

---

# System wizyjny sterujący zrobotyzowanym stanowiskiem spawania wymienników ciepła

Piotr Fiertek<sup>1</sup>

---

## Streszczenie

Systemy wizyjne są coraz częściej stosowane w różnego rodzaju zrobotyzowanych stanowiskach produkcyjnych do sterowania, nadzorowania oraz kontroli pracy robotów spawających. Niniejsza praca opisuje implementację systemu wizyjnego powstałego w firmie AIC w Gdyni, którego zadaniem jest rozpoznanie spawanego obiektu oraz, na podstawie otrzymanej informacji wizyjnej, wygenerowanie odpowiedniej trajektorii palnika robota. Przedstawiony system wizyjny zwiększa elastyczność zrobotyzowanego stanowiska spawalniczego przez wyeliminowanie konieczności stosowania skomplikowanego urządzenia pozycjonującego spawane elementy oraz skraca czas przebrojenia stanowiska.

## 1. WSTĘP

Wraz ze zwiększaniem się mocy obliczeniowej współczesnych komputerów, systemy wizyjne (ang. vision machine) coraz częściej wspomagają pracę różnego rodzaju zrobotyzowanych stanowisk produkcyjnych.

W przypadku robotów spawających, zadaniem systemów wizyjnych jest najczęściej kontrola jakości wykonywanych spawów oraz nadzorowanie procesu spawania w celu utrzymania odpowiednich parametrów spoiny [4]. Odpowiednie systemy wizyjne umożliwiają również lokalizację położenia rowka spawalniczego, dzięki czemu wykorzystywane są także do sterowania położeniem palnika spawarki [4,6]. Większość tego typu systemów wykorzystuje oświetlacz laserowy, którego odpowiednia lokalizacja względem osi widzenia kamery umożliwia wyznaczenie geometrii rowka przed lub spoiny po spawaniu [1,7].

Specyfika postawionego zadania odróżnia opisywany w tej pracy system wizyjny od typowych rozwiązań stosowanych w zrobotyzowanych stanowiskach spawalniczych. Powstał on na zamówienie firmy AIC z Gdyni, zajmującej się produkcją szerokiej gamy wymienników ciepła. Zadaniem systemu jest sterowanie zrobotyzowanym stanowiskiem produkcyjnym (robot IRB 1400 firmy ABB), realizującym spawanie kilkudziesięciu rurek do okrągłej lub prostokątnej płyty z wyciętymi za pomocą lasera otworami. Odpowiednio przycięte rurki są ręcznie

---

<sup>1</sup>Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Systemów Automatyki, ul. Gdańska 4/86, 84-230 Rumia, tel. (058) 719 78 07, pfiertek@wp.pl

wkładane do otworów i wstępnie przyspawane (rys. 1). Tak przygotowany element wędruje na zrobotyzowane stanowisko spawalnicze, gdzie jest spawany metodą TIG. Kształt, rozmiar i liczba otworów w płycie znacząco różnią się w zależności od aktualnie spawanego modelu wymiennika ciepła.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie struktury systemu wizyjnego sterującego zrobotyzowanym stanowiskiem do spawania wymienników ciepła, dyskusja pojawiających się w takim systemie problemów oraz zaproponowanie ich rozwiązania.

## 2. OPIS SYSTEMU

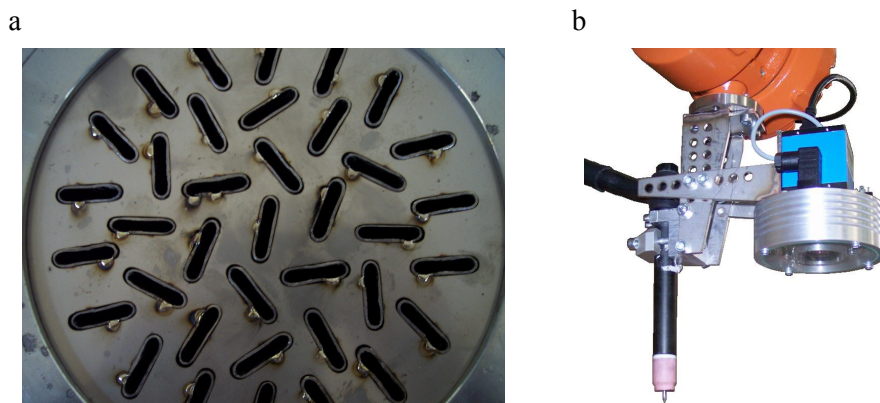
### 2.1. Opis problemu i koncepcja rozwiązania

Powstanie systemu wizyjnego wynikało z potrzeby rozwiązania problemu, polegającego na przesuwaniu się otworów w spawanej płycie, w wyniku termicznego rozszerzania się metalu pod wpływem działania wysokiej temperatury, pojawiającej się podczas spawania. Gdy trajektoria robota jest ustalona na sztywno, na podstawie położenia otworów 'zimnej' płyty, robot, po wykonaniu spawania dla kilku otworów, nie trafia w kolejne z wymaganą dokładnością. Problem próbowano rozwiązać budując kosztowne urządzenie do precyzyjnego pozycjonowania płyty wymiennika ciepła, w którym spawana płyta trzymana jest przez ściśle przylegającą, grubą, stalową obręcz. Zastosowane rozwiązanie nie przynosi jednak zadowalających efektów oraz dodatkowo posiada szereg wad:

- konieczność budowy kosztownego i niewygodnego w eksploatacji urządzenia do precyzyjnego pozycjonowania spawanych płyt dla każdego typu wymiennika ciepła,
- kosztowna integracja zrobotyzowanego stanowiska z automatyczną linią produkcyjną: detale muszą być zdejmowane z linii, umieszczane w specjalnym urządzeniu, a po zakończeniu spawania z powrotem wrócić na linię produkcyjną,
- długi czas przezbrajania produkcji: dla każdego typu wymiennika ciepła należy ręcznie wprowadzić trajektorię robota, a następnie sprawdzić, czy przesunięcie otworów mieści się w wymaganym zakresie.

W celu rozwiązania powstałego problemu postanowiono wyposażyć robota w system wizyjny pozwalający mu automatycznie rozpoznać położenie spawanych otworów oraz wygenerować wymaganą trajektorię palnika robota. Działanie systemu jest dwuetapowe. Pierwszy etap składa się z rozpoznania globalnego, polegającego na wykonaniu serii zdjęć nad spawanym wymiennikiem w celu wyznaczenia położenia wszystkich otworów. Etap drugi składa się z właściwego spawania otworów. Dla każdego, znalezionego w etapie pierwszym, otworu wykonuje się zdjęcie, a następnie na otrzymanym obrazie wyznacza się punkty należące do jego krawędzi. Znalezione punkty porównywane są z wzorcem otworu, na podstawie którego generowana jest trajektoria palnika. Po wyznaczeniu

odpowiedniej trajektorii palnika i przekształceniu współrzędnych punktów trajektorii na układ odniesienia robota, wykonywane jest spawanie otworu.



Rys. 1. System wizyjny wyznaczający położenie spawanych otworów  
a – zdjęcie spawanej płyty, b – mocowanie kamery, oświetlacza oraz palnika.

## 2.2. Sprzęt

Wysoka temperatura występująca podczas spawania stanowi duże zagrożenie dla kamery i obiektywu. Jednym z rozwiązań, mających na celu zabezpieczenie kamery przed wpływem wysokiej temperatury, jest umieszczenie jej w dużej odległości od palnika. Rozwiązanie takie ogranicza jednak swobodę ruchu robota. W opisywanym systemie, oś kamery umieszczona jest równoległe do osi palnika, w odległości zapewniającej minimalne ograniczenie możliwości ruchowych robota (rys. 1). Dzięki temu rozwiązaniu, kamera nie patrzy bezpośrednio na łuk spawalniczy. Dodatkowo zastosowano oświetlacz diodowy własnej konstrukcji, zapewniający odpowiednie oświetlenie sceny oraz zabezpieczający obiektyw i kamerę przed promieniowaniem cieplnym oraz oparami powstającymi podczas spawania. W celu ograniczenia pochłaniania ciepła przez czujnik CCD kamery w postaci promieniowania podczerwonego, zastosowano filtr odcinający podczerwone widmo promieniowania elektromagnetycznego.

W skład systemu wchodzi kamera DMK 31BF03 z interfejsem FireWire, generująca obraz o rozdzielczości 1024x768 pikseli i 256 odcieniach szarości. Kamera posiada dodatkowe wejścia i wyjścia cyfrowe do zdalnego wyzwalania migawki oraz sterowania zewnętrznym oświetlaczem. Kamera wyposażona jest w obiektyw PENTAX H1214-M o ogniskowej 12mm. Jest to obiektyw o ręcznie regulowanej ostrości i przesłonie, co znacząco wpływa na pracę systemu wizyjnego.

Do przetwarzania obrazu służy komputer PC z procesorem Pentium IV 3,2GHz z 1GB pamięci RAM. Komunikacja z robotem odbywa się za pomocą łącza szeregowego RS232 z prędkością transmisji 38400bit/s.

Oprogramowanie do obróbki obrazu zostało stworzone w środowisku Builder 6.0 Professional. Opracowano również własny protokół komunikacji między

robotem a komputerem PC, opisujący postać przesyłanych ramek danych, obsługę potwierdzenia odbioru ramki, opis struktury bloku danych przesyłanych w ramach, opis poleceń przesyłanych między robotem a systemem wizyjnym.

### 3. LOKALIZACJA POŁOŻENIA OTWORÓW

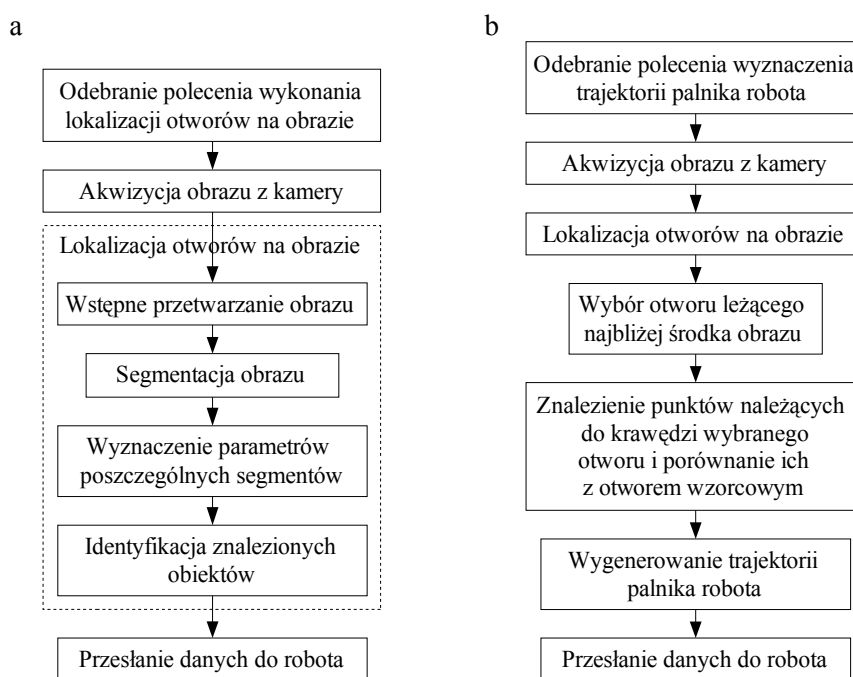
Pierwszy etap spawania wymienników ciepła stanowi wstępna lokalizacja położenia spawanych otworów. Na tym etapie prac zakładamy, że płaszczyzna płyty jest taka sama dla każdego wymiennika ciepła i jej położenie nie musi być przez robota wyznaczane. Zmienia się natomiast położenie otworów wymiennika w obszarze tej płaszczyzny.

Idea globalnej lokalizacji otworów polega na ustawieniu osi widzenia kamery prostopadle do płaszczyzny wymiennika ciepła, w odległości zapewniającej odpowiednie pole widzenia kamery. Kamera jest traktowana przez oprogramowanie robota jak dodatkowe narzędzie, którego punkt centralny (Tool Center Point – TCP) został umieszczony w ogniskowej obiektywu, a oś Z pokrywa się z osią obiektywu. Ponieważ wykorzystujemy obiektyw o stałej ogniskowej i ręcznie regulowanej ostrości, niemożliwe jest zapewnienie ostrego obrazu dla globalnego rozpoznania otworów (małe powiększenie obrazu) oraz rozpoznania lokalnego, mającego na celu wyznaczenie wymaganej trajektorii palnika robota (duże powiększenie obrazu). Na wstępnym etapie projektu rozważano zastosowanie obiektywu z elektrycznie regulowanym powiększeniem lub ostrością obrazu. Duże wymiary obiektywu, jego wysoka cena oraz stosunkowo długi czas przestrajania zdecydowały, że ostatecznie zrezygnowano z takiego rozwiązania.

W opisywanym systemie przyjęto optymalne ustawienie obiektywu dla rozpoznania lokalnego. Zakładając, że niewielkie rozmycie obrazu nie przeszkadza w globalnej lokalizacji otworów, większy obszar widzenia kamery dla rozpoznania globalnego uzyskujemy poprzez odpowiednie zwiększenie odległości kamery od spawanego obiektu. Identyfikacja położenia wszystkich otworów wymaga wykonania kilku częściowo nakładających się zdjęć spawanej płyty.

Po analizie każdego zdjęcia, współrzędne środków znalezionych otworów w znormalizowanych współrzędnych obrazu (górny lewy róg  $(-1; 1)$ , prawy dolny róg  $(1; -1)$ ) przesyłane są do robota wraz z informacją o rozmiarze otworu, jego orientacji katowej, stopniu dopasowania otworu do wzorca oraz informacją, czy dany otwór leży na brzegu obrazu, czy w jego wnętrzu. Na podstawie informacji o aktualnej orientacji przestrzennej robota (a tym samym kamery), otrzymane z systemu wizyjnego współrzędne otworów przeliczane są na dwuwymiarowy układ współrzędnych powierzchni płyty wymiennika ciepła. Po wykonaniu szeregu zdjęć, obejmujących cały obszar roboczy, uzyskane współrzędne otworów z kolejnych zdjęć są ze sobą porównywane w celu wyeliminowania powtarzających się otworów (jeden otwór zlokalizowany na dwóch zdjęciach). W celu zwiększenia niezawodności pracy systemu, otrzymane współrzędne środków otworów, porównywane są następnie z wzorcem danego wymiennika ciepła.

Rysunek 2a przedstawia schemat działania systemu wizyjnego podczas szukania i identyfikacji otworów na obrazie otrzymanym z kamery. Wstępne przetwarzanie obrazu polega na zastosowaniu szeregu kolejnych operacji na sygnale wizyjnym, mających na celu eliminację zakłóceń oraz przygotowanie obrazu do dalszej obróbki. Jako pierwszy zastosowano liniowy filtr dolnoprzepustowy, którego zadaniem jest usunięcie szumów i zakłóceń z obrazu. Następnie, w wyniku przeprowadzenia progowania obrazu, uzyskiwany jest obraz binarny, w którym czerń odpowiada znalezionym otworom, a biel powierzchni płyty. Ponieważ na tym etapie interesuje nas jedynie położenie środka otworu oraz przybliżone wartości parametrów otworu, takich jak: powierzchnia, długość brzegu obiektu, długość przekątnych, centryczność i zwartość, możemy zmniejszyć rozdzielczość obrazu binarnego w celu przyspieszenia dalszego przetwarzania danych. Na koniec wstępnego przetwarzania obrazu, w celu zwiększenia niezawodności systemu i usprawnienia pracy modułu segmentacji, stosujemy filtr medianowy oraz wykonujemy na obrazie operację otwarcia [8] (ewentualne odseparowanie połączonych ze sobą obrazów sąsiednich otworów).



**Rys. 2.** Schemat działania systemu wizyjnego  
 a – operacje wykonywane podczas lokalizacji na obrazie otworów do spawania, b – operacje wykonywane podczas testowania otworu i wyznaczania trajektorii palnika robota.

Kluczowe dla prawidłowego działania systemu wizyjnego jest właściwe wykonanie operacji progowania obrazu. W celu wyboru odpowiedniej metody, zaimplementowano szereg algorytmów automatycznego wyznaczania poziomu

progowania obrazu. Przetestowano następujące algorytmy progowania globalnego: proste zastosowanie histogramu [10], wyznaczenie progu na podstawie prostej statystyki obrazu [2], metoda Otsu [5] oraz dwa algorytmy progowania lokalnego: metoda Bernsena [9] oraz progowanie lokalne z zastosowaniem histogramu obrazu lokalnego. W przypadku globalnej lokalizacji otworów uzyskano zadowalające rezultaty dla progowania lokalnego (zmodyfikowana metoda Bernsena). Metody progowania globalnego często wykazywały zbyt wysoki poziom progowania obrazu, co powodowało, że obrazy otworów na obrazie wynikowym miały tendencję do zlewania się ze sobą.

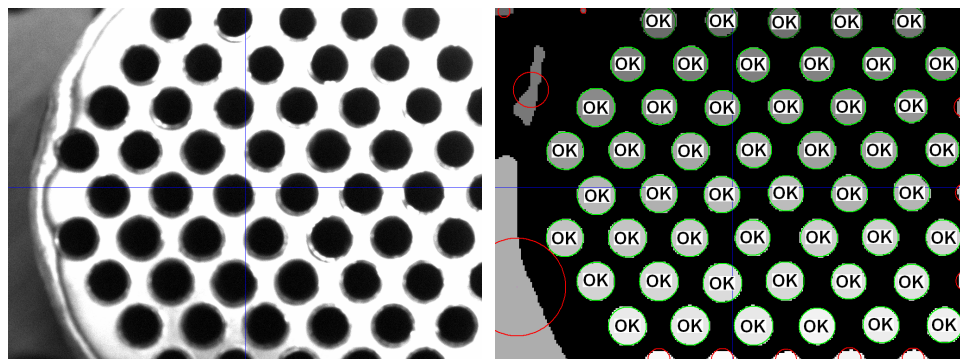
Modyfikacja metody Bernsena, pozwalająca na prawidłowe progowanie obrazu, polega na zmianie wartości współczynników wagowych we wzorze na poziom proggu lokalnego w danym podobrazie (1):

$$t(x, y) = \alpha \cdot J_L + (1 - \alpha) \cdot J_H, \quad (1)$$

gdzie  $J_L$  oraz  $J_H$  są odpowiednio najniższym i najwyższym poziomem szarości spośród wartości przyjmowanych przez piksele w kwadracie  $r \times r$ . Przyjęta wartość parametru  $\alpha$  wynosi 0,8. Progowany obraz podzielony jest na przystające podobrazy o rozmiarze 64x64 piksele. Aby uniknąć nieciągłości w obrazie wynikowym na granicach dwu różnych podobrazów, zastosowano lokalnie liniową interpolację wartości progów [3].

Kolejnym etapem przetwarzania sygnału wizyjnego jest wykonanie segmentacji obrazu binarnego (po progowaniu), mające na celu wyodrębnienie z obrazu spójnych i odseparowanych od siebie obiektów, które potencjalnie będzie można zaklasyfikować jako znalezione otwory. Wynikiem tej operacji jest obraz o tej samej rozdzielczości co obraz wejściowy, lecz o wielu poziomach szarości. Wartość zerowa piksela oznacza piksel należący do tła, wartość większa od zera jednoznacznie przypisuje dany piksel do jednego z wyodrębnionych obiektów. Dla tak utworzonego obrazu można równolegle wyznaczać momenty zerowego, pierwszego i drugiego rzędu poszczególnych obiektów. Następnie wyznaczany jest obwód oraz najmniejsza i największa długość przekątnej obiektu, przechodzącej przez jego środek. Otrzymane w ten sposób parametry bezpośrednio służą następnie do wyznaczenia wartości parametrów pośrednich, takich jak centryczność i zwartość, które są niezmiennicze względem trzech podstawowych przekształceń obrazów (obrotu, przesunięcia i zmiany skali).

Na podstawie wartości parametrów, opisujących znalezione na obrazie obiekty, dokonywana jest identyfikacja, mająca na celu odróżnienie właściwych otworów od artefaktów, będących wynikiem obecności na obrazie niejednorodnego tła lub krawędzi płyty wymiennika ciepła. Ostatnim etapem jest przeliczenie współrzędnych środków znalezionych otworów na znormalizowane współrzędne obrazu (niezależne od rozdzielczości kamery) i przesłanie ich do robota. Rysunek 3 przedstawia zdjęcie płyty z okrągłymi otworami oraz znalezione w wyniku obróbki obrazu otwory.



Rys. 3. Przykładowe zdjęcie otrzymywane na etapie wstępnego rozpoznania wymiennika ciepła, zdjęcie po prawej stronie zawiera wynik przetwarzania obrazu – znalezione otwory.

#### 4. WYZNACZENIE TRAJEKTORII PALNIKA

Po zakończeniu etapu rozpoznania wymiennika ciepła, rozpoczyna się etap drugi, polegający na spawaniu znalezionych otworów. Czynność ta składa się z dwóch etapów: rozpoznania otworu i realizacji wyznaczonej trajektorii spawania. Ponieważ wcześniej wykonana spoina może częściowo nachodzić na krawędź aktualnie analizowanego otworu (rys. 4), prawidłowe wyznaczenie krawędzi otworu oraz trajektorii palnika jest zadaniem nietrywialnym. Należy więc założyć, że algorytm wyznaczania trajektorii powinien być odpowiednio odporny na błędy wyznaczenia położenia punktów krawędzi otworu.

Rysunek 2b przedstawia schemat działania systemu wizyjnego podczas identyfikacji otworu i generowania trajektorii palnika robota. Po otrzymaniu obrazu z kamery, system w pierwszej kolejności wyszukuje wszystkie otwory znajdujące się na obrazie. Wykonywane operacje są identyczne z realizowanymi podczas wstępnego rozpoznania wymiennika ciepła. Ponieważ spawany otwór powinien znajdować się w osi widzenia kamery, w dalszej kolejności będziemy wykonywać rozpoznanie otworu leżącego najbliżej środka otrzymanego obrazu.

Następny etap polega na wyznaczeniu reprezentatywnego zbioru punktów leżących na krawędzi badanego otworu. W tym celu ponownie wykonujemy wstępne przetwarzanie oryginalnego obrazu uzyskanego z kamery. Tym razem nie zmieniamy jednak rozdzielczości obrazu. Do usunięcia szumów wykorzystujemy jedynie liniowy filtr dolnoprzepustowy. Tak otrzymany obraz, w wyniku przeprowadzenia operacji progowania lokalnego, zamieniany jest na obraz binarny, w którym kolor czarny oznacza otwór, a kolor biały powierzchnię spawanej płyty.

Punkty leżące na krawędzi otworu znajdujemy w wyniku przeprowadzenia szeregu przekrojów obrazu binarnego wzdłuż ściśle określonych linii. Dla prawidłowego przekroju otworu, otrzymuje się funkcję przyjmującą kolejno wartość zero (czarny), wartość 255 (biały), znów wartość zero i ostatecznie wartość 255. Poszczególne poziome wartości funkcji odpowiadają odpowiednio obrazowi

wnętrza rurki, krawędzi rurki, przerwie między brzegiem rurki a krawędzią otworu, płycie wymiennika ciepła. Dla takiej postaci przekroju obrazu przyjmuje się, że punkt krawędzi badanego otworu wypada w punkcie przejścia między drugim obszarem czarnym a obszarem białym. Aby znaleziony punkt został zaakceptowany i umieszczony w tablicy punktów krawędzi otworu, spełniony musi być szereg warunków określających minimalną i maksymalną długość poszczególnych obszarów przekroju obrazu otworu. Dla przekrojów, w których odpowiedni punkt nie został znaleziony, wyznaczany jest alternatywny punkt krawędzi otworu i umieszczany w oddzielnej tablicy punktów. Punkt ten wypada w miejscu przejścia pierwszego obszaru czarnego w obszar biały o odpowiedniej długości.

Dla otworów okrągłych, poszczególne przekroje obrazu rozpoczynają się w geometrycznym środku otworu i rozchodzą się pod różnymi kątami równomiernie pokrywając przestrzeń wokół punktu startowego. W przypadku otworów podłużnych (rys. 4), takie rozwiązanie nie jest optymalne, gdyż uzyskuje się bardzo nierównomierny rozkład przestrzenny znalezionych punktów krawędzi. Znając orientację kątową otworu oraz minimalną i maksymalną długość przekątnej przechodzącej przez jego środek, można skonstruować odcinek, którego położenie, długość oraz orientacja kątowa odpowiadają położeniu i rozmiarowi otworu (rys.4). Wykonując przekroje obrazu, rozpoczynające się z wyżej wymienionego odcinka i prostopadłe do niego (na długości odcinka), oraz przekroje rozpoczynające się z obu jego końców, możemy uzyskać równomiernie rozłożony zbiór punktów krawędzi badanego otworu. Uzyskanie właściwego rozkładu punktów krawędzi jest bardzo istotne dla prawidłowego działania kolejnego etapu przetwarzania obrazu, polegającego na porównaniu znalezionych punktów z wzorcem otworu.

W celu dopasowania wzorca otworu do znalezionych punktów krawędzi, definiuje się funkcję, której wartość wyraża średnią odległość znalezionych punktów od krawędzi wzorca (2):

$$J(x_o, y_o, \alpha_o) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i(x_o, y_o, \alpha_o), \quad (2)$$

gdzie  $x_o$ ,  $y_o$  i  $\alpha_o$  oznaczają położenie i orientację kątową wzorca otworu.  $N$  jest liczbą znalezionych punktów krawędzi, a  $D_i(\cdot)$  oznacza odległość  $i$ -tego punktu do krawędzi wzorca otworu. Następnie za pomocą metody Hooke-Jeeves'a wyznacza się minimum funkcji  $J(\cdot)$ . W celu zagwarantowania niezawodnej pracy systemu, przyjmuje się kilka punktów startowych algorytmu szukania minimum funkcji, wyznaczonych na podstawie dostępnego przybliżonego położeniu środka otworu i jego orientacji przestrzennej. Ponieważ niektóre otwory są niesymetryczne, wybiera się punkty startowe, których początkowe orientacje otworów wzorcowych różnią się między sobą o 180 stopni. Na koniec wybiera się rozwiązanie, dla którego uzyskano najmniejszą wartość funkcji  $J(\cdot)$ .

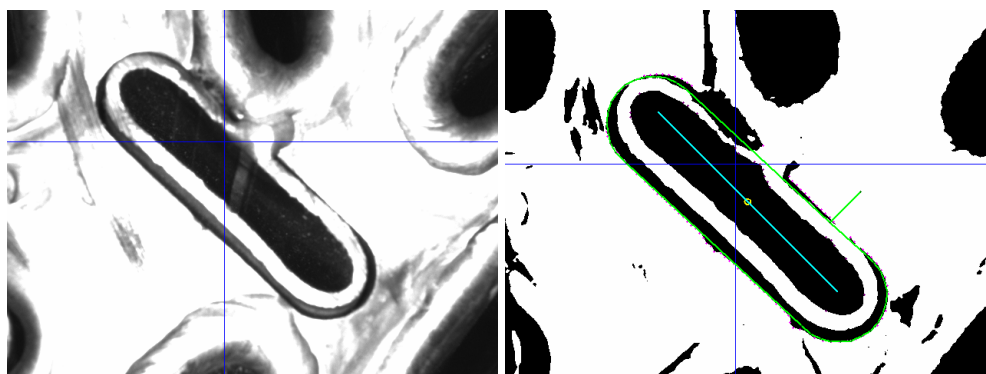
W podstawowej wersji, na wartość kryterium mają wpływ tylko właściwe punkty krawędzi otworu. Ze względu na różnego rodzaju niedoskonałości uzyskanego obrazu, zdarza się, że znalezionych punktów krawędzi jest zbyt mało



lub grupują się one po jednej stronie otworu. W tym przypadku, algorytm szukania minimum funkcji  $J(.)$  może wskazać niewłaściwe rozwiązanie, a tym samym błędnie zlokalizować spawany otwór. Sytuacji takiej można uniknąć wykorzystując w definicji funkcji celu informację o położeniu alternatywnych krawędzi otworów.

Ponieważ spawanie otworów nie może rozpoczynać się dokładnie na krawędzi otworu, wzorec otworu zawiera definicję położenia możliwych punktów startowych palnika, leżących na zewnątrz otworu. Po dopasowaniu położenia i orientacji wzorca otworu do znalezionych punktów, ze wszystkich zdefiniowanych punktów startowych palnika wybierany jest punkt leżący dostatecznie daleko od krawędzi pozostałych otworów na obrazie. Jest to pierwszy punkt generowanej trajektorii. Kolejne punkty leżą na krawędzi wzorca otworu (położenie i orientacja wzorca otworu odpowiada położeniu otworu na obrazie).

Tak wyznaczona trajektoria jest następnie przesyłana do robota, który odpowiednio ją wydłuża o połowę obwodu otworu, w celu wykonania nakładki spawu i wygaszenia łuku palnika.



Rys. 4. Przykładowe zdjęcie otrzymywane na etapie wyznaczania trajektorii spawania, zdjęcie po prawej stronie zawiera wynik przetwarzania obrazu – wyznaczoną trajektorię palnika.

## 5. DALSZY ROZWÓJ SYSTEMU

Następnym etapem prac jest wyposażenie robota w system pomiaru odległości, przeznaczony do precyzyjnego określania płaszczyzny roboczej. Dzięki takiemu rozwiązaniu, robot będzie w stanie wykonać precyzyjne spawanie wymienników ciepła bez potrzeby stosowania urządzenia do pozycjonowania spawanych elementów. Do pomiaru położenia płyty planuje się wykorzystać laserowe czujniki odległości lub kombinację oświetlaczy laserowych odpowiednio zorientowanych wobec osi kamery. W drugim przypadku, orientacja powierzchni roboczej wyznaczona byłaby na podstawie odpowiedniej analizy uzyskanego obrazu.

Kolejnym krokiem jest zwiększenie elastyczności stanowiska produkcyjnego poprzez nauczenie robota spawania wymienników ciepła, których płyty z otworami nie są płaskie, lecz przyjmują kształt kulisty bądź kształt stożka.

## 6. PODSUMOWANIE

Przedstawiony system wizyjny służy do sterowania pracą zrobotyzowanego stanowiska spawania wymienników ciepła. Dzięki niemu uzyskuje się zmniejszenie kosztów produkcji przez umożliwienie szybkiego przebrojenia stanowiska produkcyjnego oraz wyeliminowanie kosztownego i skomplikowanego w obsłudze urządzenia do precyzyjnego pozycjonowania spawanych detali. Przedstawione rozwiązania mogą być również z powodzeniem wykorzystane w innych dziedzinach komputerowego widzenia robotów.

## LITERATURA

- [1] A. Bauchspiess, S. C. A. Alfaro. Predictive seam-tracking optimization, 5 International Conference on Trends in Welding Research, Atlanta - USA, Jun. 1-6, 1998.
- [2] G. X. Ritter, J. N. Wilson. *Computer vision algorithms in image algebra*. CRC Press, 1996.
- [3] J. Ohya, A. Shio, S. Akamatsu. Recognizing characters in scene images. IEEE Trans. on PAMI 1994, Vol. 16, s. 214-220.
- [4] K. Y. Bae, T. H. Lee, K. C. Ahn. An optical sensing system for seam tracking and weld pool control in gas metal arc welding of steel pipe, ELSEVIER, Journal of Materials Processing Technology 120, 2002, s. 458-465.
- [5] M. Otsu. A threshold selection method from gray-level histograms. IEEE Trans. SMC 1979, No 1, s. 62-66.
- [6] P. Ch. Tung, M. Ch. Wu, Y. R. Hwang. An image-guided mobile robotic welding system for SMAW repair processes. ELSEVIER, International Journal of Machine Tools & Manufacture 44, 2004, s. 1223-1233.
- [7] P. Kim, S. Rhee, Ch. H. Lee. Automatic teaching of welding robot for free-formed seam using laser vision sensor, ELSEVIER, Optic and Lasers In Engineering 31, 1999, s. 173-182.
- [8] R. C. Gonzales, R. E. Woods. *Digital image processing*. Addison-Wesley Publishing Company 1992.
- [9] R. D. Trier, A. K. Jain. Goal-directed evaluation of binarization methods. IEEE Trans. on PAMI 1995, Vol. 17, s. 1191-1201.
- [10] W. Malina, S. Ablameyko, W. Pawlak. *Podstawy cyfrowego przetwarzania obrazów*. Warszawa, EXIT 2002.

### **MACHINE VISION FOR THE HEAT EXCHANGERS ROBOTIC WELDING STATION**

In order to enhance the flexibility of the robotic welding, it is necessary to generate the robot path automatically. This paper presents the vision machine which assists the heat exchangers welding robot. The process of welding consists of two steps. First, using the vision system, the global positions of welding holes are obtained. Next, for all holes, accurate vision measurement is made and appropriate torch patch is generated. This solution makes the robotic station flexible and less expensive by means of reduction of the time of new production preparation and elimination of using special device for positioning of the welding heat exchangers.