

doi:10.15199/48.2015.03.38

## Algorytm śledzenia spoiny spawalniczej w zastosowaniu do sterowania oscylatorem liniowym w wózku spawalniczym

**Streszczenie.** Poniższy artykuł prezentuje próbę wyznaczenia oraz praktycznej weryfikacji algorytmu bezkontaktowego śledzenia spoiny spawalniczej na podstawie obrazu pochodzącego z liniowej matrycy CCD. W ramach opracowania przedstawiono dotychczasowy poziom wiedzy, a dokładniej rozwiązań o charakterze praktycznym w tym zakresie oraz zaproponowano skuteczniejszą metodę opartą na analizie obrazu. Zaprezentowano sposób działania algorytmu oraz zweryfikowano jego poprawność detekcji na drodze symulacyjnej na podstawie rzeczywistych fotografii szczelin oraz spoin.

**Abstract.** The paper deals with an attempt of derivation and practical verification of a contactless weld tracking algorithm, basing on an image coming from a linear CCD sensor. In the framework of a study current level of knowledge is presented, as well as the practical solutions, moreover more efficient and precise method based on an image analysis is introduced. A principle of operation of the algorithm is presented, its correctness of detection is also done in a simulation way basing on a real digital images of welds and gaps. The paper is summarized with conclusions and further research directions. **An algorithm for contactless weld tracking basing on an image coming from a linear CCD sensor**

**Słowa kluczowe:** spoina spawalnicza, śledzenie, analiza obrazu

**Keywords:** weld, tracking, image analysis

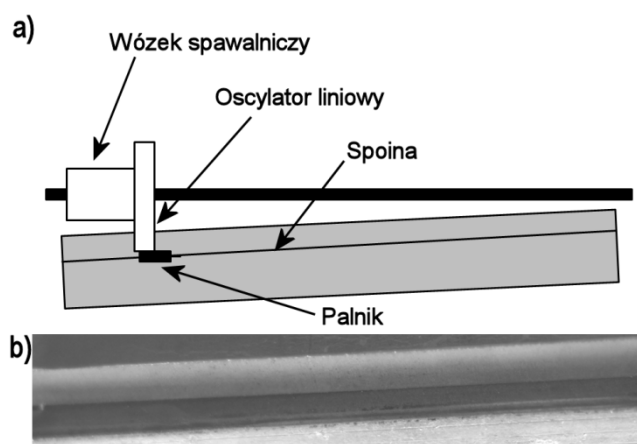
### Wstęp

Ciągły rozwój technologii stawia przed nowoczesnymi systemami sterowania coraz to wyższe wymagania dotyczące precyzji, niezawodności oraz prostoty obsługi. Takie trendy również spotyka się w przemyśle ciężkim, a dokładniej w spawalnictwie [1]. Przy spawaniu dużych konstrukcji, w trudnych warunkach, ludzi zastępuje się maszynami w postaci: portali spawalniczych, słupowysięgników, czy też wózków spawalniczych. Jednak, czy można zastąpić doświadczonego spawacza wózkiem, czy też portalem, który realizuje konkretny program? Okazuje się, że zagadnienie nie jest zupełnie takie proste jakby się to mogło wydawać, zwłaszcza, gdy mamy do czynienia z trudnymi, w sensie technologicznym, obiektami, które należy poddać obróbce spawalniczej. Niniejszy artykuł będzie stanowił próbę rozwiązania problemu śledzenia ukosowanych blach lub istniejącej spoiny spawalniczej bez użycia mechanicznych narzędzi pomiarowych, których zastosowanie w szczególnych przypadkach jest trudne lub staje się wręcz niemożliwe. Zostanie opisana optyczna metoda śledzenia spoiny za pomocą matrycy CCD z użyciem zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów. Zaproponowany algorytm śledzenia spoiny zostanie zweryfikowany na podstawie rzeczywistych fotografii spawów oraz ukosowanych blach.

### Sformułowanie problemu

Sformułowanie zagadnienia do rozwiązania wymaga zapoznania się, choćby w minimalnym stopniu, z technologią spawalniczą [1, 2, 3], a dokładniej stosowanymi obecnie rozwiązaniami technicznymi. W niniejszym opracowaniu skupimy się jedynie na wykorzystaniu torowego wózka spawalniczego, gdyż jest on chętnie stosowanym narzędziem z uwagi na możliwość spawania dużych konstrukcji przy stosunkowo niskiej cenie zakupu, w porównaniu do portali spawalniczych.

Wózek spawalniczy umieszcza się na specjalnie dedykowanym torowisku ułożonym równolegle do spawanej konstrukcji. Do ruchomego ramienia wózka przymocowuje się palnik. Omawiany system jest wyposażony w oscylator liniowy, co umożliwi ruch palnika w kierunku prostopadłym do kierunku jazdy. Oprócz funkcji oscylacji palnika wokół linii łączenia blach istnieje konieczność jej śledzenia z uwagi na nierównoległość pomiędzy torowiskiem, a spawanym elementem [2]. Schemat stanowiska do spawania ukosowanych blach wraz z przykładową fotografią ich fragmentu przedstawiono na rysunku 1.



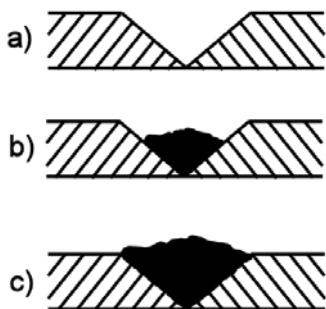
Rys. 1. a) schemat stanowiska do spawania ukosowanych blach, b) zdjęcie styku dwóch blach.

Na powyższym rysunku celowo uwidoczono dużą nierównoległość blachy i torowiska. W rzeczywistości jest ona o wiele mniejsza, z uwagi na maksymalny skok mechaniczny oscylatora wynoszący kilkanaście centymetrów. Nie zmienia to jednak faktu, iż nawet przy małych dyslokacjach należy korygować położenie palnika, aby uzyskać poprawną spoinę.

Obecnie do śledzenia ukosowanych blach [3] stosuje się dedykowane manipulatory, których końcówkę śledzącą umieszcza się we wyżłobieniu na styku dwóch ukosowanych blach. Układ automatyki zaimplementowany w wózku spawalniczym ma za zadanie korektę położenia oscylatora tak, aby pozycja manipulatora była stała. Rozwiązanie to cieszy się dużym powodzeniem z uwagi na prostotę stosowania, jednak nie jest pozbawione wad.

Podstawową wadą omawianego rozwiązania jest możliwość wypadnięcia manipulatora z wyżłobienia. Przyczyn takiej sytuacji może być kilka. Najczęściej następuje to wskutek niedopasowania gabarytów końcówki manipulatora do wymiarów mechanicznych wyżłobienia. Drugą przyczyną jest konieczność stosowania na długich odcinkach krótkich spawów (wykonanych ręcznie), których celem jest utrzymanie konstrukcji i ochrona przed przekosem elementów. Manipulator napotykać na fragment spoiny unosi się i nawet jeśli nie wypadnie z wyżłobienia, w momencie przejścia na jego wyjściu pojawiają się niemiernodajne wyniki dotyczące położenia

szczeliny. Powyżej przedstawione problemy są już dobrze znane technologom i istnieją metody ich przeciwdziałaniu [2, 3]. Istnieje jednak sytuacja, w której mechaniczny układ śledzący nie będzie w stanie poprawnie wyznaczyć położenia szczeliny. W szczególnych przypadkach istnieje konieczność spawania wielokrotnego (wielościęgowego) [2] wzdłuż tej samej szczeliny. Przebieg takiego procesu przedstawiono na rysunku 2.

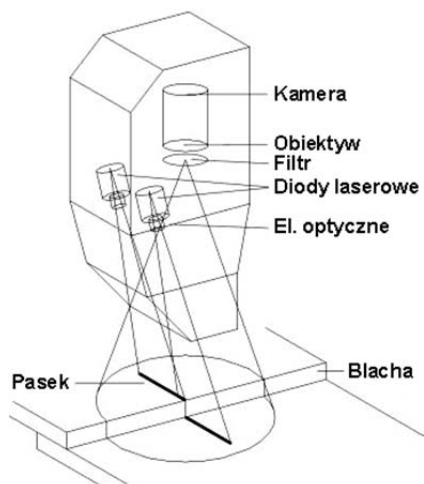


Rys.2. Schemat obrazujący przekrój blach przy spawaniu wielokrotnym; a) styk blach ukosowanych, b) widok spawu po pierwszej jeździe, c) widok spawu kilkuwarstwowego.

O ile w przypadku przedstawionym na rysunku 2a, czy też 2b można wyobrazić sobie możliwość śledzenia szczeliny (lub spoiny) za pomocą manipulatora, to po wykonaniu kolejnej warstwy śledzenie tą metodą staje się niemożliwe.

### Optyczne metody śledzenia spoiny

Przedstawiony powyżej problem jest przedmiotem badań przedsiębiorstw zajmujących się automatyką spawalniczą, jednak oprócz kart katalogowych nie można na ten temat uzyskać żadnych szczegółowych informacji. Większość proponowanych urządzeń jest wyposażonych w czujniki mechaniczne. Firma Jetline Engineering posiada w swojej ofercie urządzenie do śledzenia spoin (tzw. tracker). Jego schemat poglądowy pochodzący z karty katalogowej przedstawiono na rysunku 3.



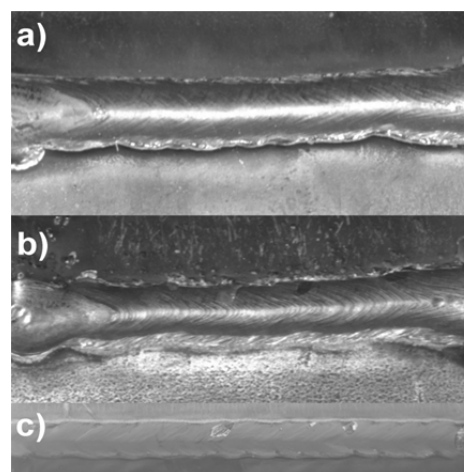
Rys.3. Urządzenie do śledzenia łączeń firmy Jetline Engineering [4].

Zgodnie z opisem urządzenia [4], wykorzystuje ono kamerę CCD wraz z dwoma diodami laserowymi, które rzucają na spawany materiał dwie linie. Następnie korzystając z metody triangulacji wyznaczane jest położenie usku. Niestety producent nie zamieszcza informacji na temat śledzenia już istniejących spoin. Można zatem wnioskować, że system może nie być w stanie analizować obrazów, w których nie występują wyraźne uskoki.

Obecnie jest znanych wiele metod śledzenia linii (line followers), które są wykorzystywane głównie w robotyce [10], a także oprogramowaniu CAD [11]. Godnym wspomnienia są również algorytmy typu zig-zag [12], które z powodzeniem są stosowane przy przetwarzaniu obrazów w powiązaniu z kompresją stratną. Złożoność obliczeniowa ostatnich z wspomnianych powyżej wymaga stosowania jednostek obliczeniowych o dużej wydajności oraz dysponującymi znacznymi zasobami systemowymi, co ogranicza możliwość zastosowania rozwiązań jednoukładowych.

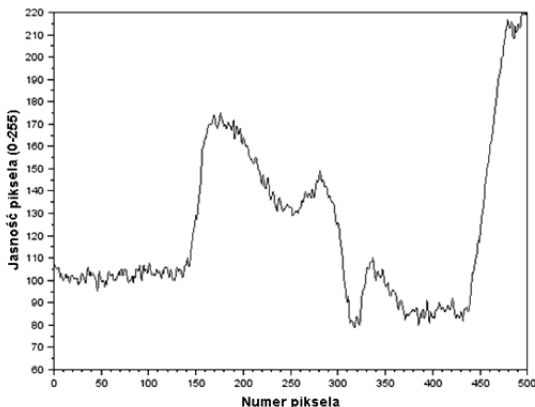
Jedną z ciekawszych metod, jaką można znaleźć w literaturze fachowej, dotyczącej problemów spawalniczych została opracowana w pozycji [9]. Została tam zaproponowany algorytm śledzenie linii spawu rury wykonywany w technologii TIG. Jako dane wejściowe przyjęto obraz z kamery przemysłowej. Algorytm składa się z procedur detekcji krawędzi, konwersji obrazu na mapę 1-bitową, segmentacji obszaru docelowego, lokalizacji palnika oraz linii spawu. Detekcję krawędzi przeprowadzono za pomocą operatora Prewitt'a [9]. Bitmapę monochromatyczną uzyskano dzięki metodzie największej wariancji międzyklasowej [13]. Następnie następowala segmentacja obrazu na podstawie regionów wzrostu, aby w ten sposób wykryć palnik, jeziorko spawalnicze oraz linię spawu. Na końcu wyliczano różnicę w położeniu palnika oraz linii, aby dzięki tej informacji sterować napędem robota przemysłowego. Według autora artykułu cała procedura obliczeniowa trwa krócej niż 80 ms [9], jednak nie podaje on jakim sprzętem komputerowym dysponował. Pomimo, iż skuteczność powyższej metody została potwierdzona, również jako systemu czasu rzeczywistego, jej zastosowanie wymaga wykorzystania sprzętu komputerowego o znacznej wydajności obliczeniowej, co jest sprzeczne z założeniami niniejszego opracowania. W dodatku nie ma pewności jak zachowywałby się algorytm przy detekcji innych rodzajów obiektów, czyli szczelin oraz spoin. Dlatego zdecydowano się na opracowanie własnego algorytmu, którego wymagania numeryczne będą na tyle niskie, aby można je było wykonać za pomocą systemu jednoukładowego.

W niniejszym artykule zostanie zaproponowana odmienna od opisanych powyżej metod śledzenia spoin i łączeń. Będzie się ona opierała na obserwacji spoiny lub łączenia za pomocą liniowej matrycy CCD i analizie obrazu. Sygnał z czujnika zostanie potraktowany jako przebieg wejściowy układu przetwarzania sygnału, gdzie zamiast klasycznej dziedziny czasu będziemy mieli do czynienia z numerem piksela.



Rys.4. Fotografie spoin (a, b) oraz szczeliny spawalniczej (c).

W celach badawczych celowo nie konstruowano układu optycznego oraz nie używano dedykowanej liniowej matrycy. Na etapie studialnym postanowiono użyć fotografii spawów wykonanych lustrzanym aparatem cyfrowym. Do tego celu użyto aparatu marki Nikon D80 z obiektywem zmienno-ogniskowym 18-135mm oraz dedykowaną lampą błyskową SB-800. Zaoszczędziło to wiele czasu, który należałoby poświęcić na konstrukcję własnego układu z liniowym przetwornikiem oraz obiektywem. Fotografie zostały zapisane w formacie RAW, a następnie przekonwertowane do BMP, odczytane, przeskalowane do wymiarów popularnej matrycy liniowej i podzielone na linie za pomocą oprogramowania SciLab [5]. Przykładowy materiał badawczy uzyskany opisaną powyżej metodą przedstawiono na rysunku 4.

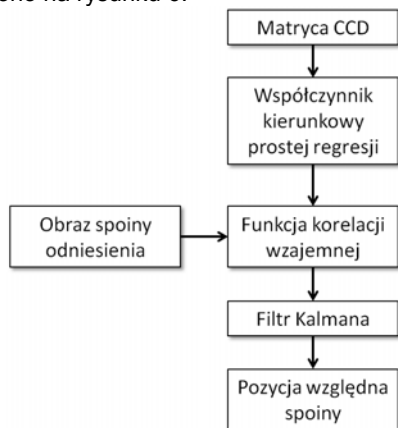


Rys.5. Przebieg jasności piksela w funkcji jego numeru w przypadku szczeliny spawalniczej (rysunek 4c, linia pionowa).

Dysponując bogatą bazą danych spoin oraz szczelin można przystąpić do opracowania algorytmu detekcji oraz estymacji ich pozycji względem umownego punktu odniesienia. Na rysunku 5. przedstawiono poziom jasności piksela (0-255) w funkcji jego numeru dla pojedynczego przekroju (linii pionowej zgodnie z nomenklaturą przyjętą na rysunku 4c).

### Algorytm detekcji i wyznaczania pozycji spoiny spawalniczej

W celu wykrycia położenia spoiny lub szczeliny posłużymy się metodą korelacyjną powiązaną z obliczaniem pierwszej pochodnej przebiegu. Za estymację pozycji punktu, w którym będzie znajdował się palnik, będzie odpowiedzialny filtr Kalmana drugiego rzędu. Schemat blokowy algorytmu przetwarzania i estymacji przedstawiono na rysunku 6.



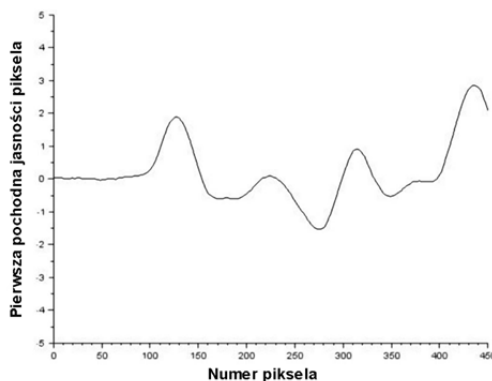
Rys.6. Algorytm detekcji i estymacji położenia spoiny spawalniczej na podstawie obrazu pochodzącego z liniowej matrycy CCD.

Obraz pochodzący z matrycy CCD, a w opisywanym przypadku pojedynczej kolumny fotografii cyfrowej (rysunek 4), jest poddawany wstępnemu przetwarzaniu przez filtr oparty na metodzie najmniejszych kwadratów [7], a precyzyjniej dokonywane są obliczenia współczynnika nachylenia prostej regresji zgodnie z zależnością (1).

$$(1) \quad a = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

gdzie:  $n$  – liczba punktów,  $x_i$  – numer piksela,  $y_i$  – stopień szarości piksela.

Wyznaczenie współczynnika nachylenia ma na celu obliczenie estymaty pierwszej pochodnej w warunkach szumu pomiarowego (rysunek 5). Pierwsza pochodna przebiegu ma na celu detekcję krawędzi [9] i zmian w strukturze powierzchni. Obliczanie definicyjne pochodnej uwydatniłoby jedynie zakłócenia szumowe i uniemożliwiłoby dalsze przetwarzanie sygnału z wiarygodnym rezultatem. Zastosowanie odpowiednio szerokiego okna estymacji ( $n = 50$  px) pozwoliło na uzyskanie przebiegu pozbawionego szumu, jednocześnie będącego estymatą (rysunek 7) pierwszej pochodnej sygnału pierwotnego (rysunek 5).



Rys.7. Przebieg pierwszej pochodnej poziomu jasności piksela w funkcji jego położenia (numeru).

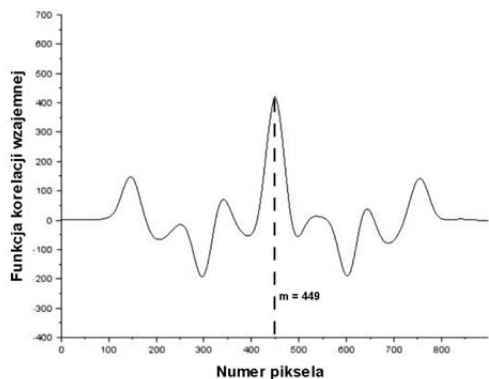
Kolejnym krokiem, mającym na celu estymację położenia spoiny jest obliczenie funkcji korelacji wzajemnej (2) [5] sygnału pochodzącego z aktualnie skanowanej linii z sygnałem odniesienia.

$$(2) \quad C_k(x, y) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n-k} x_{i+k} \cdot y_i^*, & k \geq 0 \\ C_{-k}^*, & k \leq -1 \end{cases}$$

gdzie:  $k$  – przesunięcie pomiędzy przebiegami.

Jako wyjście bloku obliczenia korelacji wzajemnej (rysunek 6) jest traktowana pozycja (numer piksela) maksimum funkcji korelacji. Wartość ta jest doprowadzana na wejście filtru Kalmana. Jak pokazano w [11] zastosowanie tego rodzaju filtracji jest bardzo skuteczne przy śledzeniu linii. Przykładowy przebieg funkcji korelacji wzajemnej przedstawiono na rysunku 8.

Jako obraz spoiny odniesienia przyjęto uśrednionych 50 kolejnych linii pionowych obrazu podczas wstępnej jazdy wózka spawalniczego. Uzyskany obraz jest bardzo zbliżony do prezentowanego na rysunku 7.



Rys.8. Przebieg funkcji korelacji wzajemnej skanowanej linii obrazu szczeliny.

Filtracja Kalmana [6] ma na celu estymację położenia środka spoiny przy jednoczesnym wyłumieniu zakłóceń mogących powstać podczas przetwarzania sygnału w poprzednich krokach algorytmu. Zależność, dzięki której jest dokonywana estymacja została określona równaniami (3-5).

$$(3) \quad \hat{x}(k+1/k+1) = \hat{x}(k+1/k) + K(k+1)z(k+1)$$

$$(4) \quad \hat{x}(k+1/k) = \Phi(k+1/k)\hat{x}(k/k)$$

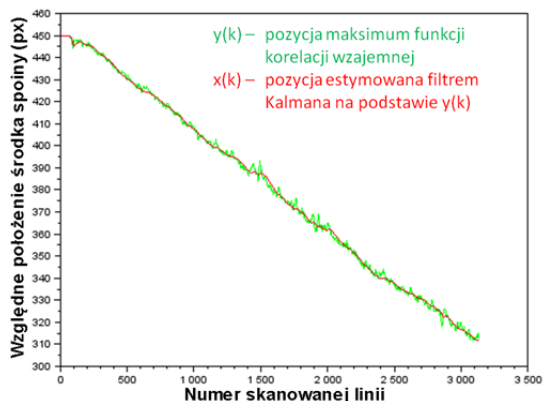
$$(5) \quad z(k+1) = y(k+1) - H(k+1)\hat{x}(k+1/k)$$

gdzie:  $\hat{x}(k/k)$  – estymata procesu na  $k$ -tym kroku,  $\Phi(k+1/k)$  – macierz przejścia,  $K(k+1)$  – macierz wzmocnień Kalmana,  $H(k+1)$  – macierz obserwacji,  $z(k+1)$  – proces innowacyjny.

Wiadomym jest, że filtracja Kalmana wymaga znajomości modelu obiektu dla którego jest wykonywana estymacja zmiennych stanu [6]. Na podstawie wielu obserwacji przebiegu maksimum funkcji korelacji wzajemnej względem położenia wózka spawalniczego (numera kolejnej skanowanej linii) określono, iż najlepszym modelem opisującym przebieg jej położenia jest (6).

$$(6) \quad \Phi(k+1/k) = \begin{bmatrix} I & T \\ 0 & I \end{bmatrix}$$

gdzie:  $T$  – okres próbkowania związany z prędkością jazdy wózka



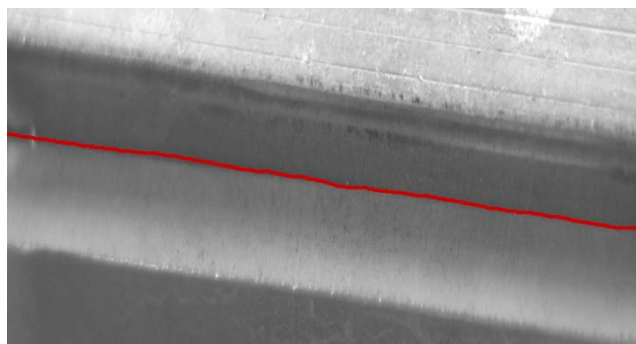
Rys.9. Przebieg funkcji korelacji wzajemnej wraz z estymacją za pomocą filtru Kalmana w przypadku szczeliny spawalniczej.

Zależność (6) zwana również pod nazwą macierzy Newtona [6] pozwala śledzić pozycję obiektów, których położenie jest liniowo zależne od czasu. W opisywanym przypadku, kiedy to wózek porusza się ze stałą prędkością, położenie środka spoiny w przypadku przemieszczenia w funkcji odległości, będzie również liniowo zmieniać się w

funkcji czasu. Zastosowanie filtracji Kalmana jest bardzo korzystne ponieważ w przypadku filtru 2 rzędu można uzyskać dużą poprawę stosunku sygnału do szumu przy jednoczesnym zachowaniu małej złożoności obliczeniowej [14]. Przebieg pozycji maksimum funkcji korelacji wzajemnej (rysunek 8) wraz z estymatą przedstawiono na rysunku 9.

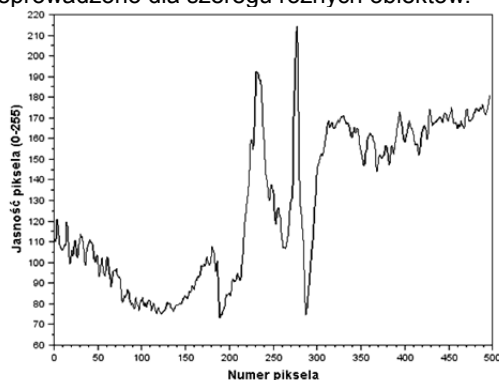
### Weryfikacja algorytmu śledzenia środka spoiny na podstawie wykonanych fotografii

Ostatnim krokiem mającym na celu potwierdzenie poprawności działania algorytmu jest jego weryfikacja na podstawie wykonanych zdjęć różnorodnych spawów oraz szczelin. Proces weryfikacji będzie polegał na naniesieniu (z zachowaniem skali) przebiegu estymaty położenia środka spoiny na wykonaną fotografię. Fotografie szczeliny (rysunek 4c) z naniesioną estymatą (rysunek 9) przedstawiono na rysunku 10.

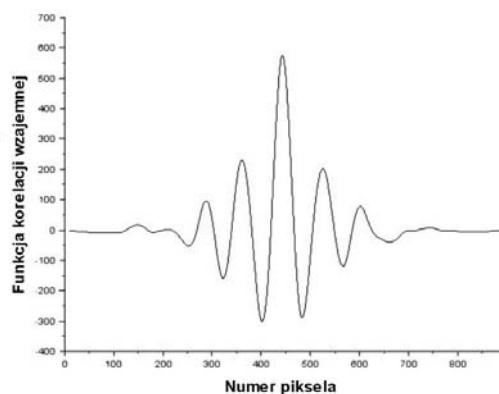


Rys.10. Fotografia szczeliny spawalniczej wraz z naniesioną linią środka szczeliny wyznaczoną przez algorytm.

W celach weryfikacyjnych proces obliczeniowy (rysunek 6) przeprowadzono dla szeregu różnych obiektów.



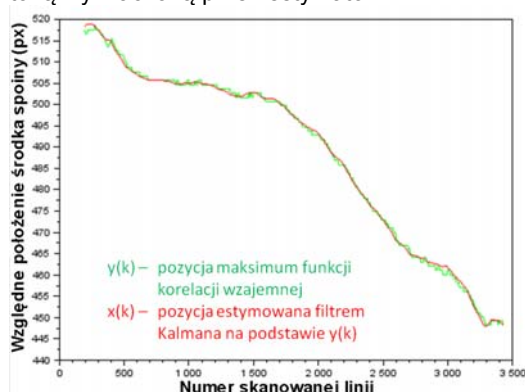
Rys.11. Przebieg jasności piksela w funkcji jego numeru w przypadku fragmentu spoiny spawalniczej (rysunek 4a, linia pionowa).



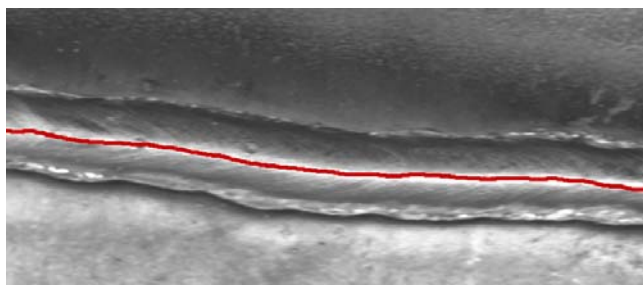
Rys.12. Przebieg funkcji korelacji wzajemnej skanowanej linii obrazu spoiny.

Na rysunku 11 i 12 zamieszczono analogicznie jak w poprzednim punkcie przebiegi skanowanej linii oraz funkcji korelacji wzajemnej w przypadku spoiny spawalniczej.

Na rysunku 13 i 14 zaprezentowano rezultaty estymacji położenia środka spoiny. Przy czym na rysunku 14 przedstawiono fotografię spoiny wraz z naniesioną trajektorią wyznaczoną przez estymator.



Rys.13. Przebieg funkcji korelacji wzajemnej wraz z estymacją za pomocą filtru Kalmana w przypadku spoiny spawalniczej.



Rys.14. Fotografia spoiny spawalniczej wraz z naniesioną linią środka spoiny wyznaczoną przez algorytm.

Proces nanoszenia trajektorii na fotografię wymaga kilku słów wyjaśnienia. Skanowanie obrazu było rozpoczynane od prawej strony, przez co fotografie wymagały wykonania procesu odbicia lustrzanego przed naniesieniem linii. Wykres wykonany przez program SciLab był odpowiednio przeskalowywany tak, aby jego wymiary były identyczne z fotografią z uwzględnieniem rozdzielczości matrycy CCD.

## Wnioski

Celem niniejszego artykułu było opracowanie algorytmu wyznaczania środka spoiny spawalniczej na podstawie analizy obrazu pochodzącego z liniowej matrycy CCD. W wyniku przeprowadzonych symulacji stwierdzono poprawne działanie estymatora zarówno w przypadku szczelin, jak i spoin spawalniczych. Czyni to algorytm bardzo przydatnym zwłaszcza w przypadku śledzenia spoin, gdzie zastosowanie mechanicznego manipulatora jest niemożliwe. Dalsze prace powinny być prowadzone w

kierunku konstrukcji układu optycznego oraz elektronicznego, tak, aby możliwa była praktyczna weryfikacja zaproponowanego algorytmu. Możliwa wtedy będzie ocena jakościowa algorytmu poprzez porównanie jego pracy z tradycyjnymi metodami śledzenia szczelin. Praktyczny układ winien być dodatkowo odporny na rozbłyski towarzyszące spawaniu, co powinno zostać wyeliminowane poprzez specjalne algorytmy [8].

Artykuł powstał w ramach realizacji umowy stypendialnej nr WIEM/POKL/MD/VIII/2013/3 oraz pracy statutowej nr S/WE/1/10.

## LITERATURA

- [1] Ranatowski E., Obliczeniowa mechanika spawania, Bydgoszcz 2009.
- [2] Mizerski J., Spawanie w osłonie gazów metodami MAG I MIG, Warszawa, 2013.
- [3] Sosiński A., Spawanie metodą MIG nie tylko dla początkujących, Warszawa, 2013.
- [4] Karta katalogowa firmy Jetline Engineering, dostęp: 09.2014, (<http://pdf.directindustry.com/pdf/jet-line-engineering/jst-optical-laser-seam-tracker/27577-54403.html>).
- [5] Brozi A., Scilab w przykładach, Poznań, 2007.
- [6] Mohinder S. G., Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB, Wiley-IEEE Press; 4 edition, 2014.
- [7] Gelb A., Applied Optimal Estimation, The MIT Press, 1974.
- [8] J. Grishin, D. Janczak, A robust fixed-lag smoothing algorithm for dynamic systems with correlated sensor malfunctions, Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci. - Vol. 62, nr 3 (2014), s. 517-523
- [9] W. Yigang, C. Jialin, F. Shengli, A Quick Algorithm To Track Welding Line Based On Computer Vision, Second International Symposium on Computational Intelligence and Design, 2009, p. 306-209
- [10] L. R. Munoz, M. G. Villanueva, C. A. L. Alvarez, An Extended Line Tracking Algorithm, IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), 2013
- [11] A. Bartolo, K. P. Camilleri, S. G. Fabri, J. C. Borg, Line Tracking Algorithm for Scribbled Drawings, 3rd International Symposium on Communications Control and Signal Processing, 2008.
- [12] J. Ding, W. Wei, H. Chen, Context-Based Adaptive Zigzag Scanning for Image Coding, Visual Communications and Image Processing, 2011.
- [13] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histogram," IEEE Trans. Systems Man Cybernetics, vol. 8, pp. 62-66, 1979.
- [14] A. Holiczer, „Cyfrowe metody filtracji nieliniowej i ich aplikacje Techniczne w aparaturze do pomiarów wielkości fizykochemicznych”, Rozprawa doktorska, Białystok 2010.

**Autorzy:** dr inż. Andrzej Holiczer, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, e-mail: a.holiczer@pb.edu.pl.