

Metody wizyjne w robotyce (część II)

Vision methods in robotics (part II)

Streszczenie

W artykule przedstawiono zastosowanie systemów wizyjnych w robotyce, dokonano ich klasyfikacji, omówiono budowę oraz zadania systemów wizyjnych, zaprezentowano podstawowe przekształcenia cyfrowego przetwarzania obrazów.

Abstract

The article presents the application of vision systems in robotics as well as their classification, structure and functions along with fundamental transformations of digital image processing.

Akwizycja obrazu

Cyfrowe przetwarzanie obrazów (ang. *digital image processing*) definiowane jest jako wykonywanie serii operacji na numerycznej reprezentacji obrazu obiektu w celu uzyskania pożądanego rezultatu. Obraz cyfrowy modelowany jest przez spróbkowaną przestrzennie oraz skwantowaną amplitudowo dwuwymiarową funkcję generowaną przez układ optyczny [9].

Analogowy obraz rzutowany na płaszczyznę światłoczułą przetwornika optoelektronicznego kamery reprezentowany jest przez dwuwymiarową funkcję $F(x, y)$, której argumenty x i y opisują powierzchniowe współrzędne punktu obrazu, zaś wartość funkcji określona jest przez poziom jasności obrazu.

Obrazy przetwarzane przez komputer charakteryzują dwa komponenty:

- iluminacja* $i(x, y)$ – wielkość promieniowania świetlnego źródła, padającego na scenę $i(x, y)$
- odbicie* $r(x, y)$ – ilość światła odbitego przez obiekty sceny $r(x, y)$

Funkcja $F(x, y)$ może być opisana jako:

$$F(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y) \quad (1)$$

gdzie: $0 < i(x, y) < \infty$; $0 < r(x, y) < 1$

Zależność powyższa przedstawia, że odbicie $r(x, y)$ dla wartości 0 oznacza całkowitą absorpcję, zaś dla wartości 1 całkowite odbicie. Innym określeniem informującym o intensywności funkcji $F(x, y)$ jest pojęcie: „stopnia szarości” (ang. *gray level*), l , o współrzędnych (x, y) :

$$r_{\min} \cdot l_{\min} = L_{\min} \leq l \leq r_{\max} \cdot l_{\max} = L_{\max} \quad (2)$$

Przedział $[L_{\min}, L_{\max}]$ określa skalę poziomu jasności. W praktyce $L_{\min} = 0$, $L_{\max} = L - 1$. Wartość $l = 0$ oznacza czerń, natomiast $l = L - 1$ biel w skali szarości.

W celu dokonania operacji numerycznych obraz rzeczywisty należy przedstawić w postaci skończonej liczby wartości funkcji jasności. W związku z tym należy poddać go procesowi dyskretyzacji, składającemu się z procesów próbkowania i kwantowania. W ten sposób funkcja $F(x, y)$ o argumentach

zmieniających się w sposób ciągły zostaje zamieniona na macierz $F(i, j)$ o M wierszach i N kolumnach, której elementy zawierają skwantowane poziomy jasności, a każdej takiej próbce przypisana jest wartość intensywności ze zbioru skwantowanych dyskretnych wartości funkcji intensywności, reprezentowanych przez skończoną liczbę bitów.

$$F(i, j) \approx \begin{pmatrix} F(0,0) & \dots & F(0,0) & \dots & F(0,M-1) \\ F(1,0) & \dots & F(1,1) & \dots & F(1,M-1) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ F(N-1,0) & & F(N-1,1) & \dots & F(N-1,M-1) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Każdy element macierzy (3) określany jest jako *element obrazu*, *pel* lub *piksel*. Wartość funkcji luminancji obrazu cyfrowego $F(i, j)$ zawiera zbiór liczb całkowitych z przedziału $[0, 2^B - 1]$, gdzie B równe np. 8 jest przyjętą liczbą bitów dla reprezentacji jednego punktu obrazu. Dla typowych systemów wizyjnych stosowanych w automatyce górną granicą dokładności reprezentacji punktów obrazowych jest 256 poziomów szarości na jeden punkt (8 bitów/piksel). Najczęściej spotykane rozdzielczości stosowane w systemach czasu rzeczywistego mieszczą się w zakresie od 128x128 do 1024x1024 pikseli w obrazie. Specjalizowane systemy korzystają z jednej ustalonej rozdzielczości, zaś uniwersalne umożliwiają analizę obrazów o dowolnej rozdzielczości. Typowe rozdzielczości poziomu szarości reprezentowane są od 8 do 16 bitów na piksel.

Przekształcenia punktowe

Operacje punktowe wykorzystywane są głównie do poprawy kontrastu oraz jakości obrazu. Poprawę kontrastu obrazu można zrealizować za pomocą funkcji liniowych lub nieliniowych, które odwzorowują dany zbiór wartości poziomów szarości w inny. Funkcje liniowe mogą być zamodelowane równaniem prostej: $y = m \cdot x + b$, co oznacza że współczynnik jej nachylenia będzie decydował o rozciąganiu bądź kompresji wartości poziomów szarości. Modyfikacja wartości poziomów szarości odbywać się może również za pomocą funkcji nieliniowych. Zastosowanie *funkcji pierwiastkowej* lub *logarytmicznej* ma na celu podwyższenie kontrastu obrazu w obszarze małych wartości.

Funkcja logarytmiczna: $F'(i, j) = \ln(F(i, j) + 1)$

Funkcja pierwiastkowa: $F'(i, j) = \sqrt{F(i, j)}$

W efekcie uzyskuje się rozjaśnienie obrazu z silnym różnicowaniem najjaśniejszych partii. Przekształcenia jednopunktowe (operacje anamorficzne) wykonywane są zwykle z zastosowaniem tablicy LUT (ang. *look-up-table*), wykorzystującej z góry przygotowane tablice korekcji. Najprostszymi operacjami są: utworzenie negatywu, rozjaśnienie lub zaciemnienie wybranych punktów obrazu. Przekształcenie „look-up-table” nie zmienia geometrii obrazu [10]. Jednym z przykładów zastosowania tego przekształcenia jest normalizacja obrazu, która jest często wykonywana jako pierwsza operacja po przetworzeniu obrazu analogowego na postać cyfrową. Przekodowanie „look-up-table” może być również zastosowane do wyrównywania histogramu. Histogram określa liczbę pikseli o jasności i występującej na obrazie. Celem równoważenia histogramu jest poprawa kontrastu obrazu. Dla obrazu o N punktach zapisanych za pomocą M stopni szarości średnio przypada N/M punktów na każdy poziom szarości. Dążenie do takiego średniego rozkładu szarości obrazu poprawia jego ostrość. W efekcie obraz staje się bardziej wyrazisty i czytelny kosztem utraty części informacji o rzadko występujących poziomach szarości. Analiza histogramu stanowi krok do ilościowych oszacowań dotyczących struktury i zawartości obrazu. Może być zastosowana do stwierdzenia efektywności wykorzystania poziomów kwantowania przetwornika analogowo-cyfrowego. Inne, bardzo częste zastosowanie analizy histogramu to proces segmentacji obrazu, w którym kluczowe znaczenie ma wybór progów – wartości poziomów szarości wykorzystywanych do binaryzacji obrazu, prowadzących w efekcie do „wydobycia” poszczególnych obiektów obrazu.

Progowanie (binaryzacja)

Binaryzacja dotyczy jednego z największych problemów występujących w układach wizyjnych, mianowicie identyfikacji obiektów sceny. Ta operacja, która wydaje się tak naturalna i banalna dla człowieka, jest niezwykle skomplikowana i trudna dla komputera. Z operacją progowania związane jest radykalne zmniejszenie informacji zawartej w obrazie, ponieważ podczas jej realizacji dokonywana jest zamiana obrazu o wielu stopniach szarości na obraz, którego piksele mają wyłącznie wartość 0 lub 1. Za pomocą binaryzacji system realizuje jeden z końcowych etapów każdej ilościowej analizy obrazu, gdyż tylko na obrazach binarnych może dokonać podstawowych pomiarów, analiz oraz modyfikacji kształtów obiektów. Wynikiem przeprowadzenia operacji progowania jest podział obrazu na regiony, co z kolei stanowi etap poprzedzający analizę obrazu. Wykorzystując odpowiednią segmentację skali szarości obrazu, można uzyskać obraz binarny. W kontekście binaryzacji układów wizyjnych pojęcia segmentacji i progowania są synonimami. Podczas binaryzacji obrazu kluczową sprawą jest wybór odpowiedniego progu binaryzacji, T . Najczęściej w celu znalezienia właściwej wartości T wykonuje się histogram. Przyjmując dwugarbną krzywą jako dość często spotykany kształt histogramu, wyróżnić można skupiska pikseli o niskich i wysokich poziomach jasności. W takim przypadku wartość progu T należy tak ustalić, by przypadła na środek doliny, tj. między dwoma szczytami. Najczęściej wykorzystuje się następujące metody binaryzacji: z progiem dolnym, górnym, wielokryterialnym [8]. Progowanie rozpatrywane jako operacja dokonująca testowania wartości poziomu szarości funkcji $f(x,y)$ może zostać zaliczona do jednej z trzech kategorii: *progowanie globalne*, *lokalne* oraz *dynamiczne* [11].

Przekształcenia lokalne

Podstawowym celem przekształceń lokalnych jest zastosowanie technik uwydatniania lub retuszowania wartości

poziomów szarości sąsiadujących pikseli. Istnieje wiele podziałów przekształceń kontekstowych w zależności od wybranej kategorii klasyfikacji. Ogólnie przekształcenia te można podzielić na operacje związane z usuwaniem szumu, czyli operacje wygładzające, oraz operacje uwydatniające lub wyostrzające. Te pierwsze mają tendencję do „całkowania” obrazu, natomiast drugie do jego „różniczkowania”. Pomocną operacją w implementowaniu funkcji realizujących przekształcenia liniowe jest operacja konwolucji. Umożliwia ona zrealizowanie m.in. filtracji dolnoprzepustowych i górnoprzepustowych na obrazie, wygładzanie i wyostrenie obrazu, detekcję krawędzi obiektów analizowanego obrazu. Operację konwolucji zdefiniować można jako operator przekształcenia obrazu w obraz, przyjmujący jako argumenty dany punkt obrazu oraz jego otoczenie. W komputerowej analizie obraz jest funkcją dwuwymiarową i dyskretną [10].

Z uwagi na przyjętą organizację obrazu (kwadratowe piksele) typowe otoczenia dla operacji kontekstowych (tzw. maski) mają kształt okna kwadratowego. Rozmiary okien wahają się od 3x3 do 7x7 (rzadziej 9x9) pikseli w zależności od rozmiaru obrazu i wymaganego rezultatu operacji. Ogólnie można powiedzieć, że im większy rozmiar okna, tym bardziej radykalne działanie filtru. W praktyce okno o rozmiarze 3x3 jest zupełnie wystarczające. Zwiększenie rozmiaru maski daje większy kontekst, jednakże liczba wymaganych mnożeń i sumowań rośnie z kwadratem rozmiaru maski. Dodatkową wadą jest zmniejszenie rozmiaru obrazu wynikowego o $n-1$ linii i tyleż kolumn, gdzie n jest rozmiarem okna konwolucji.

Filtry dolnoprzepustowe

Do usuwania zakłóceń z obrazu wykorzystuje się filtry dolnoprzepustowe. Prostym filtrem dolnoprzepustowym jest filtr uśredniający. Usuwa drobne zakłócenia z obrazu: usuwane są pojedyncze czarne punkty na jasnym tle lub jasne plamki na tle ciemnym, wygładzane są drobne zawirowania krawędzi obiektów, usuwane mogą być efekty falowania jasności itp. Niekorzystnym działaniem filtru jest pewne rozmycie konturów obiektów i pogorszenie możliwości rozpoznania ich kształtów. W celu zmniejszenia negatywnych skutków filtracji uśredniającej stosuje się filtry uśredniające wartości pikseli w sposób ważony. Dla zachowania przedziału zmienności poziomu szarości obrazu należy każdorazowo zastosować współczynniki skalujące, sprowadzające wynik konwolucji do pierwotnego przedziału zmienności. Zwiększenie zakresu kontekstu (rozmiaru maski) powoduje znacznie skuteczniejsze działanie filtru kosztem większej „erozji” obrazu.

Filtry górnoprzepustowe

Celem filtrów górnoprzepustowych jest wyostrenie obrazu, czyli uwypuklenie krawędzi obiektów a także, zaakcentowanie oraz podkreślenie konturów obiektów na obrazie. Filtry górnoprzepustowe reagują na szybkie zmiany jasności. Dlatego są czułe na takie elementy obrazu jak kontury, krawędzie czy fakturę. Realizuje się je najczęściej za pomocą metod numerycznych aproksymujących pochodną. Do realizacji filtracji stosowane są najczęściej operatory (maski) Sobela, Prewitta i Robertsa. Uzyskane wyniki scala się za pomocą par masek kierunkowych, z wykorzystaniem operatora sumy, koniunkcji lub dodawania wektorowego. Dzięki takiemu złożeniu uzyskany wynik jest wrażliwy na kierunek i orientację krawędzi.

Druga pochodna reprezentowana jest za pomocą laplasjanu, który znajduje szerokie zastosowanie w przetwarzaniu obrazów ze względu na to, że zachowuje znak różnicy intensywności (znak krawędzi). Laplasjan jest symetryczny względem obrotu oraz jest operatorem liniowym.

Podsumowując, zasadniczą różnicą między gradientem a laplasjanem jest to, że gradient realizując pierwszą pochodną wrażliwy jest tylko na intensywność zmian rozkładu

du jasności w obrazie, w związku z tym służy wyłącznie do detekcji krawędzi. Laplasjan podaje dodatkową informację o położeniu piksela względem krawędzi. Mianowicie, czy piksel leży po jaśniejszej, czy po ciemniejszej stronie krawędzi.

Filtry nieliniowe

Zasada filtracji w przypadku filtrów nieliniowych polega na zmianie wartości poszczególnych pikseli na wartości wybrane według określonej reguły (spośród otoczenia każdego rozważanego piksela). Wybrana wartość punktu obrazu po przekształceniu jest jedną z wartości obecnych już w obrazie, ponieważ wybrana została z jego sąsiedztwa. W odróżnieniu od filtrów dolnoprzepustowych, uśredniających wartości rozważanego sąsiedztwa piksela, filtry nieliniowe nie wprowadzają nowych wartości pikseli, co niejednokrotnie jest przyczyną rozmazywania krawędzi i pogorszenia czytelności obrazu. Najczęściej spotykanym filtrem nieliniowym jest filtr wykorzystujący medianę, czyli wartość środkową w uporządkowanym rosnąco ciągu wartości jasności pikseli z rozważanego otoczenia piksela. Jest on szczególnie przydatny do eliminacji szumów. Dwie podstawowe zalety tego filtru można określić następująco:

- zachowuje ostrość krawędzi, ponieważ do obrazu wynikowego nie wprowadza się nowych wartości;
- jest filtrem „mocnym”, gdyż kilka wartości znacznie odbiegających od wartości pikseli analizowanego obrazu oraz lokalne szumy nie wpływają na uzyskany obraz wynikowy.

Wadą filtru środkowego jest długi czas obliczeń oraz erozja obrazu dla okien (masek) o dużych rozmiarach. W praktyce nie stosuje się większego otoczenia punktu obrazu niż 5x5 lub 7x7.

Na podobnej zasadzie oparte są dwa inne filtry: minimalny i maksymalny. Wynikiem ich działania są wartości odpowiadające kolejno minimum albo maksimum z lokalnego otoczenia punktu obrazu.

Filtracja morfologiczna (filtry nieliniowe)

Podstawową koncepcją morfologii matematycznej, wiodącej się z geometrii całkowitej i obliczeń prawdopodobieństw geometrycznych jest to, że istnienie struktury geometrycznej nie jest zjawiskiem całkowicie obiektywnym [12]. Struktura ta może ujawnić się jedynie w wyniku współdziałania obiektu badanego oraz narzędzi badawczych zwanych elementami strukturującymi (strukturalnymi), które modyfikują kształt obiektu, ujawniając jednocześnie jego strukturę. W przypadku obrazu binarnego element strukturalny jest pewnym wycinkiem obrazu z wyróżnionym jednym punktem, określanym jako punkt centralny, czyli jest pewnym podzbiorem obrazu.

Przekształcenia morfologiczne dzięki odpowiednio kombinowanemu zestawowi pozwalają na wykonywanie najbardziej złożonych operacji w zakresie analizy kształtu obiektów i ich wzajemnego położenia. Istotną różnicą między operacjami morfologicznymi a operacjami punktowymi i lokalnymi jest to, że przekształcenia morfologiczne dokonują zmian punktów obrazu wówczas, gdy otoczenie punktu zgodne jest z elementem strukturalnym. Oznacza to, że zmiana punktów następuje w momencie sprawdzenia wartości wyrażenia logicznego. Natomiast operacje punktowe transformują każdy punkt obrazu w taki sam sposób, bez względu na jego sąsiedztwo, zaś operacje lokalne uzależniają wynik od otoczenia danego punktu i przekształcenie wykonywane jest zawsze, nawet jeżeli wartość obrazu w danym punkcie nie ulegnie zmianie. Przekształcenia morfologiczne stanowią obszerną grupę operacji przydatnych podczas przetwarzania i analizy obrazu. Podstawowymi operacjami morfologicznymi są: erozja i dylatacja.

Erozję („pomniejszanie”) można zinterpretować jako filtr minimalny, który każdemu punktowi przypisuje minimum z wartości pikseli w jego otoczeniu. Podstawowe własności erozji:

- usuwa odizolowane punkty, drobne wyróżnione obszary oraz wąskie wypustki (półwyspy);
- wygładza brzegi figury, zmniejszając jej powierzchnię;
- w niektórych przypadkach prowadzi do podziału figury na kilka mniejszych, co znajduje zastosowanie w procesie podziału sklejonych obiektów przed ich segmentacją;
- wykonuje addytywność przekształcenia, co pozwala na jego prostą implementację w systemach komputerowych.

Dylatacja („powiększanie”) jest przekształceniem odwrotnym do erozji, jest negatywem erozji negatywu obrazu. Podobnie jak w przypadku erozji, dylatację można zdefiniować jako filtr maksymalny. Przeciwnie do erozji są również własności dylatacji:

- zamykanie małych otworów i wąskich zatok;
- zwiększanie powierzchni figury, co czasami prowadzi do sklepania sąsiadujących obszarów;
- addytywność przekształcenia oraz możliwość wpływu na wynik poprzez odpowiedni dobór elementów strukturalnych.

Przekształcenia erozji i dylatacji są bardzo często wykorzystywane do filtracji obrazów. Jeśli natura występujących szumów (zakłóceń) jest znana, wówczas właściwie dobrany kształt elementu strukturalnego oraz odpowiednia kolejność tych przekształceń może być użyta do ich usunięcia. Taka realizacja filtracji wpływa na kształt obiektów w obrazie. Istotną wadą operacji erozji i dylatacji jest zmiana powierzchni przekształcanych obszarów (erozja zmniejsza, dylatacja zwiększa). W celu eliminacji wspomnianej wady wprowadzono nowe przekształcenie będące złożeniem erozji i dylatacji. Operację erozji, po której następuje dylatacja, nazwano *otwarciami*: erozja + dylatacja = otwarcie, natomiast odwrotną kolejność przekształceń, tzn. dylatację, po której następuje erozja, zdefiniowano jako *zamknięcie*: dylatacja + erozja = zamknięcie.

Przekształcenia te pozwalają na wygładzenie brzegów przy równoczesnym zachowaniu wielkości figury. Otwarcie i zamknięcie są niezmiennie względem siebie. Oznacza to, że powtórne wykonanie tego samego przekształcenia nie wprowadza żadnych zmian. Stanowi to istotną różnicę od erozji i dylatacji, które są addytywne. W przypadku obrazów binarnych przekształcenia otwarcia i zamknięcia wykazują następujące właściwości:

- otwarcie usuwa drobne obiekty i drobne szczegóły (półwyspy, wypustki), nie zmieniając wielkości zasadniczej części figury, może też rozłączyć niektóre obiekty z przewężeniami;
- zamknięcie wypełnia wąskie wcięcia i zatoki oraz drobne otwory wewnątrz figury, nie zmieniając wielkości zasadniczej części figury, może też połączyć niektóre obiekty leżące blisko siebie;
- obydwie operacje nie zmieniają kształtów ani wymiarów dużych obiektów o wyrównanym gładkim brzegu.

Przekształcenia otwarcia i zamknięcia mogą być również wykorzystane do wyszukiwania lokalnych minimów oraz ekstremów. Lokalne maksima wyszukuje się, odejmując od wyniku otwarcia obraz źródłowy i następnie binaryzując obraz z dolnym progiem otrzymanej różnicy. Podobnie postępuje się podczas wyszukiwania lokalnych minimów, z tym że pierwszą operacją jest zamknięcie. Efektywność tych operacji jest uzależniona od wielkości otwarcia, zamknięcia oraz ustalonego progu binaryzacji. Rezultat tych operacji podobny jest do operatorów wykrywających krawę-

dzie (np. laplasjana).

Operacje morfologiczne stanowią obszerną grupę przekształceń, a zmiana kształtu elementów strukturalnych obdaruje wielkimi możliwościami w zakresie przetwarzania i analizy obrazu. Celem zaprezentowania ich możliwości omówiono dwie operacje morfologiczne: ścienianie i szkieletyzację.

Figura uzyskana po przekształceniu ścieniania mieści się we wnętrzu figury wyjściowej. Istotne znaczenie ma obracanie elementu strukturalnego o 90° pomiędzy kolejnymi obracaniem tej operacji. Pocienianie linii jest często stosowane po etapie segmentacji obrazu. Szkielet figury definiowany jest jako zbiór wszystkich jej punktów jednakowo odległych od co najmniej dwóch różnych punktów leżących na jej brzegu. Szkielet figury informuje o jej topologicznych własnościach. Szkieletyzacja jest przekształceniem polegającym na wyodrębnieniu szkieletów figur w analizowanym obrazie. Pozwala na określenie orientacji długich części oraz ich klasyfikację na podstawie kształtu. Przekształcenia morfologiczne obejmują szereg różnych operacji wykorzystywanych do przetwarzania i analizy obrazów. Szerokie możliwości zastosowań w tej dziedzinie, z uwagi na nieliniowość i interpretację struktury geometrycznej analizowanych obiektów, potwierdzają ich użyteczność. Filtry morfologiczne umożliwiają skuteczne usuwanie szumów z obrazu, jak również mogą być użyte do wykrywania krawędzi, ekstrakcji cech oraz kompresji obrazu. Operacje morfologiczne zostały omówione w pracach [8], [12], [13], [14]. Z uwagi na swoje zalety oraz krótszy czas przetwarzania w porównaniu z innymi przekształceniami lokalnymi operacje morfologiczne są powszechnie stosowane w systemach wizyjnych czasu rzeczywistego.

Przedstawione powyżej metody wstępnego przetwarzania wykonywane są w celu polepszenia jakości obrazu, wydobycia obiektu z tła za pomocą technik binaryzacji, detekcji krawędzi, ustalenia poziomów szarości pikseli należących do interesującego nas obiektu na podstawie histogramu itp. Generalnie ich zadaniem jest eliminacja zakłóceń oraz zaakcentowanie i uwydatnienie elementów obrazu istotnych z punktu widzenia analizy obrazu.

Analiza obrazu

Analiza obrazu może być zdefiniowana jako jedna z dziedzin widzenia komputerowego zorientowana w kierunku interpretacji treści danych obrazowych [15]. Istota analizy obrazu polega na znalezieniu takiego opisu obrazu, który w skróconej formie informuje o wszystkich istotnych cechach obiektów stanowiących jego treść. Proces ten obejmuje [4]:

- segmentację – wydzielenie obiektów obrazu z tła,
- ekstrakcję cech – pole powierzchni, środek ciężkości itp.,
- określenie lokalizacji obiektu.

Należy nadmienić, że etapowi analizy obrazu towarzyszy drastyczne zmniejszenie informacji wizyjnych, ponieważ w jej wyniku, zamiast obrazu cyfrowego o często milionowych ilościach bajtów, otrzymuje się kilkadziesiąt lub kilkaset bajtów reprezentujących wartości uzyskanych parametrów niosących informacje o przetwarzanych obiektach obrazu. Oznacza to, że rezultatem analizy obrazu nie jest obraz cyfrowy, jak po etapie wstępnego przetwarzania obrazu, lecz jego symboliczny i ilościowy opis w postaci cech wyróżnionych obiektów. Wybór cech jest subiektywną decyzją podejmowaną przez projektanta systemu wizyjnego, zależną od zadań, jakie ten system powinien realizować.

Techniki segmentacji obrazu

Segmentacja jest czynnością łączącą etap wstępnego przetwarzania obrazu z algorytmami analizy obrazu. Istotą

procesu segmentacji jest wydobycie poszczególnych obiektów obrazu wchodzących w jego skład. Polega to na podziale obrazu na jednorodne niezachodzące na siebie obszary (regiony) odpowiadające poszczególnym widocznym obiektom. Formalnie segmentację można zdefiniować [16] jako metodę podziału obrazu $f(x,y)$ na regiony R_1, \dots, R_k , takie że każdy z nich może być rozpatrywany jako obiekt. Region definiowany jest jako podzbiór obrazu.

Wyróżnić można dwa podstawowe cele segmentacji [17]. Pierwszym jest dekompozycja obrazu na części celem dalszej analizy. W tym przypadku środowisko może być wystarczająco dobrze kontrolowane, tak aby proces segmentacji pewnie ekstrahował tylko te części obrazu, które są konieczne do dalszej analizy. Drugi cel procesu segmentacji polega na wykonywaniu zmian reprezentacji obrazu. Piksele obrazu muszą zostać zorganizowane w jednostki wyższego poziomu, które są albo bardziej znaczące, albo bardziej wydajne do dalszej analizy, albo też muszą spełniać obydwa wymagania jednocześnie. Generalnie, segmentacja może być realizowana jako proces przypisywania pikseli do obiektów, albo jako wyszukiwanie krawędzi między obiektami (lub między obiektami i tłem). Biorąc pod uwagę pierwszą kategorię, wyróżnia się dwie techniki segmentacji zorientowanej regionowo [4], [18]:

- segmentacja przez *rozrost* obszaru (ang. *region growing*),
- segmentacja przez *podział* i *scalanie* obszaru (ang. *region splitting&merging*).

W aplikacjach widzenia maszynowego czynnością poprzedzającą proces segmentacji jest filtracja obrazu oraz analiza histogramowa, dokonywana w celu binaryzacji obrazu. Analiza histogramowa określa przedziały wartości funkcji intensywności – progi, według których wykonywana będzie klasyfikacja każdego elementu obrazu i w zależności od metody segmentacji tworzone będą obszary (regiony) odpowiadające obiektom analizowanego obrazu.

Segmentacja przez rozrost obszaru polega na grupowaniu pikseli w oparciu o test jednorodności jego sąsiedztwa. Sąsiadujące piksele są grupowane, jeśli ich wartości mieszczą się w przyjętym zakresie. Proces rozpoczyna się od wybrania wyróżnionego elementu obrazu i określeniu, czy sąsiadujące piksele należą do tego samego obszaru; jeśli tak, to są one agregowane (rozrost jest kontynuowany) do momentu, kiedy już więcej pikseli nie może być dołączonych do obszaru.

Drugą wyróżnioną techniką segmentacji jest segmentacja przez podział obszaru. W przypadku tej techniki obraz kolejno dzielony jest na coraz mniejsze obszary, w których piksele mają odpowiednią własność. Obraz dzielony jest na mniejsze obszary tak długo, dopóki wszystkie piksele w każdym z utworzonych obszarów nie spełnią przyjętego predykatu. Po zakończeniu procesu podziału obrazu, stykające się obszary spełniające wymagania przyjętego kryterium są scalane w coraz większe nowe regiony. Proces scalania połączonych obszarów kontynuowany jest do momentu, kiedy już dalsze łączenie staje się niemożliwe. Metoda polegająca wprawdzie na podziale obrazu na mniejsze obszary, a następnie na łączeniu obszarów stykających się, nazywana jest segmentacją przez *podział* i *scalanie*.

Odmiernym rodzajem segmentacji jest segmentacja metodą wykrywania krawędzi. Poprzednie sposoby realizacji segmentacji bazowały na podziale obrazu na zbiory punktów wewnętrznych i zewnętrznych. W tej metodzie w celu wyszukania krawędzi między obszarami wyznacza się amplitudę operatora gradientu. Następnie na gradiencie wykonywana jest operacja progowania. Celem kolejnego etapu jest dokonanie połączeń między pikselami, które zostały zakwalifikowane jako krawędzie obszarów. Połączone piksele muszą formułować krzywą zamkniętą. Często spotykaną metodą jest rozpatrywanie róż-

nic między dwoma grupami elementów. Metody segmentacji oparte na technikach wykrywania krawędzi są bardzo czułe na zakłócenia i mają tendencję do ich uwydatniania. Niewątpliwą zaletą segmentacji zorientowanej regionowo jest zapewnienie ciągłości krawędzi w porównaniu z detektorami krawędzi, które nie dają takich gwarancji. Uzyskanie zamkniętych granic obszarów wykorzystywane jest przez procesy dokonujące rozpoznawania obrazów (wizja wysokiego poziomu).

Wydobycie cech

Wydobycie cech jest następnym etapem po procesie segmentacji obrazu. W tej fazie dokonywany jest pomiar obiektów tworzących treść obrazu. Pomiar jest wartością pewnej ilościowej własności obiektu. Generalnie cecha obrazu może być zdefiniowana jako dowolna mierzalna zależność zachodząca w obrazie [19].

W wyniku procesu wydobycia cech obrazu uzyskuje się zbiór cech opisujący określone własności obiektu. Ta drastyczna redukcja ilości informacji obrazowej (w porównaniu z obrazem źródłowym) reprezentuje niezbędne dane konieczne do etapu rozpoznawania obiektów (wizja wysokiego poziomu). Pozwala również na wyodrębnienie dwóch kategorii obiektów: obiektów znanych lub nieznanymi. W tej fazie tworzona jest n -wymiarowa przestrzeń, w której umieszczone są wszystkie możliwe wektory cech. Zadaniem fazy klasyfikacji jest podjęcie decyzji, do której grupy należy każdy z wyróżnionych obiektów. Każdy obiekt przypisany jest do jednej z kilku wcześniej zdefiniowanych klas reprezentujących wszystkie możliwe typy obiektów. Powszechnie stosowane techniki rozpoznawania obrazów oparte są na wykorzystaniu sieci neuronowych, metod rozmytych oraz metod odległościowych. Wnioskowanie może również zostać wykonane już na podstawie uzyskanych cech [20].

Pomiar obiektów stanowiących treść obrazu może się odbywać za pośrednictwem metod momentowych oraz współczynników kształtu. Współczynniki kształtu generalnie informują o rozmiarze obiektu, są mało wrażliwe na powiększenie, dużą wrażliwość wykazują na orientację obiektów. Natomiast momenty geometryczne są niewrażliwe na zmiany kształtów, zawierają dane dotyczące położenia i orientacji obiektów wyróżnionych w procesie segmentacji [4], [19], [21], [22]. Uzyskane dane mogą być wykorzystane do układów sterowania lub jako dane decyzyjne dla układów rozpoznających i samouczących się. Powszechnie stosowane jest połączenie tych metod, pomimo opinii, że wykorzystanie metod momentowych, charakteryzujących się szybkimi algorytmami obliczeń, daje lepsze rezultaty w porównaniu ze współczynnikami kształtu.

Współczynniki cieszą się powszechną popularnością wśród konstruktorów systemów wizyjnych. Niewątpliwą ich zaletą jest fakt, że mogą być wykorzystane do identyfikacji obiektów [4], co pozwala na ominięcie złożonych algorytmów rozpoznawania obrazów. Opis wszystkich współczynników oraz metody ich wyznaczania i zastosowań przedstawiono w pracach [4], [23], [24].

Omówione techniki przetwarzania obrazów oraz ich analizy są charakterystyczne dla dwuwymiarowych systemów wizyjnych. Natomiast trójwymiarowe bezdotykowe metody optyczne operujące na danych wizyjnych mogą zostać podzielone na dwie kategorie systemów: aktywne oraz pasywne. Pierwsze w celu pomiaru głębi wykorzystują dodatkowe urządzenia (np. lasery, projektory LCD) do generowania odpowiednio uformowanego światła (np. w postaci regularnej kraty), drugie zaś dokonują pomiaru głębi na podstawie dostarczonych sekwencji obrazów z jednej lub więcej kamer. Techniki pasywne do realizacji pomiaru kształtu przedmiotu wymagają jedynie światła już istniejącego w badanej scenie.

Zaletą metod aktywnych jest ich bardzo duża dokładność, wadą zaś bardzo duży koszt. Oprócz tego metody te są zupełnie nieczułe na zróżnicowania tekstury w scenie. Wiele systemów stanowi kombinację pasywnych urządzeń obrazujących (jedna lub więcej kamer) oraz aktywnych urządzeń (lasery/projektory LCD) skalibrowanych wzajemnie.

Wybrane przykłady zastosowań systemów wizyjnych w robotyce

Połączenie technik wizyjnych z robotem to zaopatrzenie go w złożony mechanizm sensora umożliwiającego inteligentną odpowiedź maszyny na zdarzenia występujące w otaczającym go środowisku. Wykorzystanie systemów wizyjnych oraz innych sensorów wywołane jest przez ciągłą potrzebę zwiększenia elastyczności oraz zakresu aplikacji robotyki. Chociaż czujniki odległości, dotykowe, siły odgrywają znaczącą rolę w udoskonalaniu osiągnięć robotów przemysłowych, to jednak techniki wizyjne uznawane są ciągle za jego najbardziej wydajne i wyróżniające się największym potencjałem sensory. Widzenie robotów to proces wydobycia, identyfikacji i interpretacji informacji pozyskanych z obrazów trójwymiarowej sceny. Dwu- oraz trójwymiarowy system wizyjny robota należy do standardowych bezdotykowych systemów pomiarowych do lokalizacji obiektów i ich identyfikacji. Dostarcza rzeczywistych informacji o położeniu i orientacji oraz zmianach położenia dowolnych części. Podstawową korzyścią systemów wizyjnych robotów jest ich zdolność „inteligentnej” lokalizacji i rozpoznawania części w przestrzeni trójwymiarowej za pomocą jednej lub większej liczby kamer. Kamery mogą być stacjonarne, np. zamontowane na stałe nad stanowiskiem roboczym, lub mobilne, jako ruchome systemy śledzące lub umieszczone na ramieniu robota. W związku z tym kluczowym elementem staje się kalibracja systemu wizyjnego z robotem. Dlatego wyróżnia się dwa rodzaje systemów wizyjnych: dedykowanych dla danego typu robota oraz ogólnego przeznaczenia. W przypadku tych ostatnich inteligentna kamera wyznacza położenie części, a następnie podaje instrukcje do ramienia robota, który pobiera zlokalizowany obiekt. Natomiast w systemach dedykowanych sterownik robota dokonuje kalibracji systemu wizyjnego oraz robota w jednym wspólnym układzie współrzędnych. Co oznacza, że lokalizacja części jest określona również w tej samej przestrzeni co programowanie robota. Jest to najlepszy sposób kalibracji systemu wizyjnego i robota.

Najczęstsze obszary zastosowań systemów wizyjnych w działach związanych z przemysłem dotyczą: 69% Inspekcja, weryfikacja produktów; 68% Produkcja (procesy dyskretnie); 62% Produkcja (procesy ciągłe); 61% Pomiar geometryczny; 57% Systemy pakujące; 52% Rozpoznawanie znaków; 49% Zliczanie produktów; 40% Robotyka; 38% Kontrola ruchu; 33% Diagnostyka, testowanie, utrzymanie ruchu; 22% Sprzęt drukujący, procesy sieciowe Web; 20% Sterowanie maszyn, sprzęt CNC; 20% Kontrola, dozór i akwizycja danych; 12% Ciągłe przetwarzanie produktów; 12% Sprzęt do przenoszenia produktów lub elementów (windy, dźwigi, wyciągarki); 3% Inne (Źródło: Badania Control Engineering oraz Reed Corporate Research i ankieta APA).

Z przedstawionego zestawienia wynika, że systemy wizyjne w przemyśle najczęściej znajdują zastosowanie w weryfikacji i kontroli jakości wykonania produktów. Jak też przy pomiarach cech obiektów: określaniu wymiarów, położenia i orientacji, uporządkowania części, dozoru itp., zliczaniu produktów i rozpoznawaniu znaków. Znaczne zastosowanie znajdują w paletyzacji i pakowaniu, w robotyce oraz syste-

mach sterowania i kontroli ruchu. Użycie systemów wizyjnych umożliwia wykrycie wad produktów już w początkowym etapie ich wytwarzania, a identyfikacja przyczyn pozwala na bieżąco eliminować wyroby wadliwe. Prowadzi to do ograniczenia strat i zwrotu nakładów poniesionych na wdrożeniu systemu.

W tradycyjnej dziedzinie przemysłu zrobotyzowanego dominują aplikacje z tzw. grup trzy D (ang.: *dull, dirty, dangerous*: nudny, brudny, niebezpieczny) oraz 3 H (ang.: *hot, heavy, hazardous*; gorący, ciężki, ryzykowny) wpływające na wzrost wydajności i jakości, a redukujące koszty przy jednoczesnym zapewnieniu wzrostu ergonomii i bezpieczeństwa pracowników. Z dostępnych dla robotyki czujników, systemy wizyjne oferują największy zasób informacji w celu automatyzacji wyżej wymienionych procesów. Aplikacje, w których systemy wizyjne i roboty mogą pomyślnie współpracować, obejmują: przenoszenie materiałów, spawanie, operacje obróbki skrawaniem, czynności lakiernicze, automatyczny montaż części, kontrolę jakości i identyfikację części. Systemy wizyjne w robotyce są stosowane począwszy od przemysłu motoryzacyjnego, lotniczego, hutniczego, aż po przemysł spożywczy, chemiczny, farmaceutyczny czy włókienniczy.

W zależności od wymagań aplikacji w robotyce typowe użycie systemów wizyjnych [4, 5, 17, 21] ma na celu lokalizację analizowanych obiektów w przestrzeni dwu- lub trójwymiarowej. Wyposażony w „inteligencję” robot podejmuje obiekt i przenosi go na inne stanowiska robocze maszyn lub urządzeń. Obiekty mogą być umieszczane w przestrzeni roboczej losowo lub dokładnie pozycjonowane, umieszczane na stosach, w rurach, otworach, skrzyniach, na paletach, przenośnikach itp. Zrobotyzowane stanowiska wyposażone w systemy wizyjne wykorzystują informacje o dwu- lub trójwymiarowej lokalizacji obiektów do dalszego przetwarzania.

Typowe zastosowania dwu- lub trójwymiarowych systemów wizyjnych robotów to: załadunek/rozładunek pras, maszyn przetwórczych, stojaków, skrzyń, palet, kontenerów; montaż szyb, dachów, nadwozi, kokpitów; tankowanie pojazdów stacjonarnych oraz w ruchu; montaż kół pojazdów stacjonarnych oraz w ruchu; sortowanie elementów losowo rozłożonych na podajniku taśmowym; pomiary cech obiektów dwu- i trójwymiarowych oraz ich identyfikacja i klasyfikacja; rozpoznawanie wzorców; kontrola ułożenia elementów na płycie drukowanej (przed procesem lutowania) oraz kontrola gotowego zespołu; trójwymiarowa rekonstrukcja analizowanych obiektów; monitorowanie kolizji; sterowanie robotów frezujących, szlifujących, malujących, spawających, tnących laserowo itp.; sterowanie systemami nadruku i etykietowania; pozycjonowanie w systemach transportowych; sterowanie urządzeniami pakującymi; sterowanie w aplikacjach spawania, klejenia, uszczelniania; sterowanie robotami nitującymi; sterowanie dźwigami transportowymi; sterowanie procesami kucia, tłoczenia; nawigacja i sterowanie maszynami i robotami rolniczymi itp. Złożone zadania towarzyszące robotom mobilnym mogą być osiągnięte z dużym stopniem autonomii, niezawodności wykonywanych operacji oraz interakcji z operatorem przy pomocy systemów wizyjnych. Umożliwiają one dynamiczną eksplorację środowiska, nawigację, budowanie mapy oraz wizyjne sterowanie różnymi układami śledzącymi. Donajbardziej popularnych aplikacji w zrobotyzowanym przemyśle krajowym spośród wymienionych należą paletyzacja, czynności manipulacyjne oraz spawanie.

Jedną z najwcześniejszych specyficznych aplikacji trójwymiarowych systemów wizyjnych było spawanie. Do określenia zakresu danych w osi Z (głębokości) wykorzystano światło strukturalne. W przypadku spawania zastosowanie systemów wizyjnych podyktowane było wymaganiami bezpieczeństwa przemysłu lotniczego. Obecnie systemy wizyjne dedykowane spawaniu są podstawą do pełnej automatyzacji stanowisk

spawalniczych poprzez ich integrację ze zrobotyzowanymi oraz w pełni elastycznymi systemami automatyki. Takie systemy nie wymagają ciągłego nadzoru oraz regulacji systemów sterowania, ponieważ dostosowane są do wysokich wymagań jakości oraz wydajności produkcji.

Spawalnicze systemy wizyjne ogólnie bazują na gromadzeniu danych pozyskanych ze światła strukturalnego lub z lasera (czujnika odległości). W aktywnych metodach z użyciem oświetlenia strukturalnego do rzutowania pod znanym kątem odpowiednio uformowanego światła np. w postaci pojedynczej lub wielu linii, kraty lub okręgów stosuje się diody laserowe. Zasada triangulacji umożliwia określenie odległości wzdłuż osi Z. W przypadku laserowych czujników odległości, wiązka lasera przemieszczając się w czasie kolejne warstwy ściągów spoiny określa ich lokalizację w przestrzeni trójwymiarowej względem głowicy lasera. W obu przypadkach systemy eliminują wszystkie długości fal skojarzone z procesem spawania za pomocą odpowiednio nastawianych filtrów. Po filtracji optycznej do analizy dostarczane jest światło o długości fali odpowiadającej użytemu laserowi. Również zastosowany obiektyw kamery o odpowiednio dobranej ogniskowej oraz polu widzenia zawęża analizę do typu oraz rozmiaru spoiny.

Kooperacja systemów wizyjnych z robotami spawalniczymi zapewnia kompensację błędów pozycjonowania robota podczas wykonywania czynności manipulacyjnych, mocowania części, narzędzi oraz przedmiotów obrabianych. Spawalnicze systemy wizyjne potrafią lokalizować spoinę, eliminując niepewności pozycjonowania punktu startowego z dokładnością nawet poniżej 25 mikronów. Umożliwiają monitorowanie wybranych punktów wzdłuż szwu spoiny, jej szerokości oraz głębokości w celu sterowania parametrami spawania. Systemy wizyjne śledzące proces spawania w czasie rzeczywistym dostarczają informacji o położeniu kolejnych warstw spoiny. W tym celu synchronicznie przemieszczają kamerę z palnikiem spawalniczym wzdłuż złącza spawanego. Umożliwia to nie tylko śledzenie złącza, ale również zapewnia, że złącze jest właściwie wypełnione żadaną ilością przejść palnika. Poprzez monitorowanie szerokości oraz głębokości spoiny systemy te w czasie rzeczywistym dostarczają sygnały sprzężenia zwrotnego w celu kompensacji zmiennych parametrów spawania, czy odchyłek wymiarowych wynikłych z termicznych dystorsji towarzyszących procesowi spawania. Prędkość spawania oraz predykcja odległości w trakcie śledzenia wykorzystywane są do wyznaczania pionowych oraz poziomych odchyłek w celu utrzymania palnika wzdłuż ścięgu. Niektóre z tych systemów pozwalają również na monitorowanie profilu ścięgu spoiny oraz na wykrywanie defektów. Ogólnie prędkość spawania z wykorzystaniem tych systemów waha się w zakresie 3÷4 m/min, ale niektóre z nich umożliwiają uzyskanie prędkości spawania nawet do 25 m/min. Typowe dokładności pozycjonowania wynoszą 0,1 mm.

Wiele komercyjnych spawalniczych systemów wizyjnych dedykowanych jest dostępnym robotom ABB, Adept, Comau, Fanuc, KUKA, Motoman, Nachi itp. Z uwagi na różnorodność spawalniczych systemów wizyjnych ich stosowanie dopasowane jest do specyficznych aplikacji. Np. niektóre są dopasowane do spawania materiałów cienkich, inne grubych, niektóre do spawania rur grubościennych, a inne do przewodów rurowych. Niektóre lepsze są dla pewnych technologii spawania, typu: MIG, TIG, SAW, plazma, laser itp. Rodzaj technik przetwarzania i analizy obrazów ekstrakcji cech realizowanych przez system wizyjny może zależeć od typu i cechy złącza (jak krawędź arkusza blachy, szczelina, niedopasowanie, położenie pionowe lub poziome, orientacja itp.). Stąd przed wyborem systemu wizyjnego zasadniczą rzeczą jest zrozumienie wymagań aplikacji. Systemy do kontroli jakości złącza spawanego w trakcie jego tworzenia dokonują

weryfikacji geometrycznego profilu ściegu oraz identyfikują pewne wady na podstawie kryteriów: niedopasowania/przestawienia szczeliny, szerokości ściegu, szerokości rowka, wypukłości/wklęsłości, nachylenia spoiny, podtopienia, przegrzania, wklęsnięcie grani, wycieków itp.

Dla przykładu podano niektóre prace badawcze poświęcone automatyzacji procesu spawania z użyciem systemów wizyjnych. W pracy [25] zaprezentowano inspekcyjny system wizyjny do automatycznego procesu spawania z wykorzystaniem lasera. Artykuł przedstawia metodę weryfikacji szerokości ściegu oraz błędu spawania powierzchni w procesie automatycznego spawania opartą na technice aktywnej triangulacji. Do eliminacji szumów z obrazu użyto filtru medianowego oraz binaryzacji dwuprogowej. Aplikacja systemu wizyjnego w sterowaniu dynamiką zmian kształtu jeziora spawalniczego omówiona została w pracach [26], [27], zaś w [28] sformułowano model sterowania z wizyjnym sprzężeniem w przód robotem z głowicą spawalniczą poprzez pozyskanie obrazu jeziora spawalniczego w celu detekcji odstępu rowka między częściami spawanymi. Wykorzystanie sygnału wizyjnego w pętli sprzężenia zwrotnego do pomiaru szerokości jeziora spawalniczego w czasie rzeczywistym z zastosowaniem korelacji obrazów zademonstrowano w pracy [29]. W efekcie osiągnięto poprawę jednorodności i powtarzalności spoiny. Wprowadzenie metod umożliwiających poprawę zdolności adaptacyjnych oraz zwiększenie odporności układów sterowania wizyjnego procesem spawania łukowego za pomocą robota Yaskawa UP6 omówiono w pracy [30]. Autorzy skupili się na dwóch zagadnieniach: algorytmach przetwarzania obrazów oraz metodach sterowania wizyjnego. W celu usunięcia zakłóceń spowodowanych rozbrzygniawaniem łuku, silnych odbić, szumów z obrazów spoiny, z udziałem światła strukturalnego zaproponowano techniki wyznaczania tła oraz adaptacyjną binaryzację wielokryterial-

ną. Do ekstrakcji cech szwu spoiny zastosowano transformację Hotelinga, filtrację z udziałem logiki rozmytej, a do detekcji linii transformację Houhga. Do układu sterowania robotem spawającym wprowadzono hybrydowy układ sterowania z wizyjnym sprzężeniem zwrotnym. Zaproponowane algorytmy przetwarzania obrazów umożliwiły ekstrakcję szwu spoiny, natomiast hybrydowy układ sterowania wizyjnego zapewnił, w czasie rzeczywistym, śledzenie procesu spawania nawet w przypadku pewnych błędów kalibracji kamery i lasera.

W artykule [31] zaprezentowano wykorzystanie technik wizyjnych do poprawy jakości obrazu, usunięcia szumów i zakłóceń oraz śledzenia ściegu spoiny z użyciem filtrów dolno- oraz górnoprzepustowych, filtru medianowego, gradientowych detektorów krawędzi, omówiono rolę segmentacji obrazów oraz algorytmów logiki rozmytej w rozpoznawaniu szwu spoiny. Inne prace odnoszące się do technik rozpoznawania oraz śledzenia ściegu i łączenia spoin lub rozpoznawania spoiny z zastosowaniem technik wizyjnych współpracujących m.in. ze zrobotyzowanymi stanowiskami przedstawiono w pracach [31÷34]. W pracy [35] opisano opracowany zrobotyzowany system do rozpoznawania i śledzenia spoin z wykorzystaniem algorytmów analizy obrazów. Główny element systemu stanowił aktywny układ wizyjny, składający się z dwóch kamer oraz oświetlacza laserowego. System za pomocą algorytmu identyfikacji śledził dowolne, trójwymiarowe spoiny w przestrzeni, z wysoką precyzją, zachowując stałą prędkość, odległość oraz orientację względem powierzchni spoiny.

Teorię psychologii poznawczej do automatyzacji procesu spawania z możliwością użycia technik wizyjnych wspomagających rozpoznawanie prezentują prace [36, 37]. Natomiast do ręcznego treningu spawania, wizualizacji i analizy zachowania spawacza oraz monitorowania jakości spoiny w pracach [38, 39] proponowane jest użycie wielu systemów wizyjnych wyposażonych w dodatkowe sensory.

Podsumowanie

Wykorzystanie systemów wizyjnych oraz innych sensorów wynika z ciągłej potrzeby zwiększenia elastyczności oraz zakresu aplikacji robotyki. Istotnym argumentem stosowania systemów wizyjnych robotów są rosnące wymagania odbiorców, szczególnie dotyczące jakości i powtarzalności produkcji. Systemy wizyjne zintegrowane z robotami doskonale uzupełniają proces technologiczny i rozszerzają jego możliwości.

Spawalnicze systemy wizyjne są technologią sprawdzoną w trudnym środowisku. Korzyści płynące z ich zastosowania mogą być następujące: zwiększa się jakość i spójność spoiny oraz wydajność, zmniejszają się koszty produkcji oraz niekorzystny wpływ na środowisko, redukuje się ilość wyrobów wybrakowanych i przerobczych.

Innym aspektem jest konieczność walki z niedoborem wykwalifikowanych spawaczy prowadzonej przez niektóre spółki. Systemy eliminują typowe błędy interpretacji i niekonsekwencji obsługi. Maleje ryzyko przyjęcia spoiny o niskiej jakości lub konieczności wykonywania poprawek, co prowadzi do spadku kosztów produkcji. Zrobotyzowane systemy śledzące i nadzorujące proces spawania redukują ilość zbyt grubych spoin, generują mniej odpadów materiałów spawalniczych. Zmniejsza to koszty pracy związane np. z późniejszym procesem szlifowania spoiny.

Innym profitem wynikającym z zastosowania systemów wizyjnych jest zarówno obserwacja trendów, jak i wdrażanie programów poprawy analizowanego procesu.

Zaletą jest również opcja monitoringu i automatycznej archiwizacji obrazów procesu spawania wraz z odpowiadającym mu zestawem parametrów. Niewątpliwą korzyścią z połączenia technik wizyjnych z robotami jest zwiększenie wydajności produkcji i jakości wyrobów, a tym samym uzyskanie większych profitów finansowych. W przypadku robotów spawalniczych wzrost ten jest do pięciu razy większy w porównaniu z metodami półautomatycznymi lub ręcznymi. Czas zwrotu inwestycji w zrobotyzowany system może nastąpić nawet w przeciągu jednego lub dwóch lat po wdrożeniu (dotacje Unii Europejskiej z funduszy na wsparcie inwestycji dla małych i średnich przedsiębiorstw).

Obecne architektury systemów wizyjnych dzięki nowoczesnym generacjom urządzeń wchodzących w ich skład charakteryzują się dużym stopniem integracji oraz dużymi mocami obliczeniowymi. Ma to decydujący wpływ na ich elastyczność oraz jakość działania. Cechuje je łatwość użycia, obsługi oraz szybkość działania, możliwości samouczenia się oraz niezawodność oprogramowania.

W połączeniu z szybkimi interfejsami ze sterownikiem robota umożliwiają wykonywanie bardzo zaawansowanych zadań i pozwalają na rozszerzenie możliwości produkcyjnych. Odpowiadają na nowoczesne wyzwania zrobotyzowanych systemów przemysłowych. Kompaktowe kamery i oświetlenie zintegrowane z robotem lub jego narzędziem roboczym wyróżniają się odpornością na drgania i duże przyspieszenia. Wykorzystywane w robotyce narzędzia i uchwyty mocujące są przystosowane do bardzo szybkiej wymiany. Wiele zakładów stosuje wielostanowiskowe stoły

obrotowe, na których mogą być mocowane różnorodnie elementy. Komponenty mocujące narzędzie w kiści są zaprojektowane tak, aby pozwalały na szybką ich zmianę przez operatora lub robota. Systemy wizyjne stosowane w prawie wszystkich sektorach przemysłu stają się głównym czynnikiem

ekonomicznym automatyzacji przemysłu. Ilość możliwości aplikacji z ich użyciem rośnie wykładniczo. Świadczy o tym wielkość ich sprzedaży, która wzrosła w ostatnich latach o ponad 30%, a koszty wdrożenia systemu spadły nawet o 25% w ciągu ostatnich kilkunastu lat.

Literatura

- [1] Woźnicki J.: Podstawowe techniki przetwarzania obrazu, WKŁ, Warszawa, 1996.
- [2] Pavlidis T.: Grafika i przetwarzanie obrazów, WNT, Warszawa, 1987.
- [3] Horn B.K.P.: Robot vision, The MIT Press, Cambridge, London, 1986.
- [4] Tadeusiewicz R.: Systemy wizyjne robotów przemysłowych, WNT, Warszawa, 1992.
- [5] Kohut P.: Zastosowanie analizy obrazu do pomiaru przemieszczeń, Diagnostyka procesów przemysłowych, VI Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna: Pomorskie Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Władysławowo, 15–17 września 2003.
- [6] Kohut P.: Prototypowanie układów sterowania wizyjnego z wykorzystaniem procesorów sygnałowych, Rozprawa doktorska, AGH, Kraków, 2002.
- [7] Wiatr K.: Akceleracja obliczeń w systemach wizyjnych, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2003.
- [8] Tadeusiewicz R., Korohoda P.: Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów, FPT, Kraków, 1997.
- [9] Castleman K.: Digital image processing, Prentice Hall, Upper Saddle River, 1996.
- [10] Wiatr K.: Architektura potokowa specjalizowanych procesorów sprzętowych do wstępnego przetwarzania obrazów w systemach wizyjnych czasu rzeczywistego, Wydawnictwa AGH, Kraków, 1998.
- [11] Ali Sayed Amuni: Image binaryzation and contour analysis and recognition, Ph.D. Thesis, AGH, Kraków, 1999.
- [12] Nieniewski M.: Morfologia matematyczna w przetwarzaniu obrazów, PWN, Warszawa, 2000.
- [13] Weeks A.R.: Fundamentals of electronic image processing, IEEE, Inc., New York, 1996.
- [14] Wojnar L., Majorek M.: Komputerowa analiza obrazu, Fotobit, Kraków, 1994.
- [15] Klette R., Zamperoni P.: Handbook of image processing operators, John Wiley&Sons Ltd., New York, 1996.
- [16] Jain R., Kasturi R., Schunck B.: Machine vision, McGraw-Hill, New York, 1995.
- [17] Shapiro L., Stockman, G.: Computer vision, Stockman, Prentice-Hall, 2001.
- [18] Jahne B.: Digital image processing: concepts, algorithms, and scientific application, Springer-Verlag, Berlin, 1995.
- [19] Corke P. I.: Visual control of robots: high-performance visual servoing, RSP, New York, 1996.
- [20] Tadeusiewicz R., Flasiński, M.: Rozpoznawanie obrazów, PWN, 1991.
- [21] Kohut P., Uhl T.: The rapid prototyping of the visual servoing on Matlab/Simulink/dSPACE environment, Proc. of the 7th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje, 28-31 August 2001.
- [22] Kwolek B.: Metody i narzędzia inżynierii transputerowej i ich zastosowanie w sterowaniu ze sprzężeniem wizyjnym, Rozprawa Doktorska, AGH, Kraków, 1998.
- [23] Mikrut Z., Tadeusiewicz R.: Automatyczna wizualna identyfikacja obiektów na zrobotyzowanym stanowisku pracy, Elektrotechnika, z. 3-4, 1990.
- [24] Śluzek A.: Zastosowanie metod momentowych do identyfikacji obiektów w cyfrowych systemach wizyjnych, Praca habilitacyjna, Warszawa, 1990.
- [25] Zhang L., Zhao M., Zhao I.: Vision-Based Profile Generation Method of TWB for a New Automatic Laser Welding Line, Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, August 18-21, Jinan, China, 2007.
- [26] Chen S.B., Zhang Y., Lin T., Qiu T., and Wu L.: Welding Robotic Systems with Visual Sensing and Real-Time Control of Dynamic Weld Pool During Pulsed GTAW, International Journal of Robotics and Automation 2004, Issue 1, DOI: 10.2316/Journal.206.2004.1.206-2606.
- [27] Shen H.Y., Ma H.B., Lin T., Chen S.B.: Research on weld pool control of welding robot with computer vision Industrial Robot: An International Journal, 2007, Vol. 34, Issue: 6.
- [28] Yamane S., Kubota T., Yamamoto H., Hirakawa M., Kaneko Y., Oshima K.: Control of Back Bead by Visual Robot in V-groove Welding without Backing Plate, 57th Annual Assembly of the International Institute of Welding, Commission XII IIW Doc No: XII-1815-04, Osaka, 12-14 July 2004.
- [29] Balfour C., Smith J.S., Bertaso D., Melton G. and Lucas W.: Real-time vision based control of weld pool size, 57th Annual Assembly of the International Institute of Welding, Commission XII, IIW Doc No: XII-1833-04, Osaka, 12-14 July, 2004.
- [30] De Xu, Linkun Wang, and Min Tan: Image Processing and Visual Control Method for Arc Welding Robot, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, August 22-26, 2004, Shenyang, China.
- [31] Kuo H.C., Wu L.J.: An image tracking system for welded seams using fuzzy logic, Journal of Materials Processing Technology, Publisher: Elsevier, Vol. 120, Issues 1-3, 15 January 2002.
- [32] Jeng J.Y., Mau T.F., and Leu S.M.: Computer integrated vision and neural network technologies for intelligent automatic laser butt joint welding, Int. J. Computer integrated manufacturing, 2000, vol. 13,(4):345-357.
- [33] Theodore P., Pachids J.N.: Vision-based path generation method for a robot-based arc welding system, J. Intell Robot Syst 2007, 48:307-331.
- [34] Xiaogang Liu, Cunxi Xie: Arc-Light Based Real-Time Seam Tracking System in Welding Robot, 2007, IEEE International Conference on Control and Automation FrB9-4, Guangzhou, China, May 30 to June 1, 2007.
- [35] Czajewski W.: Automatyczne rozpoznawanie i śledzenie spawów przez robota przemysłowego z wykorzystaniem analizy obrazów, Pomiar, Automatyka, Kontrola, 2002.
- [36] Jastrzębski R., Padula H., Cenin M., Zieliński J., Jaworski M., Karcz R., Dexter M.: La aplicación del método polaco TKS de la formación de soldadores para una ejecución precisa de la fusión y la cara de soldadura con electrodo básico en las posiciones PF y H-L045. Soldadura y Tecnologías de Union, no september/ october 2004, Vol. 89, Espana.
- [37] Jastrzębski R., Padula H., Jastrzębski A.: Steering algorithms of the root pass and the face for pressure high strength carbon steels and stainless steel pipes using the flux cored welding wire. EUROJOIN 2006 conferencia EWF de 28-30 de junio de 2006 en Santiago de Compostela.
- [38] Jastrzębski R., Padula H., Zielińska M., Yalinkiçli B., Cenin M, Latała Z., Kościuszko T., Dexter M., Godniak M., Kaczor M.: Using space technic solution to design intelligent visual systems of industrial robots, 57th Annual Assembly of the International Institute of Welding, Commission XII, XII-1831-04, Osaka, 12-14 July 2004.
- [39] Sakuma M., Tsuboi R., Kubo K., Asai S.: Development of welder's training support system with visual sensors, 57th Annual Assembly of the International Institute of Welding, Commission XII, IIW Doc. XII-1813-04, Osaka, 12-14 July 2004.