - \lambda_1 (I(x, y) - c_1)^2 \right. \\ \left. + \lambda_2 (I(x, y) - c_2)^2 \right] \\ \phi(x, y, t = 0) = \phi_0(x, y) \end{cases} \quad (13)$$

gdzie  $\Omega$  jest obszarem  $\phi$ , funkcja skokowa i impulsowa zostały zdefiniowane następująco:

$$\begin{aligned} H(z) &= \begin{cases} 1, z \geq 0 \\ 0, z < 0 \end{cases} \\ \delta(z) &= \frac{dH(z)}{dz} \end{aligned} \quad (14)$$

W obliczeniach wykorzystano następujące równania funkcji skokowej i funkcji celu:

$$H_{\varepsilon}(z) = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2}{\pi} \arctg \left( \frac{z}{\varepsilon} \right) \right) \quad (15)$$

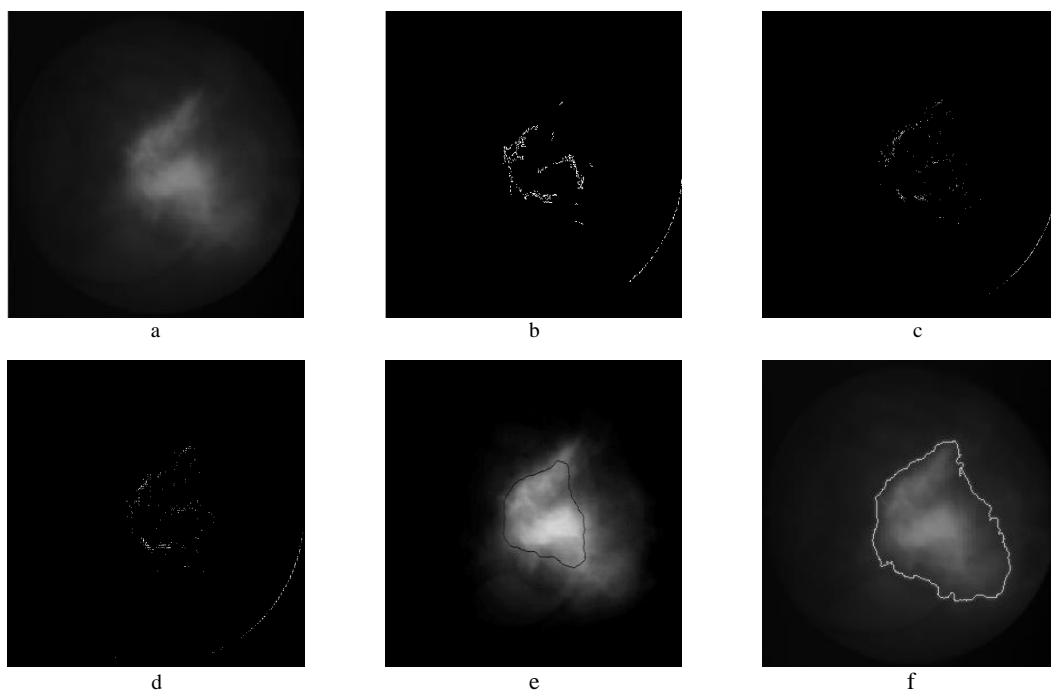
$$\delta_{\varepsilon}(z) = \frac{1}{\pi} \frac{\varepsilon}{\varepsilon^2 + z^2} \quad (16)$$

$$F(x, y) = -v - \lambda_1 (I(x, y) - c_1)^2 + \lambda_2 (I(x, y) - c_2)^2 \quad (17)$$

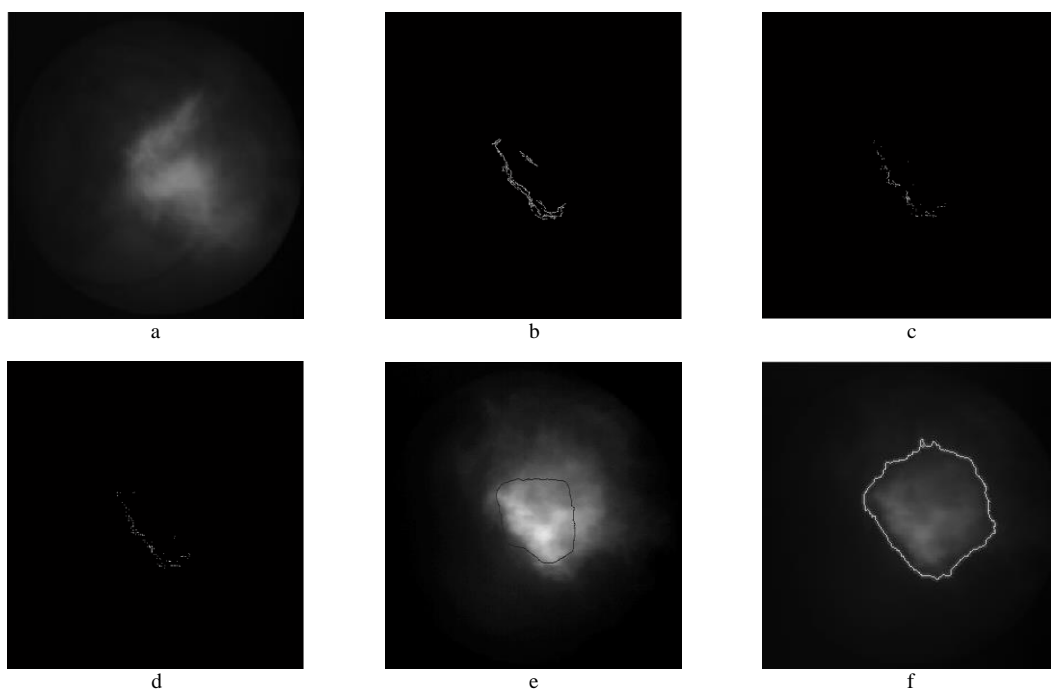
gdzie  $\varepsilon$  jest wartością stałą.

## 4. Wyniki

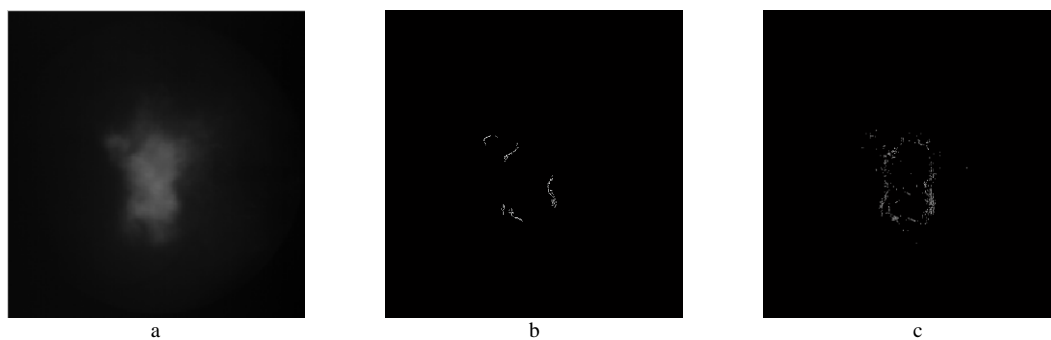
Na rysunkach 2, 3 i 4 przedstawiono wyniki przeprowadzonej segmentacji dla wybranych obrazów płomienia z wykorzystaniem metody Canny'ego, metody zbiorów poziomicowych oraz metody konturu aktywnego. W modelu konturu aktywnego użyto następujących parametrów:  $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$ ,  $\varepsilon = 1$ . Przedstawiono wyniki wybranych obrazów płomienia zarejestrowanych przy współpalania pyłu węglowego i słomy. Testowane obrazy obejmowały strefę w pobliżu wylotu palnika pod kątem ok. 45° do osi palnika.



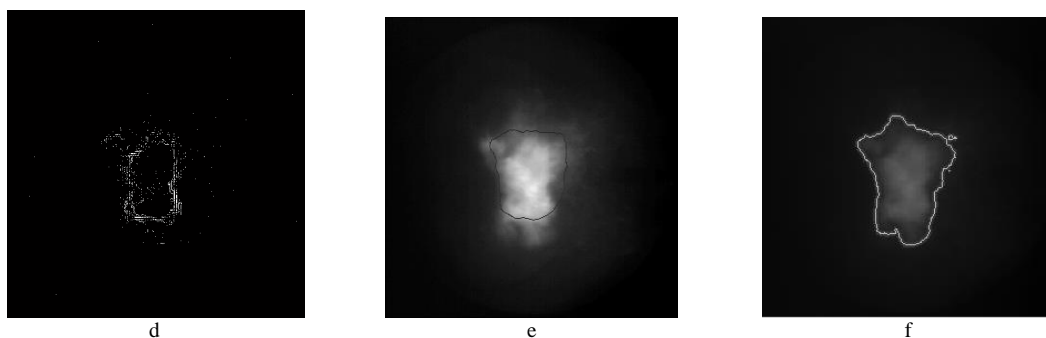
Rys. 2. Obraz płomienia (a) i wyznaczone krawędzie przy użyciu metod: (b) Canny'ego, (c) Sobela, (d) Roberta, (e) zbiorów poziomicowych, (f) Chan-Vese



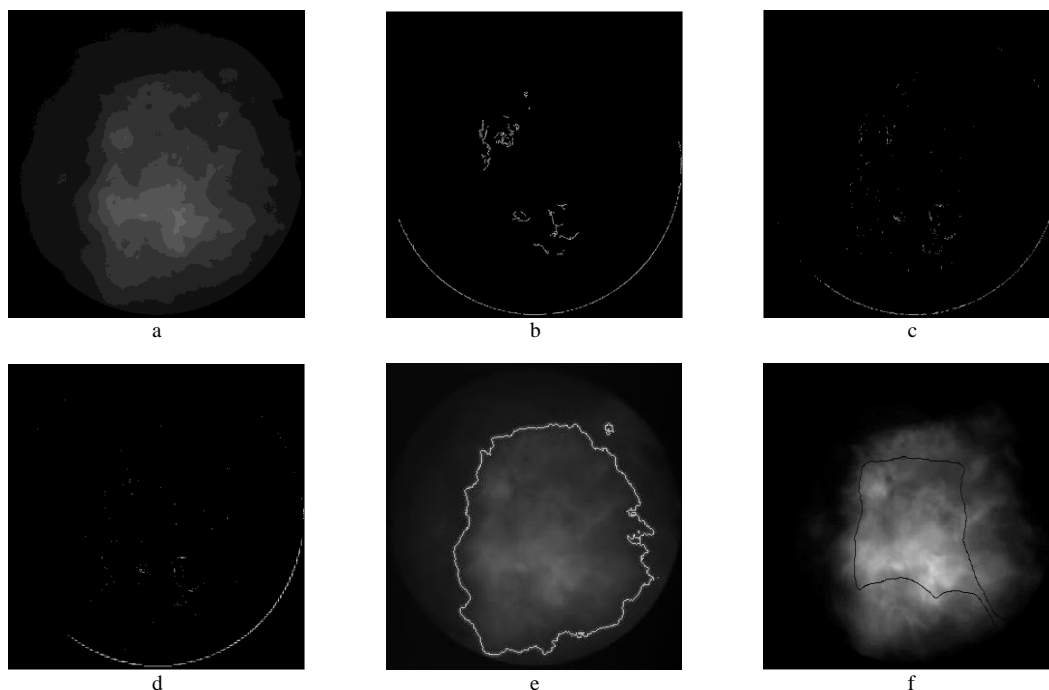
Rys. 3. Obraz płomienia (a) i wyznaczone krawędzie przy użyciu metod: (b) Canny'ego, (c) Sobela, (d) Roberta, (e) zbiorów poziomicowych, (f) Chan-Vese



Rys. 4. Obraz płomienia (a) i wyznaczone krawędzie przy użyciu metod: (b) Canny'ego, (c) Sobela, (d) Roberta, (e) zbiorów poziomicowych, (f) Chan-Vese



Rys. 4 c.d. Obraz płomienia (a) i wyznaczone krawędzie przy użyciu metod: (b) Canny'ego, (c) Sobela, (d) Roberta, (e) zbiorów poziomicowych, (f) Chan-Vese



Rys. 5. Obraz płomienia (a) i wyznaczone krawędzie przy użyciu metod: (b) Canny'ego, (c) Sobela, (d) Roberta, (e) zbiorów poziomicowych, (f) Chan-Vese

## 5. Podsumowanie

Z przedstawionych obrazów testowych można wyciągnąć następujące wnioski. Zastosowanie przedstawionych metod wykrywania krawędzi dało bardzo rozbieżne wyniki. Kontur uzyskany za pomocą metody Chan-Vese i zbiorów poziomicowych jest zamknięty w odróżnieniu do konturu wyznaczonego metodami gradientowymi. Pozwala to na analizę kształtu płomienia z wykorzystaniem geometrycznych wskaźników kształtu, deskryptorów Fouriera lub falkowych. Dzięki temu możliwa będzie ocena stanu procesu spalania na podstawie obrazów płomienia rejestrowanych w czasie rzeczywistym. Biorąc powyższe pod uwagę, istotny jest czas w którym następuje wyznaczenie krawędzi ze względu na możliwość pomijania klatek w przetwarzanej sekwencji obrazów. Porównanie pod tym względem metody zbiorów poziomicowych i Chan-Vese wskazuje na metodę Chan-Vese.

Dalsze prace skoncentrowane będą na optymalizacji działania algorytmu wykorzystującego metodę Chan-Vese pod kątem jego wykorzystania w systemie diagnozującym przebieg procesu spalania działającym w trybie on-line.

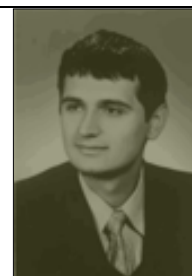
## Literatura

- [1] Chan T., Sandberg Y. L.: Active contours without edges for Vector-valued Image, Journal of Visual Communication and Image Representation 11/2000, 130-141.
- [2] Chan T., Vese L.: Active contours without edges, IEEE Transaction on Image Processing, 10/2001, 266-277.
- [3] Canny, J.: A Computational Approach To Edge Detection, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8/1986, 679-714.

- [4] Filipowicz S., Sikora J., Polakowski K., Rymarczyk T.: Zastosowanie metody zbiorów poziomicowych oraz metody granicy podobszarów w impedancyjnej tomografii komputerowej, Przegląd Elektrotechniczny, 4/2009.
- [5] Golec T.: Współspalanie biomasy w kotłach energetycznych, Energetyka i Ekologia, 7/2004, 437-444.
- [6] Osher S., Fedkiw R.: Level Set Method and Dynamic Implicit Surfaces, Springer, New York, 2003.
- [7] Xingxing S., Fuzhen H.: Flame detection based on C-V active contour model, International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence 2009.

**Mgr inż. Daniel Sawicki**  
e-mail: d.sawicki@pollub.pl

Ukończył studia o kierunku elektrotechnika na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej w 2006r. Obecnie jest zatrudniony jako asystent w Instytucie Elektroniki i Techniki Informatycznych Politechniki Lubelskiej



**Dr hab. inż. Andrzej Kotyra, prof. PL**  
e-mail: a.kotyra@pollub.pl

Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Lubelskiej w 1991r. Od 1992 r. pracuje w Instytucie Elektroniki i Techniki Informatycznych Politechniki Lubelskiej. W 2002 r. uzyskał tytuł doktora nauk technicznych, a w 2011r. tytuł doktora habilitowanego. Od 2012 jest kierownikiem Zakładu Diagnostyki i Analizy Pomiarów.

