

# Metody wizyjne w automatyzacji spawania

## Vision methods in automation of welding

### Streszczenie

W artykule omówiono problematykę wdrożenia systemu wizyjnego do sterowania procesem spawalniczym. Zaprezentowano podstawowe sposoby usuwania zakłóceń oraz algorytmy rozpoznawania obrazu. Przetestowano dostępne na rynku czujniki.

**Słowa kluczowe:** Śledzenie złącza, filtrowanie zakłóceń, metody wykrywania krawędzi

### Abstract

The article discusses the issues of implementation of the vision system to control the welding process. The basic methods of removing noises and image recognition algorithms were presented. Commercially available sensors were tested.

**Keywords:** Seam tracking, noise filtering, edge detection

## Wstęp

Nikogo, kto zetknął się ze spawaniem łukowym nie trzeba przekonywać o twardo przemysłowym charakterze tej czynności. Nie bez podstaw proces ten zalicza się do grupy 3D dirty, dull, dangerous, lub jeszcze inaczej 3H hazardous, hot, heavy [1]. Ilość zagrożeń, a także dość trudny i wymagający charakter tej pracy sprawia, iż w krajach wysokorozwiniętych coraz trudniej o młodych ludzi chętnych do wykonywania tej ważnej pracy. Z pomocą przychodzi automatyzacja i robotyzacja. Bardzo wiele robotów pracujących w przemyśle wyposażonych jest w urządzenia do cięcia termicznego lub spawania. Łatwo to zauważyć w branży motoryzacyjnej

i wszędzie tam gdzie liczy się duży wolumen produkcji, powtarzalność, prostota operacji, niewielkie rozmiary detalu lub spoiny. Sytuacja komplikuje się w momencie, gdy do wykonania jest pojedynczy detal, lub krótka seria. W przypadku złożonych kształtów nie obejdziesz się bez zbudowania dodatkowego oprzyrządowania, uchwytów, mocowań, itd. Chyba największą bolączką robotyzacji spawania jest tolerancja wymiarów elementów dostarczonych na stanowisko zautomatyzowane. Robot działa według zaprogramowanego schematu. Od punktu do punktu. Standardowo nie jest wyposażony w „oczy”, ani inne zmysły, tak aby mógł samodzielnie skorygować

**Mgr inż. Grzegorz Sypniewski** – Katedra Automatyki Przemysłowej i Robotyki, Wydział Elektryczny Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

Autor korespondencyjny/ Corresponding author: grzegorz.sypniewski@zut.edu.pl

ścieżkę narzędzia, jakim jest palnik. Ratunkiem w takich okolicznościach jest dopilnowanie wymiarów detali, sposobu montażu. Skorzystanie z obróbki maszynami CNC. Nie zawsze jest to możliwe i opłacalne. W przypadku dużych powierzchni wręcz niemożliwe. Bardzo często, pracownicy przed spawaniem, szlifując ręcznie przygotowują powierzchnię, co wprowadza dodatkowo pewien faktor losowości. W klasycznych rozwiązaniach można się ratować techniką „touch and sense”, w której to, w metodzie MIG/MAG dotyka się końcówką drutu spawalniczego lub łuską obrabiany materiał [2]. Przy kontakcie następuje przepływ prądu o małym natężeniu. Badając w ten sposób element w kilku charakterystycznych miejscach można wprowadzić korekty do programu i zmodyfikować teoretyczne położenie detalu na rzeczywiste. Nie uchroni nas to przed odkształceniami termicznymi, jakie niechybnie pojawią się w trakcie spawania. Nie zawsze jest możliwe zastosowanie funkcji „touch and sense”. Nie uda się w przypadku złącza typu I, oraz w ciasnych miejscach. Pewnym wyjściem z opresji jest kontrola długości łuku. Nie jest mi znany producent robotów, który nie miałby w ofercie takiej opcji programowej. Bardzo dobrze sprawdza się to, gdy konieczne jest korygowanie wysokości palnika w trakcie kładzenia długich spoin, gdyż materiał ma tendencję do falowania. Trudniejszym zadaniem jest śledzenie spoiny horyzontalnie. Palnik musi oscylować wewnątrz wyraźnego rowka, najlepiej zbliżonego kształtem do litery V. Spoina pachwinowa również mieści się w tej kategorii. Podstawą tej metody jest wychwycenie zmiany długości łuku elektrycznego wewnątrz złącza, co przekłada się na zmiany prądu. Widać wyraźnie, że sposób ten jest ograniczony, co do metody spawania, rodzaju i długości spoiny. Celem niniejszej publikacji jest omówienie popularnych algorytmów rozpoznawania obrazu, w tym przypadku krawędzi rowków spawalniczych. Zaznaczono istnienie praktycznych problemów i sposobów radzenia sobie z nimi w aplikacjach wykorzystujących kamery lub czujniki wizyjne w robotyzacji spawania.

## Rys historyczny

Na przestrzeni lat było wiele pomysłów na rozwiązanie kwestii kierowania palnikiem w spoinie. Często pojawiały się czujniki taktylne, czyli rodzaj palca wędrującego wewnątrz rowka. Testowano także czujniki ultradźwiękowe[3], indukcyjne[4], radarowe[5]. Dostyc dawno na scenie pojawiły się metody wizyjne.

Pierwsze rozwiązania [6,7] pojawiły się na początku lat 80-tych ubiegłego wieku. Prace Kawahary miały wielki wpływ na kolejne rozwiązania. Dużo działało się w latach 90 i na przełomie wieku. Największy rozwój obserwujemy jednak w chwili obecnej, gdy na targach poświęconych robotom, jedną halę można przezna-

czyć na systemy wizyjne. Wciąż pojawiają się nowe pomysły na realizację śledzenia rowka spawalniczego, pomimo obfitości rozwiązań nie powstał jeszcze system na tyle tani i uniwersalny by trafić z marszu pod strzechy.

## Przed spawaniem

Przygotowując się do rozwiązania aplikacji wizyjnej trzeba odpowiedzieć na kilka ważnych pytań, które ograniczą zakres możliwych rozwiązań. Jedne z nich dotyczą technologii, inne systemów sterowania. Oba te wątki przenikają się. Najważniejsza jest odpowiedź na pytanie: jakie materiały będziemy łączyć. Czy detale są duże, małe, w jakiej tolerancji wykonane. W skrajnych przypadkach nawet najlepszy spawacz może mieć problem. Jaki jest charakter złącza. Inne metody detekcji są przewidziane dla połączenia pachwinowego, inne dla typu I, zakładka także ma swoją specyfikę. Istotne jest, w jaki sposób materiał odbija światło. Jednym z kryteriów jest technologia spawania. Inaczej podchodzi się do spawania laserowego, gdzie potrzebna jest rewelacyjna dokładność i szybkość śledzenia. Inaczej do TIG, gdzie jasność łuku jest stosunkowo niska, jeszcze inaczej do metody MAG, z dużą ilością odprysków, silnym łukiem elektrycznym, niższą pożądaną dokładnością.

Kluczowe jest ustalenie, czy w danej aplikacji lepszy będzie skaner laserowy zakupiony od wyspecjalizowanej firmy (można go zbudować we własnym zakresie), czy może system wizyjny składający się z jednej lub kilku kamer.

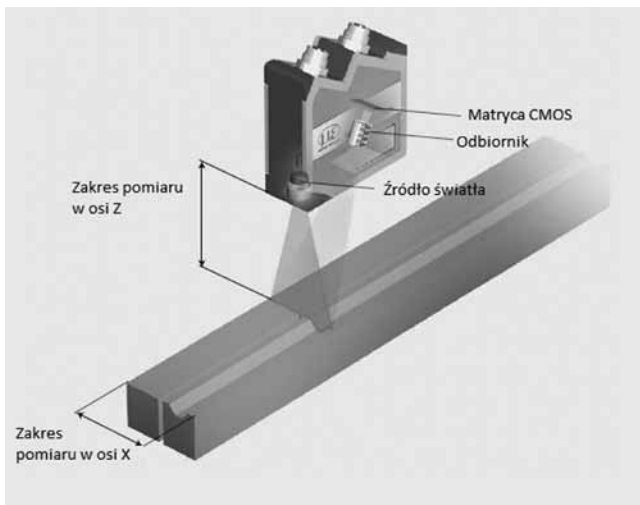
Używając czujnika laserowego jest się z automatu zobligowanym do zamocowania go w przestrzeni roboczej narzędzia [8]. Jest to tzw. podejście eye-in-hand. Kamery również mogą być mocowane w ten sam sposób, ale zależnie od aplikacji, mogą one pracować w układzie „hand to eye”. Ma to bezpośrednie przełożenie na to czy pracujemy w układzie współrzędnych globalnych albo narzędzia.

Konieczne jest ustalenie, w jaki sposób czujnik (kamera) będzie chroniona, przed środowiskiem. Krytyczne jest dobranie odpowiednich filtrów przepuszczających tylko odpowiednie pasmo światła, oraz dobranie obiektywu. Dobierając kamerę warto skorzystać z uwag zamieszczonych w artykule [9]. Należy się zdecydować czy skuteczniejsze będzie zastosowanie matrycy CMOS lub CCD.

## Przetwarzanie obrazu

Zasadniczo wyszukiwanie rowka spawalniczego można przeprowadzić na dwa sposoby. Z użyciem zewnętrznego silnego źródła światła, typu paski laserowe (rys. 1) Jest to metoda aktywna. Polega to na

zastosowaniu źródła laserowego emitującego światło. Odbity promień trafia na matrycę światłoczułą. Kształt odbitego promienia niesie oczekiwane przez nas informacje. Zdarzają się systemy ze światłem laserowym w postaci owalu lub kilku pasków.



Rys. 1. Zasada działania skanera laserowego  
Fig. 1. Laser scanner working principle

Pasywne: w których wykorzystuje się światło pochodzące od łuku elektrycznego. Można obserwować kształt i zachowanie jeziorka roztopionego metalu oraz rowek [10].

Innym sposobem klasyfikacji systemów wizyjnych jest tryb pracy 2D lub 3D. W pewnych przypadkach jest możliwe skuteczne rozwiązanie problemu, wykorzystując tylko dwa wymiary. Najczęściej spotyka się systemy 3D. Naturalną przewagą mają skanery laserowe. Ich sposób działania powoduje, iż korzystając z triangulacji w łatwy sposób można określić głębokość lub szerokość rowka (rys. 2)



Rys. 2. Pole działania czujnika laserowego, z dokumentacji MEL  
Fig. 2. Area of scanning, from MEL textbook

Sprawą, która nie może umknąć w trakcie budowania systemu jest kalibracja optyki. O ile w przypadku rozwiązań komercyjnych nie stanowi to większego problemu, gdyż producent dostarcza gotowe narzędzia. To w przypadku systemów własnych konieczne jest przeprowadzenie odpowiednich procedur. Powstało wiele opracowań dotyczących tego zagadnienia. [11÷13]. Bardzo często w tej operacji wykorzystuje się wzorce typu szachownica, lub inne symetryczne obrazy.

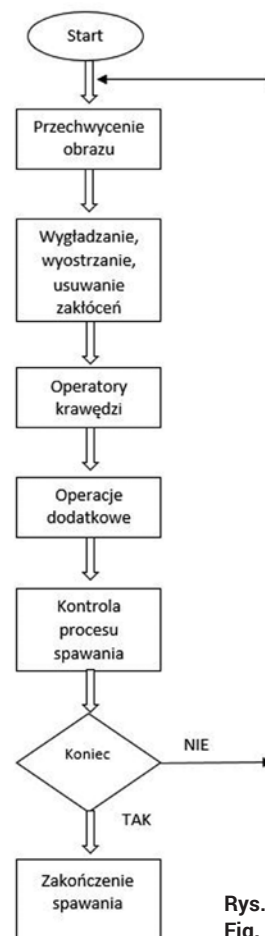
Kolejnym tematem do podjęcia jest sposób wizyjnego sterowania manipulatorem.

Założmy, że mamy już kamerę i spawany element. Teraz dążymy do tego by zredukować odchyłkę palnik-kamera od środka rowka. Do wyboru jest jedna z trzech opcji:

- PBVS (position based visual servoing), sygnały wejściowe i odpowiedzi są obliczane w trójwymiarowej przestrzeni kartezjańskiej.
- IBVS (Image based visual servoing), sygnały wejściowe i odpowiedzi znajdują się w przestrzeni 2D.
- HVS (hybrid visual servoing), W tym mieszanym systemie dane o orientacji prezentowane są w przestrzeni 3D, natomiast reszta informacji, w tym pozycja w 2D.

Układy PBVS oraz HVS są wrażliwe na niedoskonałość kalibracji kamery. Lepiej z błędami kalibracji radzi sobie układ IBVS, lecz pojawiają się inne problemy związane z koniecznością zapewnienia odpowiedniej orientacji kamery i ręcznego ustawienia obiektu polu widzenia [14,15]. Przegląd literatury i rozwiązań wskazuje na większą popularność metody PBVS.

Niezależnie od tego, jakim sensorem, bądź kamerą dysponujemy algorytm postępowania jest bardzo podobny. Pokrywa się także wiele metod filtrowania obrazów. Temat jest bardzo rozległy. Nie sposób w krótkiej publikacji przedstawić wszystkie sposoby na przefiltrowanie pożądanej informacji.



Rys. 3. Etapy rozpoznawania obrazu  
Fig. 3. Stages of image processing

Bazując na metodach podstawowych naukowcy rozwijają własne implementacje.

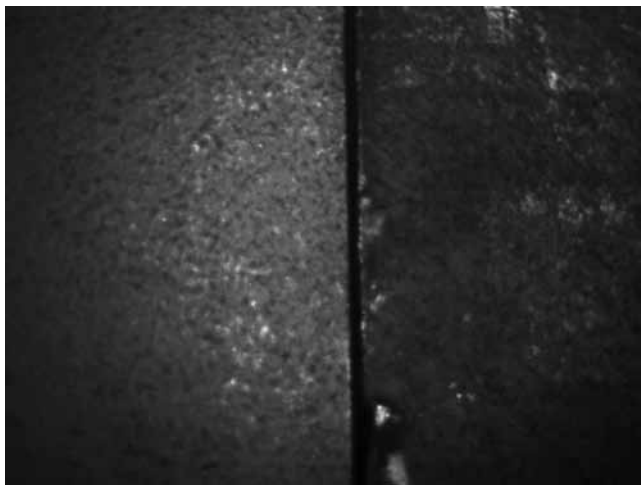
Moim zamierzeniem jest przedstawienie ogólnego schematu działania, oraz przedstawienie i omówienie najczęściej wykorzystywanych operacji matematycznych na obrazach. Na rysunku 3 pokazane są kolejne kroki prowadzące do zakończenia skutecznej analizy obrazu.

To, co dla ludzi jest łatwo interpretowalnym obrazem musi być przetłumaczone na zrozumiały dla komputera ciąg zero-jedynkowy. Kolorowe obrazy są, więc przetwarzane na takie z poziomami szarości. Obraz jest klasą funkcji dwuwymiarowej. Przedstawia się ją za pomocą macierzy (1) [16].

$$f(x,y,t) = \begin{bmatrix} f(0,0) & \dots & f(0,n) \\ \dots & \dots & \dots \\ f(m,0) & \dots & f(m,n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Rozmiar macierzy jest taki jak rozdzielczość kamery, więc może to być przykładowo 640x480 punktów. Każdy punkt ma wartość od 0 do 255 co stanowi wagę. Dla wartości 255 punkt jest biały, dla wartości 0 punkt jest czarny. Współczynniki x i y określają położenie punktu, natomiast zmienna t jego zmianę w czasie.

Stąd widać jasno, iż duża rozdzielczość kamery skutkować będzie dużą macierzą, co zajmuje dużo pamięci. Warto o tym fakcie pamiętać. Na rysunku 4 zaprezentowany jest obraz 640x480 punktów w skali szarości przechwycony przez przemysłową kamerę BVS Universal.

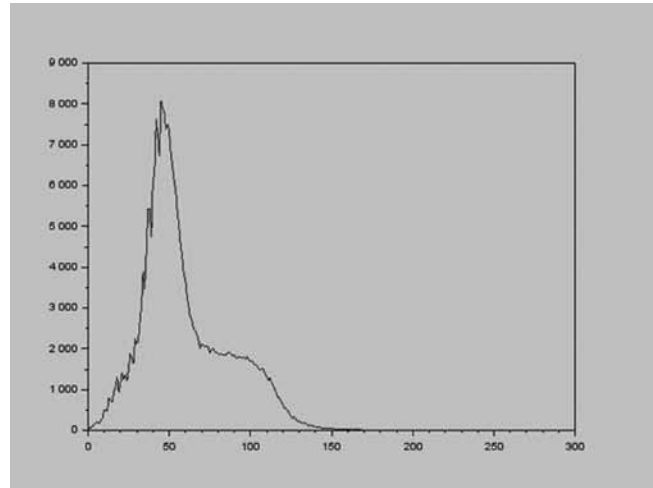


Rys. 4. Obraz przechwycony z kamery  
Fig. 4. Captured image

Do wygenerowania tego i następnych sub-obrazów użyty został pakiet SCILAB w wersji 5.5.1 oraz biblioteki SIVP, IPD. Zdecydowałem się na użycie tego środowiska ze względu na powszechną dostępność, rozpowszechniane jest na licencji open source oraz niskie wymagania sprzętowe.

Używając poziomu szarości na osi odciętych (OX) oraz ilości punktów na osi rzędnych (OY) można

wrysować diagram zwany histogramem rozkładu szarości. Na rysunku 5 zaprezentowany jest taki wykres dla rysunku 4. Z wykresu tego można odczytać współczynnik kontrastu, poziom rozkładu szarości itp. Są to bardzo przydatne informacje, gdy zachodzi potrzeba rozjaśnienia lub ściemnienia obrazu [16].



Rys. 5. Histogram  
Fig. 5. Histogram

Jedną z pierwszych operacji, jakie można zastosować jest przekształcenie liniowe (linear transformation) [17]. Światło otoczenia może silnie wpływać na obraz widziany przez kamerę, prowadzi to do nierównomiernego oświetlenia próbki, co dobrze widać na rysunku 1. Aby zminimalizować ten problem można posłużyć się następującą zależnością (2):

$$I(i,j) = \begin{cases} 0, & I(i,j) < \alpha \\ \frac{(I(i,j)-\alpha)+255}{\beta-\alpha}, & \alpha \leq I(i,j) \leq \beta \\ 255, & I(i,j) > \beta \end{cases} \quad (2)$$

Gdzie  $I(i,j)$  jest wagą szarości  $(i,j)$ , i są wartościami progowymi, do dobrania odpowiedniego poziomu.

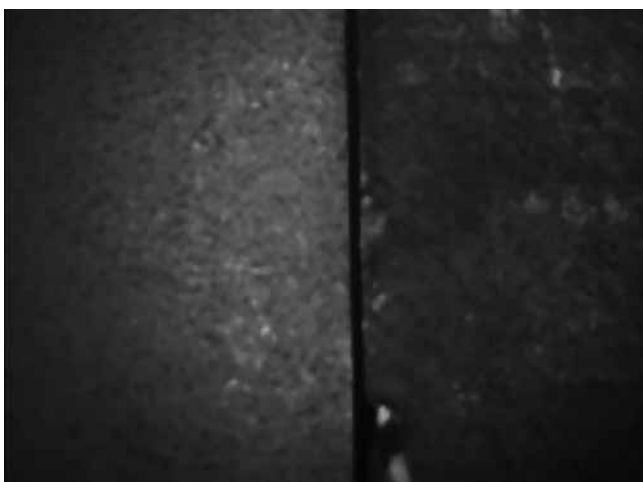
Innym dosyć prostym zabiegiem jest operacja „AND” [13]. Sprawdza się dobrze tam gdzie jest dużo rozprysków. Na przykład w trakcie spawania w osłonie CO<sub>2</sub>. Rozpryski dają silne zakłócenie, na szczęście są krótkotrwałe. W związku z tym, iskry, które widać na jednej klatce, znikają w następnym ujęciu lub znajdują się w innym miejscu. Z matematycznego punktu prezentuje się to tak (3):

$$I(i,j,t) = \min[I(i,j,t), I(i,j,t-1)] \quad (3)$$

$I(i,j)$  reprezentuje poziom szarości punktów  $ij$  w danej chwili  $t$ .  $i$  oraz  $j$  są liczbami całkowitymi  $0 < i < w$ ,  $0 < j < h$ ; w i  $h$  są odpowiednio szerokością i wysokością obrazu w pikselach.

Bardzo często spotykaną techniką jest zastosowanie filtra medianowego. Jest bardzo dobry do usuwania zakłóceń typu „sól i pieprz”[1]. Jego mocną stroną jest zachowanie ostrości krawędzi w porównaniu do filtra uśredniającego oraz odporność na lokalne szumy. Wadami jest długi czas obliczeń i erozja obrazu w przypadku zastosowania dużych okienek typu 9x9. Dobrze to widać na poniższym rysunku 6. Istotą działania filtra medianowego jest wybór wartości środkowej uporządkowanego rosnąco ciągu wartości jasności pikseli, przetwarzanego punktu i jego otoczenia. Maski, czyli macierze, z których liczy się medianę mają zazwyczaj rozmiar 3x3, 5x5.

Innymi dosyć często spotykanymi filtrami są filtr gaussa, maksymalny, minimalny, uśredniający.



Rys. 6. Zastosowanie filtra medianowego  
Fig. 6. Usage of Median filter

## Wykrywanie krawędzi

Po przeprowadzeniu czynności wstępnych, większość zakłóceń powinna być usunięta. Teraz można przystąpić do właściwej pracy, czyli odnalezienia rowka spawalniczego.

Jak już wspominałem wcześniej, wielkość obrazu przekłada się 1:1 na wielkość macierzy. Ma to istotny wpływ na szybkość obliczeń i ilość zajmowanej pamięci. Stanowi to duże zagrożenie dla procesu spawania real time. Dlatego też zazwyczaj wybiera się obszar zwany ROI (Region of Interest). W praktyce nie jest spotykane by ważny był cały obraz przesyłany przez kamerę. Zwykle jest to fragment o rozmiarze m-rzędów, n-kolumn w środkowej części obrazu.

Kolejnym stosowanym zabiegiem jest binaryzacja obrazu. Traci się w ten sposób znaczną część informacji, ale ułatwia obliczenia. Najczęstszym sposobem jest progowanie zgodnie ze wzorem poniżej. Polega to na ustawieniu wartości progu  $T$  (4), powyżej której piksele należą do rowka spawalniczego, a poniżej tej wartości należą do tła. Binarizacja jest zazwyczaj stosowana w metodach aktywnych, gdzie zależy nam

na wzmocnieniu profilu. Czyli kształtu odbitego światła od powierzchni badanego elementu.

Progowanie może odbywać się na kilka sposobów, jako globalne, lokalne, wymagające wiedzy a-priori, lub z błędem minimalnym. Zaawansowanym algorytmami binaryzacji obrazów stosowanymi w automatyzacji spawalnictwa są metoda Otsu [18÷20] oraz Bernsena [21].

Metody gradientowe są najpowszechniej stosowanymi technikami wykrywania krawędzi w obrazie. Podstawą jest wyznaczanie pierwszej pochodnej w dwóch ortogonalnych kierunkach (niekoniecznie w pionie i poziomie). Metody te zwane są także filtrami lub operatorami.

Jest ich kilka, mają swoje cechy, wady i zalety. Stosowanie ich powiązane jest z oglądanym materiałem jakim dysponujemy i środowiskiem w jakim pracujemy.

Jednym z nich jest operator Robertsa (Roberts Cross). Jeden z pierwszych, jakie zostały zaproponowane na początku lat 60-tych. Niestety, operator Robertsa jest bardzo czuły na lokalne zakłócenia obrazu, czyli szumy i z powodów znacznych błędów nie może być używany do analizy obrazów o dużym poziomie szumów, daje jednak wąskie krawędzie. Zasada działania polega na obliczeniu różnic wartości pikseli znajdujących się koło siebie po przekątnych, następnie dodaje się ich wartości bezwzględne. Obliczenie różnic zapisuje się, jako splot macierzy obrazu z macierzami (maskami) o rozmiarze 2x2. Wynikiem, są dwie macierze przedstawiające pochodne kierunkowe obliczone dla kierunków 135° oraz 45°. Wynikowy obraz krawędzi powstaje po obliczeniu różnic modułów z odpowiadających sobie elementów macierzy (5) [22,23].

$$g(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{dla } f(i, j) < T \\ 1, & \text{dla } f(i, j) \geq T \end{cases} \quad (4)$$

W metodzie Sobela [19,22] wyznacza się pochodną kierunkową. Robi się to za pomocą splotu macierzy obrazu z maską 3x3 (6) charakterystyczną dla danego kierunku. Odbywa się to z krokiem 45°, mamy zatem osiem macierzy wynikowych, które są antysymetryczne w stosunku do kierunku wykrywanej krawędzi.

Filtr Sobela wykonuje operację uśredniania pochodnej z trzech linii równoległych do kierunku różniczkowania. Ma przez to mniejszą wrażliwość na zakłócenia w obrazie (szum) niż Krzyż Robertsa i lepiej wygładza niż operator Prewitta, jednakże w przypadku testowanego obrazu wyniki nie są zadowalające (rys. 7).

Filtr Prewitt'a [16, 22] działa podobnie do filtra Sobela. Różnicą jest użycie innych masek do liczenia gradientu.

$$R_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad |R| = |R_x| + |R_y| \quad (5)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$S_x = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad S_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$|S| = |S_x| + |S_y| \quad (6)$$



Rys. 7. Zastosowanie operatora Sobela  
Fig. 7. Usage of Sobel operator

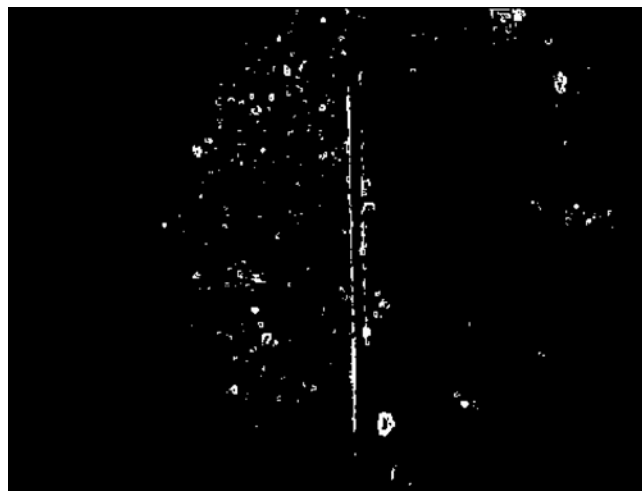
Najmniejsza maska tak jak poprzednio jest rozmiaru 3x3. Tak jak w poprzednim operatorze jest możliwe wyznaczenie estymaty pochodnej w jednym z ośmiu kierunków. Operacja polega na splocie (konwolucji) macierzy (masek) z obrazem oryginalnym. W wyniku powstają estymaty pochodnych w dwóch kierunkach. Tak jak we wcześniejszych operatorach dodajemy do siebie moduły (7) (rys. 8).

$$P_x = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad P_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$|P| = |P_x| + |P_y| \quad (7)$$

Ostatnim z najczęściej spotykanych filtrów jest filtr Canny'ego [18,20,24,25]. Właściwie jest to kilkustopniowy algorytm. Daje bardzo dobre rezultaty, minimalizuje liczbę wykrytych fałszywych krawędzi, równocześnie nie pomija prawdziwych krawędzi. Niestety jest to okupione czasem realizacji. Operację można podzielić w następujący sposób:

1. Użycie filtru Gaussa do eliminacji pojedynczych zakłóceń. Obraz jest lekko rozmywany. Rozmiar maski może być zmienny.
2. Szukanie gradientu natężenia obrazu. W tym etapie algorytm wykorzystuje omówione wcześniej operatory do optymalnego wykrycia krawędzi we wszystkich



Rys. 8. Zastosowanie operatora Prewitt'a  
Fig. 8. Usage of Prewitt operator

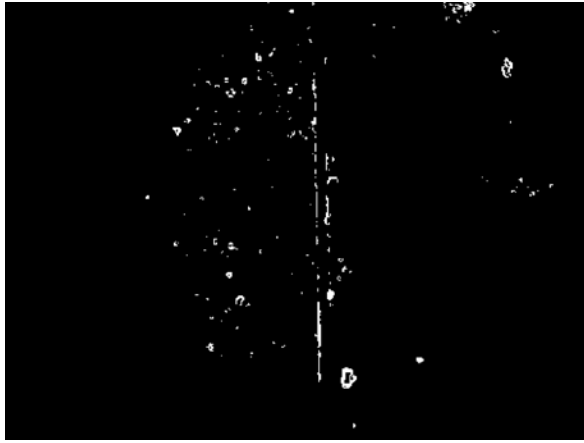
kierunkach. Nachylenie krawędzi oraz jej kierunek również są określane.

3. Usuwanie nie maksymalnych punktów. Chodzi o to by linia krawędzi była maksymalnie wąska, lecz nieprzerwana. Daje to także dobre umiejscowienie. Wykryta krawędź jest właściwym odwzorowaniem rzeczywistej.
4. Śledzenie pikseli i progowanie z histerezą. Usuwa się w ten sposób krawędzie nieistotne znajdujące się poniżej progu wyzwolenia i jednocześnie łączy się krawędzie ze sobą w miejscach gdzie był słaby kontrast rysunek 9.



Rys. 9. Zastosowanie filtru Canny'ego  
Fig. 9. Usage of Canny filter

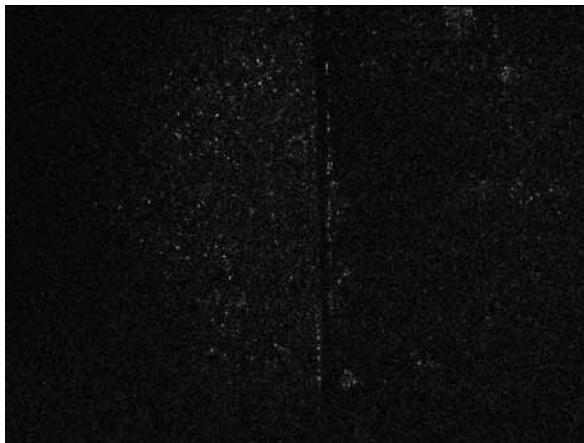
Istnieją również inne metody wykrywania krawędzi. Za pomocą pakietu Scilab udało się wygenerować odpowiednie obrazy dla operatora Laplace'a oraz operatora LoG. Pokazano także działanie algorytmu wykorzystującego szybką transformatę Fouriera. Są to zaawansowane metody obliczające drugą pochodną. Czas realizacji jest odpowiednio dłuższy.



Rys. 10. Wynik działania operatora fftderiv ze Scilaba  
Fig. 10. Result of function fftderiv in Scilab



Rys. 11. Wynik działania operatora LoG ze Scilaba  
Fig. 11. Result of function LoG in Scilab



Rys. 12. Wynik działania filtru Laplace'a ze Scilaba  
Fig. 12. Result of function Laplace in Scilab

Rysunki 10, 11 i 12. Bardzo często wykorzystywanym narzędziem jest transformata Hough [17, 26, 27]. Generalnie rzecz ujmując jest to sposób na wykrywanie linii. Metodę tę zaadaptowano następnie do wykrywania bardziej złożonych obiektów np. okręgów, oraz innych kształtów. Transformata Hough jest szczególnym przypadkiem transformaty Radona. Nie należy jej

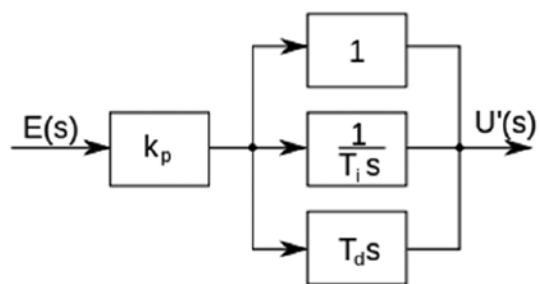
traktować, jako zamiennika dla wcześniej wspomnianych algorytmów, jest to kolejny etap w generowaniu ścieżki dla palnika. Transformata przeprowadzana jest na obrazach binarnych. W metodzie tej punkty obrazu  $x, y$  są przenoszone do przestrzeni Hough. Prosta w układzie kartezjańskim w przestrzeni Hough jest punktem, natomiast punkt w układzie kartezjańskim zamienia się w krzywą sinusoidalną. Jest to przestrzeń akumulacyjna. Punkty z różnych krzywych przecinają się tworząc maksima. Zbiór maksimów w przestrzeni Hough odpowiada prostej w układzie kartezjańskim. Niestety nie udało się zainicjować odpowiednich bibliotek w Scilabie by wykreślić przykładowy rysunek.

## Operacje dodatkowe

Wyznaczone krawędzie posiadają pewną grubość i nierównomierność. Aby uzyskać idealny rowek spawalniczy, używa się metody najmniejszych kwadratów. Powodują to, że wyznaczona zostaje linia najbardziej zbliżona do rzeczywistego środka rowka spawalniczego [9].

## Rodzaje sterowania

Znając już położenie rowka spawalniczego na obrazie można poprowadzić palnik. Kontrolery realizujące to zadanie najczęściej bazują na klasycznych regulatorach PID [18,28] (rys. 13), a także ich rozwinięciach. Dobrym przykładem jest skorzystanie z regulatora Fuzzy PID [29]. Regulatory takie umieszczone są w ujemnej pętli sprzężenia zwrotnego z obiektem. Składają się z trzech części: proporcjonalnej kompensującej uchyb bieżący, całkującej kompensującej akumulację uchybów z przeszłości i różniczkującej kompensującej przewidywane uchyby w przyszłości.



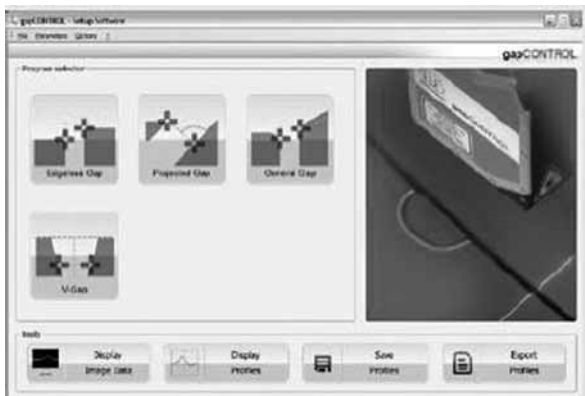
Rys. 13. Schemat blokowy regulatora PID  
Fig. 13. A block diagram of a PID controller

## Testy

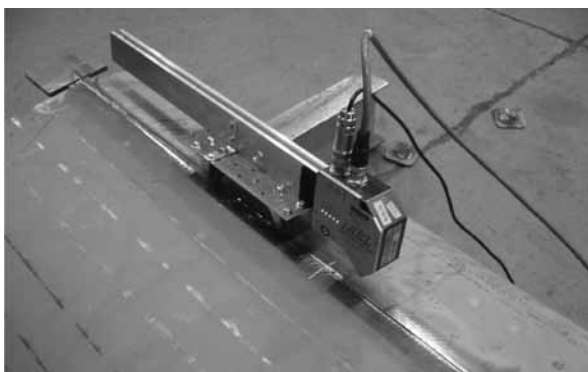
Tyle teorii. Przeprowadzono serię testów w oparciu o rozwiązanie komercyjne. Do testów wykorzystano dwa skanery laserowe podobnej klasy, oraz czujnik wizyjny (inteligentny) Balluff BVS-Universal. Wszystkie produkty konfigurują się poprzez oprogramowanie

udostępniane przez producentów. Należy zauważyć iż w przypadku skanerów laserowych konieczne jest wybranie w oknie programu odpowiedniego trybu rozpoznawania krawędzi zależnego od złącza które będzie śledzone (rys. 14). Dotyczy to wszystkich dostępnych na rynku sensorów (zgodnie z wiedzą autora). Spowodowane jest to koniecznością wyboru najlepszego w danej aplikacji algorytmu rozpoznawania. Testowane urządzenia prawidłowo rozpoznawały kształty złącza. Były również odporne na zakłócenia generowane przez środowisko przemysłowe, tj. rozbłyski, pył i pole elektromagnetyczne. Czujniki świetnie radziły sobie z złączami typu V (rys. 15). Nieco gorzej ze złączem typu I. Wynika to z faktu, iż nie ma jednego uniwersalnego czujnika i do każdej aplikacji należy starannie wybrać skaner. W przypadku złącza I kluczowe jest dobranie właściwej rozdzielczości oraz umiejscowienie czujnika na optymalnej wysokości nad próbką.

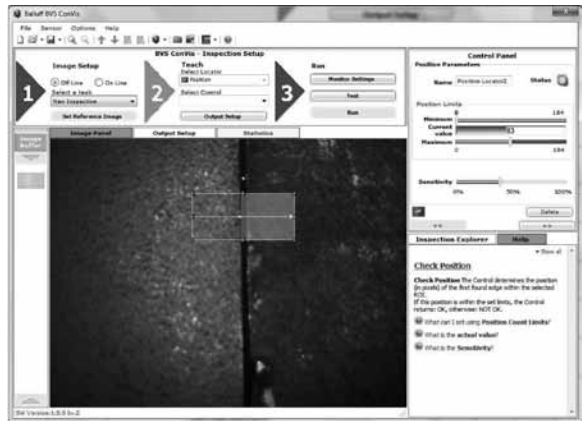
Inaczej jest z kamerą od Balluffa, gdyż prezentowany produkt nie jest dedykowany do zastosowań w spawalnictwie. Pomimo tej niedogodności udało się prawidłowo wykryć krawędzie z pomocą dołączonego oprogramowania konfiguracyjnego. Rozdzielczość 640x480, tryb pracy monochromatycznej i odporność na warunki przemysłowe oraz sposób komunikacji z otoczeniem, kompaktowa niewielka zabudowa rokuje duże szanse na ciekawe projekty w dziedzinie spawalnictwa rysunek 16.



Rys. 14. Okno wyboru rodzaju złącza  
Fig. 14. Software screen for choosing seam tracking



Rys. 15. Czujnik nad złączem typu V  
Fig. 15. Scanner above V-type seam



Rys. 16. Okno wyboru opcji skanowania czujnika BVS  
Fig. 16. Software screen for choosing scan option of BVS sensor

## Podsumowanie

Problematyka śledzenia złącza znana jest od dobrych trzydziestu lat. Na przestrzeni tego czasu powstało setki opracowań i rozwiązań technologicznych. Zarówno naukowych i ściśle produkcyjnych. Zaprezentowane algorytmy wykrywania krawędzi są dobrze znane i opracowane. Pojawiają się kolejne bardziej wyrafinowane techniki. Ceny czujników znacznie spadły. Dotyczy to zwłaszcza sensorów laserowych, niemniej jednak ich cena jest, co najmniej kilka razy wyższa od ceny dobrej kamery przemysłowej. Różnica ta niweluje się w momencie wdrożenia, które w przypadku systemów dedykowanych opartych na własnych rozwiązaniach i kamerach będzie dużo droższe. Nakład pracy doświadczonego integratora jest znaczny i wyraża się w konkretnych pieniądzach. Można zadać sobie pytanie. Skoro algorytmy wizyjne są dobrze rozwinięte, dlaczego roboty spawalnicze nie są sprzedawane z gotowymi zestawami wizyjnymi. Odpowiedzi na to pytanie jest kilka. Wciąż powstają coraz lepsze algorytmy rozpoznawania obrazu i sterowania narzędziem. Używanie obecnych systemów nie jest takie proste, przy zmiennej produkcji konieczne jest ustawianie systemu od nowa, przeprowadzanie kalibracji. Kłopotliwe jest mocowanie czujników na ramieniu robota lub automatu. Zawsze istnieje trywialna możliwość zniszczenia drogiego sprzętu przez nieuwagę. Podstawowym problemem jest to, iż nie powstał do tej pory system gotowy do działania zaraz po wyciągnięciu z pudełka.

*Autor dziękuje firmom BALLUFF, MAREL, WOBIT za udostępnienie czujników i okazaną pomoc przy realizacji badań.*

*Użyty sprzęt i oprogramowanie:*

1. BALLUFF BVS001 BVS-UR-3-001-E
2. MICRO\_EPSILON LLt2611-50, dystrybutor WOBIT
3. MEL M2-iLAN-2-6/4/4,5 dystrybutor MAREL - SERWIS MARIUSZ SAMBORSKI
5. PAKIET SCILAB 5.5.1 i biblioteki SIVP 0.5.3.2, IPD 8.3-2.1



## Literatura

- [1] Kohut P.: Metody wizyjne w robotyce (część II), Przegląd Spawalnictwa 1/2009.
- [2] Kruczyński M.: Sensory i układy śledzenia spoiny na zrobotyzowanych stanowiskach spawalniczych, Przegląd Spawalnictwa 1/2013.
- [3] Mahajan A., Figueroa F.: Intelligent seam tracking using ultrasonic sensors for robotic welding, *Robotica* Volume 15, Issue 03, May 1997, pp 275-281, DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0263574797000313>
- [4] Kang-Yul Bae, Jin-Hyun Park: A study on development of inductive sensor for automatic weld seam tracking, *Journal of Materials Processing Technology* 176 (2006), pp 111-116.
- [5] Schrattecker J., Haderer A., Reinthaler G, Stelzer A.: Position Estimation of Lap Joints for Seam Tracking Applications at mm-Wave Frequencies 978-2-87487-029-3 © 2012 EuMA.
- [6] Agapakis J.: Vision-aided remote welding, Ph.D. Thesis MIT 1985.
- [7] Kawahara M.: Tracking control system using image sensor for arc welding, *Automatica* Volume 19, Issue 4, July 1983, pp 357-363.
- [8] Cegielski P.: Analiza uwarunkowań zapewnienia punktu roboczego narzędzia w zrobotyzowanych aplikacjach spawania MIG/MAG, Przegląd Spawalnictwa 8/2014.
- [9] Kania M.: Dobór optymalnej kamery do zadania wizyjnego, *Pomiary Automatyka Robotyka* 10/2014.
- [10] Hongbo Ma, Shanchun Wei, Tao Lin and Shanben Chen: Binocular vision system for both weld pool and root gap in robot welding process, *Sensor Review* 30/2 (2010) 116-123 Emerald Group Publishing Limited [ISSN 0260-2288] [DOI 10.1108/02602281011022706].
- [11] Ting Xue, Bin Wu: Reparability measurement of vision sensor in active stereo visual system, *Measurement* 49 (2014) 275-282.
- [12] Xizhang Chen, Shanben Chen, Houlu Xue: Comparison of Calibration Methods for Image Center, *Robotic Welding, Intelligence and Automation*, LNEE 88. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.
- [13] F. Liu: Research on the Laser Calibration Method for the Image Plane Center of the Visual Sensor, *Robot. Weld., Intellig. & Automation*, LNCIS 362. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.
- [14] Zaojun Fang, De Xu, Min Tan: A Vision-Based Self-Tuning Fuzzy Controller for Fillet Weld Seam Tracking, *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, Vol. 16, No. 3, June 2011.
- [15] De Xu, Zhiguo Yan, Zaojun Fang, Min Tan: Vision Tracking System for Narrow Butt Seams with CO<sub>2</sub> Gas Shielded Arc Welding, *Proceedings of the 5th International Conference on Automation, Robotics and Applications*, Dec 6-8, 2011, Wellington, New Zealand.
- [16] Hsing-Chia Kuo, Li-Jen Wu: An image tracking system for welded seams using fuzzy logic, *Journal of Materials Processing Technology* 120 (2002) 169-185.
- [17] Haiyong Chen, Fengxiang Lei, Guansheng Xing, Weipeng Liu, Hexu, Sun: Visual Servo Control system for Narrow Butt Sea, 978-1-4673-5534-6/13/\$31.00\_c 2013 IEEE.
- [18] Yanling Xu, Huanwei Yu, Jiyong Zhong, Tao Lin, Shanben Chen: Real-time seam tracking control technology during welding robot GTAW process based on passive vision sensor, *Journal of Materials Processing Technology* 212 (2012).
- [19] Jia Qin, Guohong Ma, Pei Liu: Image Processing Algorithm Of Weld Seam Based On Crawling Robot By Binocular Vision, 978-1-4244-9439-2/11/\$26.00 ©2011 IEEE.
- [20] Yanling Xu, Na Lv, Jiyong Zhong, Huabin Chen, Shanben Chen: Research on the Real-time Tracking Information of Three-dimension Welding Seam in Robotic GTAW Process Based on Composite Sensor Technology, *J Intell Robot Syst* (2012) DOI 10.1007/s10846-012-9672-y.
- [21] Fiertak P.: System wizyjny sterujący zrobotyzowanym stanowiskiem spawania wymienników ciepła.
- [22] Zhen Ye, Gu Fang, Shanben Chen, Mitchell Dinham: A robust algorithm for weld seam extraction based on prior knowledge of weld seam, *Sensor Review* 33/2 (2013) 125-133 [DOI 10.1108/02602281311299662].
- [23] Xiaogang Liu, Cunxi Xie: Arc-Light Based Real-Time Seam Tracking System in Welding Robot, 2007 IEEE International Conference on Control and Automation.
- [24] Yanling Xu, Huanwei Yu, Jiyong Zhong, Tao Lin and Shanben Chen: Real-time image capturing and processing of seam and pool during robotic welding process, *Industrial Robot: An International Journal* 39/5 (2012) 513-523.
- [25] Shanchun Wei, Meng Kong, Tao Lin, Shanben Chen: Three-dimensional weld seam tracking for robotic welding by composite sensing technology, *Industrial Robot: An International Journal* 38/5 (2011) 500-508.
- [26] Liguang Zhang, Jianbin Jiao, Qixiang Ye, Zhenjun Han, Wei Yang: Robust Weld Line Detection with Cross Structured Light and Hidden Markov Model, *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*.
- [27] Usamentiaga R., Molleda J., García D.: Fast and robust laser stripe extraction for 3D reconstruction in industrial environments, *Machine Vision and Applications* (2012) 23:179-196.
- [28] De Xu, Zaojun Fang, Haiyong Chen, Zhiguo Yan, Min Tan: Compact visual control system for aligning and tracking narrow butt seams with CO<sub>2</sub> gas-shielded arc welding, *Int J Adv Manuf Technol* (2012) 62:1157-1167.
- [29] Hongbo Ma, Shanchun Wei, Zhongxi Sheng, Tao Lin, Shanben Chen: Robot welding seam tracking method based on passive vision for thin plate closed-gap butt welding, *Int J Adv Manuf Technol* (2010) 48:945-953.

## ZAMÓW NEWSLETTER

Zapraszamy Państwa do zapisania się na NEWSLETTER Przeglądu Spawalnictwa, w tym celu należy wysłać e-mail z tematem "NEWSLETTER" na adres: [redakcja@pspaw.pl](mailto:redakcja@pspaw.pl)