

Paweł ROTTER¹, Andrzej SKOWINIAK²

¹AGH AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA AUTOMATYKI, Al. Adama Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

²P.B.P.H. TECHGLASS, ul. Juliusza Lea 114, 30-133 Kraków

Metoda komputerowej analizy obrazu dla pieców szklarskich

Dr inż. Paweł ROTTER

Jest absolwentem Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH. Pracował m.in. na Uniwersytecie Arystotelesa w Salonikach (2001-2002) oraz w Joint Research Centre w Sewilli (2005-2008). Był wykładowcą Smart University w Sophia Antipolis oraz ekspertem zewnętrzną agencji ENISA. Brał udział w kilkunastu międzynarodowych projektach badawczych. Obecnie jest adiunktem w Katedrze Automatyki na Wydziale EAIiE AGH. Zajmuje się sztuczną inteligencją i komputerową analizą obrazów.



e-mail: rotter@agh.edu.pl

Mgr inż. Andrzej SKOWINIAK

Jest absolwentem Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, Wydziału Automatyki i Informatyki. Przed 1990 rokiem był starszym asystentem w Instytucie Automatyki i Informatyki AGH oraz kierownikiem Zakładu Techniki Ciepłej w Instytucie Szkła i Ceramiki. W 1990 roku założył P.B.P.H. Techglass. Kierowana przez niego od początku istnienia firma zatrudnia obecnie ponad 130 osób, projektując i budując piece szklarskie w 15 krajach.



e-mail: andrzej.skowiniak@techglass.pl

Streszczenie

Sterowanie płomieniem w piecach szklarskich odbywa się przede wszystkim na podstawie obrazu lustra szkła dostarczonego przez kamerę zamontowaną w górnej części komory pieca. W zaproponowanej metodzie dokonuje się pomiaru zdefiniowanych parametrów procesu topienia szkła na podstawie automatycznej analizy obrazu. Algorytm uwzględnia ewentualną asymetrię ustawienia kamery, a także wykrywa osad, który zwykle gromadzi się na obiektywie kamery. Eksperymenty przeprowadzone na obrazach z kilku hut szkła wskazują jednoznacznie, że proponowana metoda może być z powodzeniem stosowana do automatyzacji procesu wytopu szkła.

Słowa kluczowe: proces wytopu szkła, segmentacja obrazu.

A project and a prototype of the computer image analysis system for glass furnaces

Abstract

Control of glass furnaces is performed mainly based on image of the glass surface which is captured by a camera mounted in the upper part of the furnace. The operator controls the process based on amount and displacement of batch on the surface. The main drawback of manual control is lack of opportunity for effective optimization of the process. Manual control, even by an experienced operator, is rather far from optimal, especially as it takes several hours before the results can be observed and assessed. Setting too low temperature results in decreasing the quality of the production, while too high temperature increases energy consumption and pollution, especially emission of NO_x. Automatic calculation of the process variables may be used in a long-term learning for finding the optimal control as a function of the process state. The proposed method consists in a measurement of the process variables based on the analysis of the image captured by the camera in the glass furnace. The method includes automatic detection of batch borders, calculation of batch coverage in several zones defined by the user and calculation of indicators of batch asymmetry (considering asymmetry of the camera location, if exists). In addition, the algorithm allows for detection of sediment which usually settles at the camera lens.

Keywords: glass melting process, image segmentation.

1. Wprowadzenie

W istniejących piecach szklarskich operator steruje procesem wytopu kierując się przede wszystkim ilością i rozmieszczeniem zestawu (nieroztopionego surowca) na powierzchni lustra szkła. Głównym źródłem informacji dla operatora jest obraz wnętrza wanny dostarczony przez kamerę zamontowaną w górnej części komory pieca. Pomimo wprowadzenia w przemyśle szklarskim licznych systemów wizyjnych służących do inspekcji optycznej wytworzonego szkła [1], na etapie procesu wytopu wizualna ocena stanu lustra szkła w większości instalacji dokonywana jest przez człowieka.

Wadą ręcznego sterowania procesem wytopu jest, obok konieczności stałego zaangażowania pracownika o odpowiednim doświadczeniu, brak możliwości efektywnej optymalizacji procesu sterowania. Sterowanie nawet przez doświadczonego operatora jest dalekie od optymalnego, zwłaszcza że efekty sterowania są obserwowalne dopiero po paru godzinach. Ustawienie zbyt niskiej temperatury może skutkować zepsuciem wsadu, co oznacza duże straty. Z kolei utrzymywanie niepotrzebnie wysokiej temperatury zwiększa zużycie energii, mającej bardzo znaczny udział w kosztach produkcji [2], oraz emisję zanieczyszczeń (głównie tlenków azotu). Automatyczny pomiar parametrów procesu oraz obliczanie wartości zmiennych procesowych może zapewnić powtarzalność, która może być wykorzystana w długoterminowym procesie samouczącym do znalezienia optymalnej zależności wartości sterowania od stanu procesu.

W zaproponowanej metodzie wykonywany jest pomiar parametrów procesu topienia szkła na podstawie analizy obrazu dostarczanego przez kamerę skierowaną na powierzchnię lustra. Algorytm obejmuje automatyczne wykrywanie granic zestawu, obliczanie procentu pokrycia zestawem dla kilku stref pieca zdefiniowanych przez użytkownika, obliczanie wskaźnika asymetrii pokrycia zestawem, z uwzględnieniem ewentualnej asymetrii położenia kamery, a także detekcję osadu, który zwykle gromadzi się na obiektywie kamery.

2. Wykrywanie granic zestawu

Operator sterujący temperaturą pieca szklarskiego bierze pod uwagę przede wszystkim rozmieszczenie elementów zestawu. Dopuszczenie do pojawienia się nie roztopionego surowca w końcowej części wanny może spowodować pogorszenie jakości produkcji, nawet do poziomu który nie pozwala na jej dalsze wykorzystanie. Stąd też, poprawne wykrycie granic zestawu jest bardzo istotnym elementem zaproponowanej w artykule metody analizy obrazu. Obraz otrzymany z kamery w pierwszej kolejności poddawany jest filtracji, mającej na celu poprawę jego jakości, co jest szczególnie istotne w przypadku wykorzystania starszych kamer analogowych zainstalowanych wewnątrz pieca. W omawianym systemie zastosowano filtr medianowy poprzedzony filtrem dolnoprzepustowym dla obrazów o wysokim poziomie szumów. Parametry filtracji mogą być ustawiane w zależności od jakości obrazu; w przypadku stosowania nowych kamer, dających obraz dobrej jakości, nadmierne przekształcanie obrazu niepotrzebnie pogarsza jego jakość.

Segmentacja powierzchni lustra szkła odbywa się na podstawie jasności obrazu w danym obszarze. Kalibracja polega na wskazaniu przez użytkownika przykładowych punktów należących do obszarów: zestawu oraz klarownego szkła w różnych częściach obrazu. Kalibracja wykonywana jest jednorazowo dla danego pieca i położenia kamery.

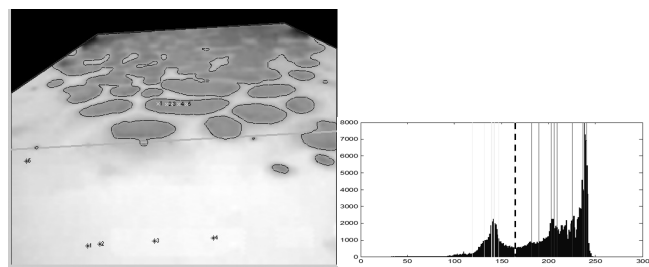
Istnieje wiele metod automatycznego doboru progu (por. przegląd w [4]). Uwzględniając specyfikę zagadnienia (dwie klasy, z których każdej odpowiada wyraźne lokalne maksimum histogramu), odpowiednią metodą jest dobór progu w miejscu odpowiadającym minimum histogramu (por. rys. 1).

Oznaczmy przez $h(i)$ wysokość słupka histogramu odpowiadającego i -temu poziomowi jasności obrazu, przy czym histogram jest obliczany tylko wewnątrz wielokąta ograniczającego obszar lustra szkła. Największy poziom jasności wśród pikseli wskazanych przez użytkownika jako przykładowe punkty zestawu oznaczono przez i_{\min} , a najmniejszy poziom jasności wśród pikseli wskazanych jako obszar roztopionego szkła – przez i_{\max} .

Jako próg segmentacji wybierany jest poziom jasności $i_g \in (i_{\min} + 1, i_{\max} - 1)$ spełniający warunek:

$$\forall j \in (i_{\min} + 1, i_{\max} - 1) : h(i_{g-1}) + h(i_g) + h(i_{g+1}) \leq h(j-1) + h(j) + h(j+1) \quad (1)$$

Użytkownik ma możliwość ręcznej korekty progu w trybie interakcyjnym, obserwując wartość progu na histogramie obrazu oraz odpowiadające jej kontury zestawu.



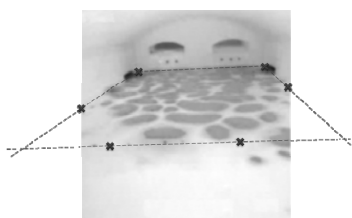
Rys. 1. Granice zestawu wyznaczone metodą doboru progu w oparciu o histogram. Zdjęcie pochodzi z huty szkła w Orzeszu. Na histogramie jasne linie reprezentują piksele obrazu zaznaczone przez użytkownika jako przykładowe punkty zestawu, ciemne linie – przykładowe punkty roztopionego szkła. Linia przerywana wskazuje próg segmentacji

Fig. 1. Batch edge detected using histogram-based threshold calculation. The photo was taken at Orzesze glassworks. Bright lines correspond to example batch points, dark lines – to melted glass points. The dashed line indicates the segmentation threshold

3. Uwzględnienie perspektywy

Kamera umieszczana jest w komorze pieca pod pewnym kątem, zatem widziany przez nią obraz jest dwuwymiarowym przekształceniem homograficznym płaszczyzny lustra szkła. Identyfikując parametry tego przekształcenia można dokonać transformaty odwrotnej, otrzymując rozmieszczenie zestawu na widoku z góry. Dzięki uwzględnieniu przekształcenia perspektywnego, wartości wskaźników charakteryzujące proces (np. rozmieszczenie zestawu) odnoszą się do rzeczywistych wymiarów lustra i są niezależne od ustawienia kamery.

W procesie kalibracji użytkownik wskazuje na ekranie punkty definiujące położenie krawędzi lustra szkła oraz linii bubblingu (rys. 2).

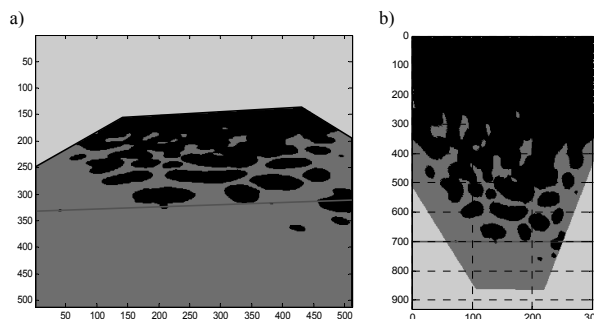


Rys. 2. Sześć punktów zaznaczonych przez użytkownika definiuje część lustra ograniczoną linią bubblingu. Przy znajomości rzeczywistych wymiarów wanny dane te wystarczają do wyznaczenia parametrów przekształcenia perspektywnego

Fig. 2. Six points marked by the user define the part of the glass surface constrained by the bubbling line. When knowing the tank size, these data are sufficient for calculation of perspective projection parameters

Obraz podlegający dalszemu przetwarzaniu jest ograniczany do powierzchni lustra szkła (a dokładniej jej części znajdującej się w polu widzenia kamery). Na podstawie znajomości wymiarów lustra i położenia linii bubblingu wyznaczane są parametry przekształcenia perspektywnego [3], dzięki czemu analizę można odnieść do rzeczywistych powierzchni i odległości, a nie do obrazu w ujęciu perspektywnym.

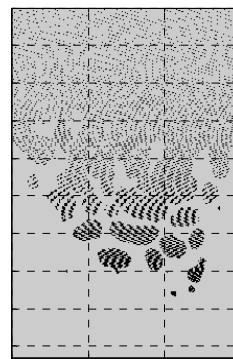
Na rys. 3 przedstawiono segmentację zestawu z rys. 1 w skrócie perspektywnym oraz po przekształceniu na widok z góry.



Rys. 3. Segmentacja zestawu z rys. 1 w skrócie perspektywnym (a) oraz po przekształceniu na widok z góry (b). Skala na osiach rysunku (b) odnosi się do rzeczywistych wymiarów lustra w centymetrach. Kolor czarny oznacza zestaw, ciemnoszary – klarowne szkło, jasnoszary – obszar leżący poza lustrem (a) lub poza polem widzenia kamery (b)

Fig. 3. Segmentation of batch from Fig. 1 in perspective view (a) and after transformation to the view from the top (b). Axes scale in Fig. (b) refers to real tank dimensions in centimetres. Black colour represents batch area, dark grey – clear glass, light grey – area outside the glass surface (a) or outside the field of view (b)

Na uwagę zasługuje fakt, że po uwzględnieniu przekształcenia perspektywnego część obrazu bliższa kamery jest dokładniej reprezentowana w obrazie (por. rys. 4). Jest to jednak cecha pożądana, gdyż kamera jest ulokowana przy końcu pieca, gdzie rozmieszczenie zestawu jest bardziej istotne niż w okolicy zasypników.



Rys. 4. Reprezentacja rzadka: każdy punkt reprezentuje jeden piksel na obrazie oryginalnym. Gęstość punktów odzwierciedla efektywną rozdzielczość obrazu w danym obszarze; obszary położone dalej od kamery są rzadziej reprezentowane

Fig. 4. Sparse representation: each point represents one pixel of batch area in the original image. Density of points represents effective resolution, which depends on location

4. Wskaźniki

Sterowanie procesem wytopu odbywa się przede wszystkim na podstawie informacji jaką część lustra szkła pokrywa zestaw w różnych obszarach wanny. Istotna jest także ewentualna asymetria rozmieszczenia zestawu, która świadczy o nieprawidłowej proporcji ogrzewania prawej i lewej strony pieca lub o niewłaściwej pracy zasypników. Zaproponowane poniżej wskaźniki w sposób syntetyczny charakteryzują stan procesu, pozwalając na automatyczny dobór odpowiedniego sterowania.

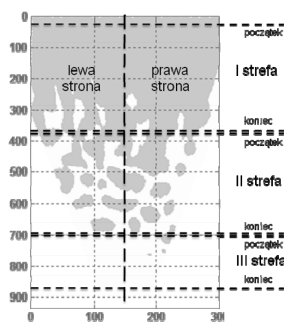
4.1. Wskaźnik procentowego pokrycia zestawem

Większość zdefiniowanych przez nas wskaźników może zostać przedstawiona w funkcji odległości od początku wanny. Przykładowo procentowe pokrycie zestawem może być obliczane osobno dla każdego odcinka łączącego boki wanny, prostopadłego do osi pieca. Np. wartość 85% dla odległości 300 oznacza, że 85% odcinka prostopadłego do osi pieca leżącego w odległości 300 cm od początku wanny jest pokryte zestawem. W przykładzie z rys. 3b dla wartości powyżej 440 kamera nie widzi całego przekroju lustra szkła, wtedy wartości procentowe odnoszą się tylko do widocznej części lustra. Na rys. 5 przedstawiono procentowe pokrycie zestawem dla sytuacji z rys. 3. Np. wartość 7% dla linii bubblingu (zaznaczonej linią na rys. 3b, odległość 700 cm od początku wanny) oznacza, że zestaw pokrywa 7% tej części linii bubblingu, która znajduje się w polu widzenia kamery.



Rys. 5. Procentowe pokrycie zestawem w funkcji odległości od początku wanny
Fig. 5. Batch coverage in percentage as a function of distance from the beginning of the tank

Przebiegi, takie jak przedstawiony na rys. 5, zawierają zbyt dużo informacji aby mogły być bezpośrednio wykorzystane w procesie sterowania. Dlatego też zaproponowano ich uśrednianie w przedziałach odpowiadającym trzem strefom lustra szkła zdefiniowanym przez użytkownika (rys. 6).



Rys. 6. Strefy określone przez użytkownika, dla których obliczane są wskaźniki
Fig. 6. Zones defined by the user where the indicators are calculated

Wskaźniki procentowego pokrycia zestawem obliczane są osobno dla obu stron, dla prawej i dla lewej strony, co przy trzech strefach daje łącznie 9 wskaźników.

4.2. Wskaźnik asymetrii rozmieszczenia zestawu

Wskaźnik asymetrii rozmieszczenia zestawu dla określonej odległości od początku wanny zdefiniowano jako:

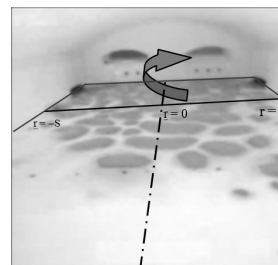
$$W = \frac{\int_0^S r z(r) dr}{\int_0^S r dr}, \quad (2)$$

gdzie S jest połową szerokości lustra szkła, z – zmienną binarną równą 1 w obszarach gdzie występuje zestaw i 0 w pozostałych, r jest odległością elementu dr od osi pieca. Całkowanie odbywa się wzdłuż linii prostopadłej do osi pieca (linia ciągła na rys. 7).

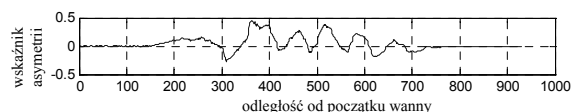
Intuicyjnie, wskaźnik asymetrii jest proporcjonalny do momentu obrotowego który działałby na oś lustra w wyniku „obciążenia”

zestawem (przy założeniu jednakowej grubości zestawu). Współczynnik zawiera się w przedziale $[-1,1]$ przy czym wartość 0 oznacza symetryczne rozmieszczenie zestawu.

Przebieg wskaźnika asymetrii rozmieszczenia zestawu w funkcji odległości od początku wanny dla stanu procesu z rys. 3 przedstawiono na rys. 8. W oparciu o ten przebieg obliczane są trzy wskaźniki, po jednym dla każdej strefy, będące uśrednionymi wartościami w obrębie stref.



Rys. 7. Ilustracja do definicji wskaźnika asymetrii
Fig. 7. Illustration for the definition of the asymmetry indicator



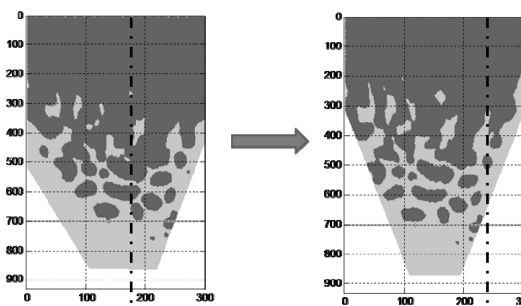
Rys. 8. Wskaźnik asymetrii w funkcji odległości od początku wanny dla rozmieszczenia zestawu z rys. 3
Fig. 8. Asymmetry indicator as a function of distance from the beginning of the tank for batch layout from Fig. 3

4.3. Wskaźniki pola widzenia i asymetrii ustawienia kamery

Wskaźniki pola widzenia i asymetrii ustawienia kamery zawierają informację o tym jaka część lustra szkła jest obserwowana przez kamerę i czy kamera jest ustawiona symetrycznie względem osi pieca. Wskaźnik pola widzenia kamery jest ułamkiem wyrażającym jaką część odcinka prostopadłego do osi pieca (dla określonej odległości od początku pieca) jest obserwowana przez kamerę. Wskaźnik asymetrii ustawienia kamery obliczany jest analogicznie do wskaźnika asymetrii pokrycia zestawem i w przypadku pełnej symetrii powinien być równy 0 na całej długości pieca.

4.4. Uwzględnienie asymetrii ustawienia kamery w obliczaniu wskaźników pokrycia zestawem

W przypadku gdy pole widzenia kamery nie jest dokładnie symetryczne względem osi wanny, obszary będące w polu widzenia kamery które nie mają swojego symetrycznego odpowiednika po przeciwnej stronie lustra są eliminowane z obliczeń (rys. 9).

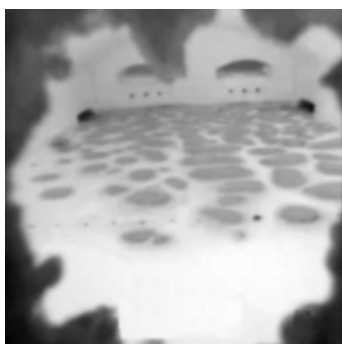


Rys. 9. Obszary, których symetryczne odpowiedniki znajdują się poza polem widzenia kamery są eliminowane z dalszych obliczeń
Fig. 9. The areas whose symmetric counterparts are located outside the field of view are eliminated from further computations

Wszelkie wskaźniki, włączając miary asymetrii rozmieszczenia zestawu, obliczane są dla obrazu, na którym pole widzenia jest symetryczne względem osi pieca. Asymetryczne ustawienie kamery nie wprowadza zatem asymetrii w obliczaniu wskaźników, powoduje natomiast zmniejszenie obszaru pola widzenia wykorzystywanego do obliczeń.

5. Detekcja i segmentacja osadu na obiektywie kamery

W wyniku skraplania i krzepnięcia oparów szkła znajdujących się w komorze pieca na obiektywie kamery lub szkłe chroniącym kamerę przed wysoką temperaturą osiada osad, widoczny na rys. 10. Proponowany system analizy obrazu zawiera algorytm oceniający stopień zanieczyszczeń. Wykrycie fragmentów obrazu przesłoniętych przez osad pozwala na ich eliminację z obliczeń – nie są więc na dalszych etapach mylnie klasyfikowane jako obszar szkła bądź zestawu, a asymetrycznie rozłożony osad nie powoduje błędnych wniosków o asymetrii procesu wytopu.



Rys. 10. Obraz z kamery z widocznym osadem na obiektywie powstałym na skutek działania oparów szkła. Zdjęcie pochodzi z huty szkła w Orzeszu
Fig. 10. Image with visible sediments on the camera lens resulting from glass vapour condensation. The photo was taken at Orzesze glassworks

Do określenia granic osadu opracowano metodę opartą o segmentację przez rozrost obszaru. Punktem wyjścia algorytmu segmentacji jest fakt, że osad stanowi najciemniejszą część obrazu, o jasności wyraźnie mniejszej zarówno od powierzchni szkła, jak od zestawu. Algorytm określania granic zestawu składa się z następujących kroków:

Krok 1. Wstępne określenie obszaru osadu algorytmem *floodfill*. Obszar startowy to dwie pierwsze i dwie ostatnie kolumny obrazu oraz dwa ostatnie wiersze. Próg startowy jest obliczany jako:

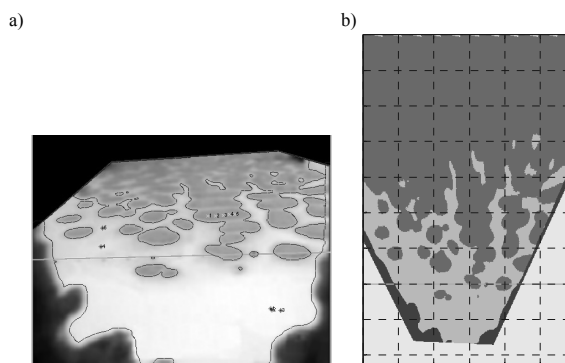
$$\Theta = Z_{\min} - (Z_{\max} - Z_{\min}), \quad (3)$$

gdzie Z_{\max} - Z_{\min} to maksymalna i minimalna jasność pikseli wskazanych przez użytkownika jako obszar zestawu.

Krok 2. Dylatacja obszaru osadu elementem strukturalnym o rozmiarze D_1 , domyślnie $D_1=15$ pikseli.

Krok 3. Zaliczenie do osadu elementów dotychczas rozpoznanych jako zestaw, jeżeli **w całości** mieszczą się:
a. w strefie o promieniu D_2 wokół obszaru osadu lub
b. w odległości D_2 od krawędzi obrazu
Domyślnie $D_2=20$.

Należy zauważyć, że obszar lustra szkła przesłonięty przez osad jest zwykle znacznie mniejszy niż wydawałoby się na podstawie rzutu perspektywicznego, ponieważ osad gromadzi się zwykle na części obiektywu przesłaniającej bliżej widoczne fragmenty lustra. Przykładowo w rzucie perspektywicznym z rys. 11a osad przesłania 13% powierzchni lustra szkła, podczas gdy na widoku z góry przedstawionym na rys. 11b pokrywa jedynie 2% powierzchni lustra.



Rys. 11. Wyniki działania algorytmu detekcji osadu z rys. 10
Fig. 11. The results of sediment detection algorithm applied to Fig. 10

6. Wnioski

W artykule zaproponowano metodę automatycznej oceny ilości i rozmieszczenia surowca na powierzchni roztopionego szkła w piecu szklarskim. Przedstawiono także propozycje wskaźników charakteryzujących to rozmieszczenie oraz algorytm wykrywania osadu gromadzącego się na obiektywie kamery na skutek działania oparów szkła.

Testy wykonane na obrazach z trzech hut szkła (Warta Glass Jedlice SA, Huta Szkła „Orzesze” oraz Stolze Częstochowa Sp. z o.o.) wskazują, że metoda może być z powodzeniem stosowana do automatyzacji sterowania płomieniem i pracą zasypników.

Znaczna część badań była finansowana w ramach projektu „Wiedza i praktyka – klucz do sukcesu w biznesie” realizowanego przez Małopolską Agencję Rozwoju Regionalnego. Projekt był współfinansowany przez UE w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

Autorzy pragną podziękować pracownikom firmy Techglass za cenne wskazówki oraz za pomoc w uzyskaniu obrazów testowych. Dziękujemy także zarządom hut szkła: Warta Glass Jedlice SA, Huta Szkła „Orzesze” oraz Stolze Częstochowa Sp. z o.o. za umożliwienie dostępu do instalacji w celu przeprowadzenia niezbędnych eksperymentów oraz dr. inż. Marcinowi Nowakowi, pracującemu obecnie nad wdrożeniem systemu przedstawionego w niniejszym artykule.

7. Literatura

- [1] Nishu and Agrawal S.: Glass Defect Detection Techniques using Digital Image Processing A Review. IP Multimedia Communications (1):65-67, October 2011.
- [2] Ross C.P., Tincher G.L.: Glass melting technology: A technical and economic assessment. Glass Manufacturing Industry Council, U.S. Department of Energy Industrial Technologies Program, October 2004.
- [3] Hartley R., Zisserman A.: Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2003.
- [4] Russ J.C.: The Image Processing Handbook. CRC Press 2011.
- [5] Stapor K.: Automatyczna klasyfikacja obiektów. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2005.