

dr inż. Piotr Boguś

Akademia Medyczna w Gdańsku

Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”

dr inż. Stanisław Bocian

Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”

mgr inż. Paweł Świtaj

mgr inż. Piotr Zadlewski

Politechnika Gdańska

Analiza obrazów w diagnostyce hamulca tarczowego

W pracy opisano nowe podejście w zakresie diagnostyki i nadzoru hamulca tarczowego. Analizowane są w komputerze obrazy pozyskane z kamery cyfrowej. Przedstawiono analizę obrazów w aspekcie wymiarów geometrycznych hamulca. Analiza ta umożliwia oszacowanie zużycia okładzin i tarcz hamulca tarczowego.

1. Wstęp

Praktyczne zastosowanie analizy obrazów wzrosło gwałtownie w ostatnich latach. Wiele tych zastosowań dotyczy przemysłowych i technicznych systemów analizy obrazów. Głównym polem zastosowań okazała się tutaj robotyka z systemami rozpoznawania części (ang. Industrial Parts-Recognition Systems IPRS). Również diagnostyczne systemy rozpoznawania obrazów znajdują coraz więcej zastosowań praktycznych. W praktycznych zagadnieniach rozpoznania części w robotyce i przemyśle istotne stają się charakterystyczne cechy i właściwości badanych obiektów. Najczęściej stosuje się modele bazujące na własnościach geometrycznych widzianych obiektów. W pracy przedstawiono analizę obrazów hamulca tarczowego w aspekcie wymiarów geometrycznych. Artykuł ten, który jest kontynuacją prac przedstawionych w [3, 5, 6] wykonano w ramach projektu badawczego KBN nr 9T 12C 064 14 pt. „Wizyjny system kontroli i diagnostyki zjawisk trybologicznych wybranych zespołów pojazdów szynowych”.

2. Wprowadzenie do zagadnień analizy obrazów.

Zagadnienia analizy obrazów stanowią nową, ale bardzo szybko rozwijającą, się dziedzinę wiedzy [7, 9, 10, 15, 17, 18, 19, 20]. Metody używane podczas analizy obrazów można podzielić na trzy zasadnicze grupy:

- pozyskiwanie obrazu – przekształcanie obrazu fizycznego w dokładniejszy obraz cyfrowy (metody te obejmują technikę wizyjną, sprzęt wizyjny, kamery itp.).
- przetwarzanie obrazu – przekształcanie obrazu cyfrowego w obraz cyfrowy (metody te obejmują wszelkiego rodzaju filtrację obrazu, wykrywanie krawędzi itp.).
- rozpoznawanie obrazu – przekształcenie obrazu binarnego w opis obrazu (opis obrazu, w ogólności, jest to segmentacja, analiza cech obrazu, analiza cech obiektów występujących na obrazie, lokalizacja obiektów na obrazie, wyznaczanie parametrów ruchu, wyznaczenie przestrzeni cech, klasyfikacja obrazu oraz obiektów występujących na obrazie).

Wprowadzając podział na przetwarzanie i rozpoznawanie obrazów decydujące dla nas są nie tyle cele tych podejść (które można interpretować bardzo różnie) ale raczej wykorzystywane w nich formalizmy matematyczne które, przede wszystkim, je różnią. W przetwarzaniu obrazów używamy takich metod jak transformata Fouriera, filtracje przestrzenne, maski przestrzenne, wyostżanie krawędzi itp. Natomiast w rozpoznawaniu obrazów wykorzystujemy szeroko rozumiane metody klasyfikacji (statystyczne, klasyczne lub rozmyte), segmentację poprzez grupowanie danych z użyciem rozbudowanych algorytmów bazujących np. na metodach fizyki statystycznej, metodach rozmytych czy probabilistycznych.

W tej pracy skupimy się na przetwarzaniu i rozpoznawaniu obrazów w zastosowaniu do diagnostyki układów hamulcowych. Wiadomości na temat pozyskiwania obrazów można

znaleźć w pierwszej części serii publikacji na temat zastosowania metod analizy obrazów do diagnostyki układów hamulcowych pojazdów szynowych [3].

2.1. Przetwarzanie obrazów.

Definiując przetwarzanie obrazów opieramy się na definicji sformułowanej przez Pavlidisa, który stwierdza że [15]: „Przetwarzanie obrazów dotyczy zagadnień, w których dane wejściowe i dane wyjściowe mają postać obrazów”. Definicja ta jest zasadniczo zrozumiała i należy ją rozumieć dosłownie tzn. każde przekształcenie dowolnego obrazu w inny dowolny obraz będzie przetwarzaniem obrazów.

W ogólności metody przetwarzania obrazu można podzielić na metody obróbki wstępnej mające na celu poprawić jakość obrazu (np. filtracja, eliminacja zakłóceń itp.) oraz metody obróbki zasadniczej mające na celu wykrycie prawidłowości pojawiających się na obrazie (np. wykrywanie krawędzi itp.). Dodatkowo można spotkać się z podziałem metod przetwarzania obrazu na metody przestrzenne i częstotliwościowe lub na metody liniowe i metody nieliniowe.

Wyróżnia się wiele metod przetwarzania obrazów, można tutaj wyróżnić filtry rekursywne, metody jednopunktowe, metody częstotliwościowe (zastosowanie transformaty Fouriera), filtrowanie homomorficzne, filtry konwolucyjne dolnoprzepustowe (wygładzające) i górnoprzepustowe (wyostrzające), filtry medianowe, filtry logiczne itp. [7, 10, 17, 19, 20].

2.2. Rozpoznawanie obrazów.

Więcej niejasności pojawia się przy definicji problematyki rozpoznawania obrazów. A oto cztery przykładowe definicje „rozpoznawania obrazów”:

- „Rozpoznawanie obrazów to maszynowe rozpoznawanie znaczących regularności w złożonym i zakłóconym środowisku” (Duda, Hart 1973 [9]),
- „Rozpoznawanie obrazów są to metody tworzenia opisu obrazu wejściowego lub zakwalifikowanie obrazu do jakiejś klasy” (Pavlidis 1987 [15]),
- „Rozpoznawanie obrazów to poszukiwanie struktury w danych” (Bezdek 1983 [1]),
- „Rozpoznawanie obrazów to automatyczna identyfikacja klas, czyli rozpoznawanie przynależności rozmaitego typu obiektów lub zjawisk do pewnych klas” (Tadeusiewicz 1992 [19]).

Termin „rozpoznawanie obrazów” jest nieprecyzyjny w języku polskim. W języku angielskim odpowiada mu termin „pattern recognition”. Angielskie słowo „pattern” powinniśmy przetłumaczyć jako wzór, wzorzec lub obiekt. Wówczas „pattern recognition” powinno się raczej przetłumaczyć jako rozpoznawanie obiektów lub rozpoznawanie wzorców. Najczęściej jednak używa się nazwy „rozpoznawanie obrazów”, ale wówczas należy pamiętać, że użyte w nim słowo „obraz” w ogólności oznacza nie tylko obraz, w dosłownym tego słowa znaczeniu, ale wszystkie możliwe rodzaje danych np. sygnały mowy, dane o pacjencie, szeregi czasowe itp. Podsumowując, można więc powiedzieć, że w ogólności, rozpoznawanie obrazów to poszukiwanie struktury i regularności w dowolnego typu danych. Rozpoznawanie obrazów zajmuje się przydzielaniem danych do pewnych klas. Tymi danymi mogą, ale w ogólności nie muszą, być obrazy. W tej pracy

przez „obraz” będziemy rozumieli typowy obraz, uzyskiwany z użyciem kamery CCD [2, 9, 10, 15, 18, 19].

Trzy najważniejsze dziedziny rozpoznawania obrazów to [1, 9]:

- selekcja cech (ang. feature selection),
- grupowanie danych (ang. clustering),
- klasyfikacja (ang. classification).

Oznaczmy przez $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ zbiór danych będących wynikami obserwacji jakiegoś procesu fizycznego. Zbiór X jest w literaturze nazywany zbiorem danych, zbiorem obserwacji albo próbką. Elementy x_k należące do X są nazywane elementami danych, wektorami danych, obrazami albo obserwacjami. Składowe wektora x_k to tzw. cechy albo atrybuty (ang. features). Oznaczmy przez S przestrzeń w której X jest zanurzony tzn. $X \subset S$. Przestrzeń S jest nazywana przestrzenią danych, przestrzenią obserwacji albo przestrzenią cech.

Selekcja cech jest to poszukiwanie struktury i regularności w samych elementach danych. Dokonując selekcji cech szukamy zazwyczaj dodatkowych struktur w elementach danych x_k oraz w powiązaniach pomiędzy nimi. Celem jest zazwyczaj ułatwienie dalszej analizy poprzez znalezienie dodatkowych cech.

Grupowanie danych (inaczej nazywane też analizą skupień) jest to poszukiwanie struktury w zbiorze danych X , czyli podział danych na grupy, w których elementy są do siebie najbardziej podobne. Zazwyczaj chcemy znaleźć pewną liczbę c ($2 \leq c < n$) oraz podzielić zbiór danych X na c wzajemnie wykluczających się podzbiorów, których elementy są najbardziej do siebie podobne.

Klasyfikacja jest to poszukiwanie struktury w przestrzeni danych S . Chcemy wówczas podzielić przestrzeń danych na tzw. obszary decyzyjne, stanowiące podstawę do zaliczenia danego obiektu do danej klasy. Klasyfikacja sprowadza się więc w praktyce do zbudowania klasyfikatora, który potrafi sklasyfikować nowo pojawiające się dane, czyli podjąć decyzję o ich przynależności do danej klasy [1, 2, 7, 9, 10, 18].

W literaturze można się również spotkać z podziałem metod analizy obrazów na

- metody nauczania pod nadzorem (ang. supervised) i
- metody nauczania bez nadzoru (ang. unsupervised), które odpowiada grupowaniu danych.

Podział metod na nauczanie pod i bez nadzoru jest jednoznaczny. Metody pod nadzorem obejmują wszelkie techniki bazujące na uczeniu systemu na przykładach przedstawionych systemowi przez człowieka. Na bazie zbioru trenującego system uczy się na przykładach, a następnie jest wykorzystywany do klasyfikowania nowych pojawiających się elementów. Metody bez nadzoru odpowiadają wprost opisanemu już wcześniej grupowaniu danych. Są to więc wszelkie techniki które automatycznie i samodzielnie odnajdują podział zbioru danych na klasy lub grupy.

3. Analiza obrazów w diagnostyce urządzeń technicznych.

W ostatnich latach coraz więcej zastosowań analizy obrazów dotyczy przemysłowych i technicznych systemów rozpoznawania obrazów, gdzie system z kamerą wizyjną diagnozuje urządzenie techniczne na podstawie analizy kształtu i deformacji elementów pojawiających się na obrazie (patrz np. [7, 10, 19, 20]).

Jednym z pierwszych obszarów zastosowań okazała się tutaj robotyka z systemami rozpoznawania części (ang. Industrial Parts-Recognition Systems IPRS) oraz diagnostyczne systemy przemysłowe. W praktycznych zagadnieniach rozpoznawania części w robotyce i przemyśle istotne stają się charakterystyczne cechy i właściwości badanych obiektów. Obiekty te mają często wyraźnie rozróżnialne cechy (np. otwory, kąty itp.). Na obrazie mamy zazwyczaj pewną skończoną liczbę możliwych konfiguracji. Najczęściej stosuje się modele bazujące na właściwościach geometrycznych widzianych powierzchni lub sylwetek obiektów. Opisują one obiekty przy pomocy składowych cech kształtu [8, 19].

W diagnostyce technicznej używa się często tzw. rozpoznawania obiektów bazującego na modelu (ang. model-based objects recognition) [8]. W systemach rozpoznawania obrazów bazujących na modelu rozpoznawanie polega na porównywaniu i dopasowywaniu wejściowego obrazu ze zbiorem predefiniowanych modeli obiektów (części). W ogólności rozpatruje się modele dwuwymiarowe (2-D), modele trójwymiarowe (3-D) oraz modele pośrednie pomiędzy modelami dwu i trójwymiarowymi ($2\frac{1}{2}$ -D), w których do modelu dwuwymiarowego wprowadza się elementy trójwymiarowości dla polepszenia rozpoznawania.

Bardzo często podczas diagnostyki technicznej informacje które chcielibyśmy uzyskać z obrazu odpowiadają prostym danym takim jak np. grubość danego elementu, pojawienie się lub zniknięcie pewnego szczegółu ekranu itp. Wówczas przydatne mogą się okazać metody wyspecjalizowane i sposoby uwzględniające specyfikę danego problemu. W ogólności jednak gdy musimy przeprowadzić pełną analizę obrazu i jego obiektów trzeba dokonać segmentacji obrazu.

Segmentacja obrazu jest procesem w którym dokonujemy podziału obrazu na jednoznacznie zdefiniowane obszary, tzw. segmenty. Każdy segment odpowiada elementowi obrazu mającemu odzwierciedlenie w rzeczywistości. Metody segmentacji obrazu można podzielić na [7, 10, 17, 19]:

1. Metody przez podział obrazu.
2. Metody przez rozrost obszaru.
3. Metody bazujące na wykrywaniu krawędzi.
4. Metody bazujące na analizie tekstury pojawiającej się na obrazie.
5. Metody segmentacji bazujące na grupowaniu danych w przestrzeni cech.

Metody wymienione w punktach 1, 2 i 3 stosuje się gdy obraz nie jest mocno zakłócony i zaszumiony. W przypadku obrazów mocno zaszumionych i zakłóconych trzeba stosować metody wymienione w punktach 4 lub 5, są one jednak bardziej skomplikowane matematycznie i złożone obliczeniowo.

Z wymienionych wyżej metod do segmentacji obrazów w diagnostyce technicznej najczęściej wykorzystuje się detekcję krawędzi. Metody detekcji krawędzi próbują odnaleźć lokalne nieciągłości w pewnych atrybutach obrazu (najczęściej w intensywności lub kolorze) które odzwierciedlają granice obiektów. W wielu przypadkach wyróżnienie krawędzi jest wystarczające do pełnej analizy obrazu. Wśród metod detekcji krawędzi można wyróżnić [7, 17, 19]:

1. Filtrację górno-przepustową.
2. Metody specjalnego gradientu (np. metody Roberta i Sobela, gradient Prewitta itp.).

3. Metody poszukiwania krawędzi o z góry zadanych kształtach
 - metoda poszukiwania krawędzi Hueckela (polega na dopasowaniu funkcji skokowej do krawędzi poprzez minimalizację funkcji błędu),
 - metody uzgodnionego wzorca (obraz jest poddawany konwolucji z maską definiującą pewien rodzaj krawędzi np. kąt) itp.

4. Problematyka przetwarzania obrazów w diagnostyce hamulca tarczowego

W diagnostyce hamulca tarczowego jednym z głównym celów jest pomiar wymiarów wybranych elementów [3] zestawu hamulcowego. W praktyce wymaga to odnalezienia na obrazie odpowiednich obiektów oraz automatycznego dokonania odczytu wybranych wymiarów. Jest to klasyczny przykład diagnostyki urządzenia technicznego na podstawie analizy kształtu i deformacji elementów pojawiających się na obrazie.

Analizując tematykę zastosowania metod przetwarzania i rozpoznawania obrazów do diagnostyki hamulca tarczowego można, w ogólności, wyróżnić następujące metody podejścia do problemu:

1. Podejście uproszczone z zastosowaniem jedynie prostych metod przetwarzania obrazów.
2. Podejście z zastosowaniem uproszczonych metod rozpoznawania obrazów.
3. Podejście z zastosowaniem pełnych metod rozpoznawania obrazów.

4.1. Podejście uproszczone z zastosowaniem jedynie prostych metod przetwarzania obrazów.

Podejście uproszczone obejmuje metody które nie stosują zbyt zaawansowanych i czasochłonnych algorytmów matematycznych i używają rozwiązań specyficznych dla danego problemu. Zaletą takiego podejścia jest mała złożoność obliczeniowa i szybkość algorytmów co się okazuje istotne gdy żądany by system diagnostyczny działał „on line”. Wadą jest zastosowanie do jednego tylko, konkretnego problemu i brak możliwości uogólniania na szerszą klasę problemów diagnostycznych.

W podejściu tym wykorzystać można następujące uproszczenia:

1. Jeśli usytuowanie hamulca tarczowego na obrazie jest stabilne, albo zmienne w pewnych małych granicach, to do analizy można brać mniejsze fragmenty obrazu gdzie analiza jest dużo prostsza.
2. Jeśli usytuowanie hamulca tarczowego na obrazie jest stabilne, szczególnie jeśli nie ma dużych zmian charakterystyk kierunkowych, wystarcza analiza jasności wzdłuż wybranej linii poprowadzonej na obrazie.

Szczególnie interesująca okazuje się metoda druga, w której szukaną grubość okładzin albo tarcz hamulcowych znajdujemy jako odległość pomiędzy wybranymi minimami, maksimami lub skokami zmian jasności wzdłuż danej linii. Dla wykrywania takich minimów, maksimów i skoków można użyć proste algorytmy różniczkowania oraz specjalne funkcje oknowe. Pomocna okazuje się tutaj informacja w jakim zakresie może się zmieniać wymiar podlegający pomiarowi. Na przykład, hamulcu tarczowym okładziny oraz

tarcze mają swój wymiar maksymalny (początkowy) i minimalny (po ich pełnym zużyciu) [3].

W praktyce zastosowano połączenie rozwiązania pierwszego z drugim tzn. linie wzdłuż której przeprowadzamy analizę jasności poprowadzono jedynie na stałym, ograniczonym i wybranym fragmencie obrazu (patrz rozdz. 5).

4.2. Podejście z zastosowaniem uproszczonych metod rozpoznawania obrazów.

Podejście uproszczone polega na przeprowadzeniu pełnej lub częściowej segmentacji obrazu po której dokonujemy analizy cech obiektów na obrazie. Interesujące nas obiekty na obrazie mogą się odróżniać od innych obiektów, mogą też być umiejscowione stabilnie w tym samym miejscu obrazu, tak że nie potrzeba dokonywać pełnej klasyfikacji obiektów uzyskanych po segmentacji obrazu. Wystarczy wtedy analiza prostych cechy strukturalnych jak współczynniki kształtu itp. Dobre wyniki może dać czasem zwykła binaryzacja obrazu.

Do takiej częściowej i uproszczonej segmentacji najwłaściwszym podejściem wydaje się użycie wybranych metod wykrywania krawędzi. Po zastosowaniu algorytmu wykrywającego krawędzi można prostymi metodami analizy cech strukturalnych odnaleźć segmenty odpowiadające interesującym obiektom. Interesująca wydaje się też możliwość przeprowadzenia poszukiwania krawędzi o z góry zadanych kształtach i kierunkach.

4.3. Podejście z zastosowaniem pełnych metod rozpoznawania obrazów.

W pełnej metodzie rozpoznawania należy dokonać analizy cech obrazu zgodnie z jedną z trzech ogólnych metod:

1. Metoda cech globalnych – bierzemy pod uwagę cechy bazujące na właściwościach związanych z jasnością, kolorami lub teksturą.
2. Metoda cech strukturalnych – bierzemy pod uwagę cechy bazujące na właściwościach geometrycznych, czyli elementach charakterystycznych jak kąty, linie proste, łuki, dziury, współczynniki kształtu, momenty geometryczne itp.
3. Metoda grafów relacyjnych – opis obiektów na obrazie jest reprezentowany jako graf złożony z lokalnych cech oraz geometrycznych relacji pomiędzy cechami.

Po dokonaniu analizy cech należy przeprowadzić segmentację obrazu wykorzystując albo metodę nauczania pod nadzorem (na bazie ciągów nauczających) lub metodę bez nadzoru (automatycznego grupowanie w przestrzeni cech).

O ile jeszcze metody analizy cech strukturalnych mogą się okazać nie tak skomplikowane to pełna analiza z segmentacją i klasyfikacją będzie na pewno bardzo czasochłonna i wątpliwe jest czy metody te będą się nadawać do przetwarzania „on line”. Nie jest to jednak powód dla odrzucenia tego podejścia. Wydaje się, że w wielu przypadkach obrazy mogą być jedynie pozyskiwane „on line”, natomiast ostateczna obróbka będzie przeprowadzona „off line”, po zapamiętaniu obrazów w pamięci komputera.

W powyższej analizie w celu szybszego rozpoznawania części na obrazie dogodne mogłyby się okazać metody rozpoznawania obiektów bazujące na modelu (ang. model-based objects recognition) [8].

4.4. Segmentacja.

Pomiaru samej tylko grubości elementów hamulcowych można jeszcze dokonać z użyciem specjalistycznych metod i sposobów, charakterystycznych dla danego problemu opartych często na wykorzystaniu specjalistycznych technik akwizycji obrazu. Jednak jeśli chcemy dokonać pełnej analizy różnych parametrów elementów na obrazie istotnych z diagnostycznego punktu widzenia (np. średnica, obwód, pole powierzchni, grubość itp.) należy przeprowadzić pełną segmentację tego obrazu. W uniwersalnych systemach diagnostyki technicznej z wykorzystaniem rozpoznawania i przetwarzania obrazów segmentacja stanowi pierwszy i najważniejszy etap działania.

Badania w zakresie segmentacji obrazów prezentujących elementy hamulca tarczowego objęły następujące zagadnienia:

1. Segmentację obrazów poprzez grupowanie danych w wielowymiarowej przestrzeni cech [5].
2. Neuronową reprezentację wybranych algorytmów grupowania danych [6].
3. Wykorzystania filtrów Gabora do segmentacji tekstury obrazów.

Do segmentacji obrazów poprzez grupowanie danych w wielowymiarowej przestrzeni cech użyto przestrzeni cech generowanej metodami przetwarzania obrazów takimi jak wykrywanie krawędzi, wyostrzanie, lokalne transformaty Fouriera itp. [7, 17]. W podejściu tym każdemu pikselowi oprócz jego wartości jasności przyporządkowane są dodatkowe wartości będące wynikiem zastosowania danej metody przetwarzania np. uśrednienia po otoczeniu, zastosowania filtru, lokalnej transformaty Fouriera itp. Uzyskuje się w ten sposób wielowymiarową przestrzeń cech w której każdy piksel jest reprezentowany jako punkt, a którego współrzędne są wartościami jasności oraz wartościami kolejnych cech uzyskanych wybranymi metodami przetwarzania. W tak utworzonej przestrzeni cech dokonuje się następnie grupowania danych [1, 4, 9]. Uzyskane w ten sposób grupy w przestrzeni cech definiują automatycznie segmenty na obrazie. W praktyce w tym podejściu pełny proces analizy składa się z następujących kroków:

1. Wydzielanie cech.
2. Grupowanie w przestrzeni cech.
3. Segmentacja w przestrzeni obrazu.
4. Rozpoznanie segmentów na obrazie i wybór obiektów do ostatecznej analizy.
5. Analiza wymiarów wybranych obiektów.

Do grupowania danych użyte zostały algorytmy takie jak klasyczny algorytm grupowania po c-średnich, rozmyty algorytm grupowania po c-średnich oraz algorytm posybilistyczny [1, 2, 4, 9]. Uzyskane wyniki są obiecujące i pokazują, że takie podejście do segmentacji obrazów w diagnostyce technicznej może się okazać bardzo przydatne [5]. Dalsze badania powinny objąć zastosowanie następnych rodzajów algorytmów grupowania danych (np. algorytmu bazującego na zasadzie maksimum entropii z deterministycznym wyzarchaniem) [11, 13, 16] oraz nowych metod przetwarzania obrazów generujących wielowymiarową przestrzeń cech.

Badania nad neuronową reprezentacją wybranych algorytmów grupowania danych zostały przeprowadzone dla rozmytego i posybilistycznego algorytmu grupowania po c-średnich [1, 14]. W podejściu tym dany algorytm grupowa-

ma danych reprezentuje się jako dwuwarstwową sieć neuronową, w której, w trakcie uczenia, na warstwie wejściowej podaje się kolejne wektory danych, podczas gdy neurony warstwy wyjściowej reprezentują kolejne grupy, a wagi reprezentują współrzędne środków grup [6]. Neuronowa reprezentacja wybranych algorytmów grupowania danych jest interesująca nie tylko z praktycznego punktu widzenia jako jeden ze sposobów ulepszenia i przyspieszenia algorytmu ale też z teoretycznego punktu widzenia bowiem pozwala na znalezienie podobnych formalizmów matematycznych opisujących zachowanie się sieci neuronowych i algorytmów grupowania danych [2, 11].

Badania w zakresie wykorzystania filtrów Gabora do segmentacji tekstury obrazów prezentujących hamulec tarczowy znajdują się w początkowym stadium. Obrazy prezentujące hamulec tarczowy mają bardzo zróżnicowaną teksturę. Obok fragmentów w miarę jednolitych pojawiają się plamy o wyraźnie zaznaczonej strukturze. Może to być związane z ruchem elementów na obrazie, odbiciami światła oraz niejednorodnym oświetleniem. Wszystko to daje w perspektywie możliwość przeprowadzenia segmentacji bazując na teksturze [7, 10, 17]. Do tego celu należałoby wykorzystać metodę filtrów Gabora pochodzącą od Jainta i Farroknia [12]. Filtry Gabora są przykładem specjalnego typu filtrów przestrzennych których idea wywodzi się od sposobu przetwarzania dokonywanego przez ludzki system analizy obrazów. Filtry Gabora dokonują przestrzennej analizy obrazu biorąc pod uwagę wyróżniony kierunek na obrazie i daną częstotliwość przestrzenną w tym kierunku. Każdy taki filtr dla różnych wartości parametrów jest w stanie wykryć inny rodzaj tekstury.

5. Programy komputerowe do pomiarów geometrycznych hamulca tarczowego.

Jeden z etapów i elementów prac w zakresie budowy systemu komputerowego do pomiarów geometrycznych hamulca tarczowego na podstawie obrazów uzyskiwanych kamerą CCD objął opracowanie dwóch programów:

1. Pomocniczego programu w języku Matlab służącego do testowania wybranych metod przetwarzania obrazów.
2. Zasadniczego programu napisanego w języku C++ dokonującego pomiaru geometrycznych hamulca tarczowego.

Program pomocniczy w Matlabie służy do testowania wybranych metod przetwarzania dla obrazów hamulca tarczowego. Dokonuje on testowania jakości tych obrazów z punktu widzenia różnych metod przetwarzania i pozwala wybrać te, które dla takich obrazów nadają się najlepiej. Metody przetwarzania obrazów oferowane przez program pomocniczy to:

- Filtracja medianowa.
- Znajdowanie konturów metoda Sobela, Robertsa, Prewittha oraz Marr-Hildretha.
- Obliczenie histogramu oraz wykonanie wyrównania i rozszerzenia histogramu.
- Segmentacja binarna oraz wieloprogowa (maksimum do 4 progów).
- Uzyskiwanie profilu dowolnej linii poprowadzonej poprzez obraz itp.

Zadaniem programu napisanego w środowisku C++ Builder firmy Borland jest dokonanie pomiaru grubości wybranych elementów na obrazie uzyskanym kamerą CCD przedstawiającym hamulec tarczowy. Podstawowe funkcje programu to:

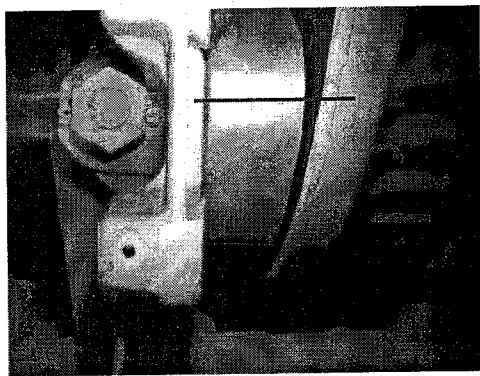
1. Skalowanie obrazu
 - poprzez podanie wymiarów obrazu,
 - z użyciem znaczników na obrazie o określonej odległości.
2. Przeprowadzanie wybranych operacji przetwarzania polepszających jakość obrazu (wyrównywanie histogramu, wyostżanie itp.).
3. Ręczne wskazanie punktów na obrazie dla których program oblicza odległość.
4. Ręczne wskazanie przez użytkownika odpowiednich minimów w przebiegu jasności wybranej linii poprowadzonej przez obraz.
5. Automatyczna analiza profilu jasności linii.
6. Automatyczny odczyt wielkości geometrycznych hamulca tarczowego.

5.1. Skalowanie obrazu.

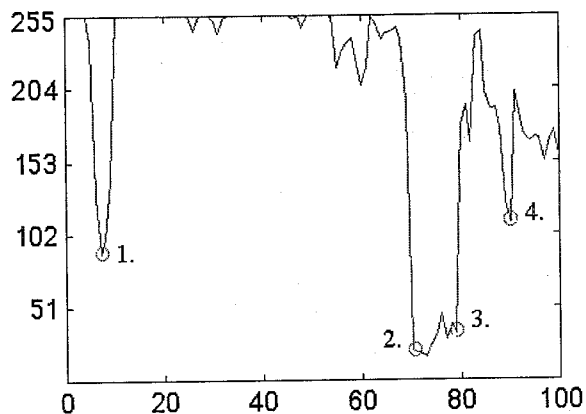
Zrealizowano dwie metody ustalania skali na obrazie. Biorąc pod uwagę, że stanowisko pomiarowe będzie umieszczone w stałej odległości od badanego obiektu, możliwe wydaje się określenie rozmiaru rzeczywistej sceny, która zostaje odzwierciedlona na obrazie w postaci szerokości i wysokości fotografowanej sceny. Rozwiązanie to jest jednak mało ogólne bowiem nie uwzględnia kąta, pod którym umieszczona jest kamera względem układu hamulcowego, czyli głębokości obrazu. Druga metoda ustalania rozmiaru obiektu znajdującego się na obrazie polega na zastosowaniu pewnych charakterystycznych i niezmiennych znaczników. Są to dwa laserowe punkty skierowane na okładzinę ciemną hamulca tarczowego, oddalone od siebie na pewną stałą odległość oraz ustawione równoległe do jednego z boków okładziny ciemnej. Ich odległość ma stanowić wzorzec odległości na obrazie. Detekcja tych punktów na etapie automatycznej analizy obrazu lub ich wskazanie podczas trybu pracy, w którym operator systemu podejmuje decyzje, pozwala wyskalować wyniki oraz zapobiega takim elementom zakłócającym jak zmiana powiększenia, czy też obrót kamery.

5.2. Ręczne metody odczytu wybranych odległości.

Podstawową metodą pomiaru grubości okładziny ciemnej hamulca tarczowego jest metoda ręcznego wskazania dwóch krawędzi okładziny ciemnej przez użytkownika systemu (funkcja 3). Użytkownik podczas podglądu obrazów wejściowych po prostu wskazuje krawędź okładziny ciemnej i na wyskalowanym obrazie może natychmiast otrzymać wynik. Kolejną metodą (funkcja 4), dzięki której możliwe jest otrzymanie wyniku szerokości okładziny ciemnej, ale również stopnia zużycia tarczy hamulcowej jest możliwość wskazania przez operatora minimów w przebiegu jasności linii poprowadzonej przez obraz (rys. 1). Jest to kolejna ręczna metoda, w której operator musi najpierw wskazać linię przebiegającą w poprzek okładziny ciemnej i tarczy hamulcowej, a następnie



a.



b.

Rys. 1. Profil jasności pikseli na linii poprowadzonej wzdłuż okładziny ciernej i fragmentu tarczy.

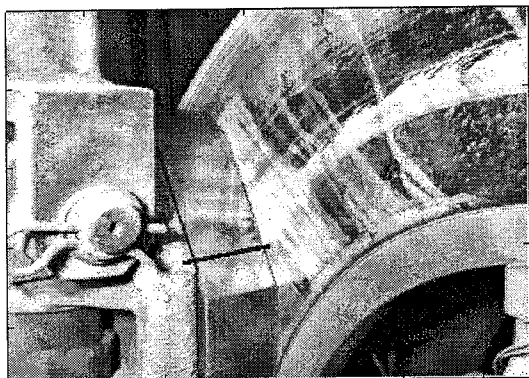
na wykresie profilu jasności pikseli tej linii musi wskazać minima, które uznaje za należące do krawędzi okładziny ciernej. Na rys. 1 jako 1. i 2. zostały oznaczone minima należące do krawędzi okładziny ciernej, zaś jako 3. i 4. oznaczono minima należące do zewnętrznego fragmentu tarczy hamulcowej.

5.3. Automatyczna analiza profilu jasności linii.

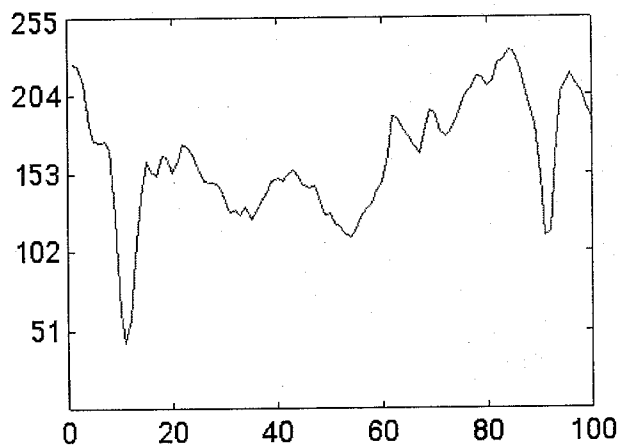
Metoda automatycznej analizy profilu jasności linii przecinającej okładzinę cierną zilustrowana jest na rys. 2. Na rys. 2.a. przedstawiony jest obraz z zaznaczeniem linii przebiegającej w poprzek okładziny, która będzie analizowana zaś na rys. 2.b. przedstawione są zmiany jasności pikseli na tej linii. Z rys. 2.a. widać, że zarówno obszar znajdujący się wewnątrz okładziny ciernej, jak i obiekty umieszczone wokół okładziny (czyli tarcza oraz elementy mocujące układ hamulcowy) mają poziom jasności znacznie różniący się od poziomu jasności pikseli należących do krawędzi okładziny ciernej. Można w związku z tym spodziewać się, że przebieg jasności pikseli analizowanej linii będzie charakteryzował się dużymi zmianami wartości w obszarze. Ponadto krawędź okładziny ciernej jest elementem bardzo wąskim, stąd zmiany wartości jasności pikseli powinny mieć miejsce dla niewielkiej liczby pikseli należących do bezpośredniego są-

siedztwa krawędzi. Na przedstawionym na rys. 2.b. wykresie, ekstrema te są bardzo wyraźne, a także przebieg tych zmian jest „szybki”, toteż niemal natychmiast można stwierdzić, które minimum należy do okładziny ciernej.

Należy jednak podkreślić, iż nie dla każdej linii przebiegającej przez okładzinę cierną zmiany jasności pikseli są tak wyraźne jak dla przypadku przedstawionego powyżej, w wielu miejscach zmiany jasności pośrodku okładziny ciernej, które mogą być spowodowane np. odbiciami od tarczy lub cieniem padającym na okładzinę, są na tyle duże, że uniemożliwiają jednoznaczne automatyczne stwierdzenie które minimum należy do krawędzi okładziny. Na powyższym obrazie widać, że „pośrodku” okładziny występuje nagłe zaciemnienie pikseli, którego minimum ma wartość podobną do jasności pikseli na jednej z krawędzi. Proces poszukiwania krawędzi okładziny może zostać wyposażony w dodatkowy, istotny element. Można bowiem dodać do procesu analizy zmian jasności fakt, iż grubość okładziny ciernej znajduje się w pewnym przedziale i prowadzenia poszukiwania minimum tylko w tym, wynikającym ze specyfiki zadania, obszarze. Innym czynnikiem wspomagającym proces decyzyjny jest szukanie bardzo „wąskich” ekstremów lokalnych, tzn. takich, dla których piksele sąsiadujące z nim znacznie się od niego różnią.



a.



b.

Rys. 2. a. Obraz klocka hamulcowego z zaznaczeniem analizowanej linii . b. Zmiany jasności pikseli wzdłuż analizowanej linii.

Kluczową rolę w przedstawionej metodzie stanowią eksperymentalnie dobrane parametry w powyższych kryteriach, według których możliwe jest automatyczne rozpoznanie krawędzi okładziny czarnej, tzn.

- Wartości minimów poziomu jasności, które na analizowanych zdjęciach będzie przypadało dla krawędzi. Na rys. 2.b widać, że dla każdej z krawędzi wartość ta jest inna, ale zakładając, że krawędź nigdy nie będzie na obrazie przyjmowała poziomu jasności większego niż przyjęte minima możliwe będzie wyeliminowanie lokalnych minimów,
- Nachylenie krzywej profilu jasności przed i za ekstremum świadczące o nagłej zmianie tendencji w przebiegu jasności linii, decydujące o tym, czy znalezione minimum należeć może do bardzo wąskiej przeciw krawędzi.
- Nachylenie samej badanej linii. Warunkiem koniecznym uzyskania poprawnego wyniku analizy grubości okładziny jest to, że badana linia musi być prostopadła do krawędzi okładziny czarnej. Wartość tego nachylenia może być określona na podstawie położenia punktów laserowych stanowiących wzorzec odległości na obrazie, będą one bowiem położone prostopadle lub równoległe względem krawędzi okładziny. W przypadku wprowadzenia przez operatora linii nie posiadającej odpowiedniego nachylenia (podczas trybu „ręcznego” diagnozowania) lub w przypadku niepożądanego obrotu kamery (gdy obraz jest poddawany automatycznej analizie) system może automatycznie skorygować owe niedokładności, czy też zakłócenia.
- Szerokość okna służącego do badania wartości jasności pikseli sąsiadujących z minimum, czyli ilość pikseli po obu stronach minimum, na podstawie których badany jest przyrost jasności, czyli dynamika zmiany, co w połączeniu z progami, od którego minimum zaliczane jest to należące do krawędzi decyduje o tym, czy badany punkt jest zaliczany do poszukiwanej krawędzi.

5.4. Automatyczny odczyt wymiarów geometrycznych hamulca tarczowego.

Metoda, dzięki której możliwe jest wydobyć z obrazu informacji o stopniu zużycia okładzin ciernych i tarcz hamulca w sposób automatyczny, opiera się na poszukiwaniu w obrazie pewnego wzorca. Krawędzie okładziny stanowią pewne niepowtarzalne elementy, na całym obrazie nie ma bowiem drugiego takiego fragmentu jakim jest krawędź, to znaczy elementu o pewnym nachyleniu oraz poziomie jasności. Wyprowadzone dla tej metody kryteria jednoznacznie charakteryzujące poszukiwane krawędzie to:

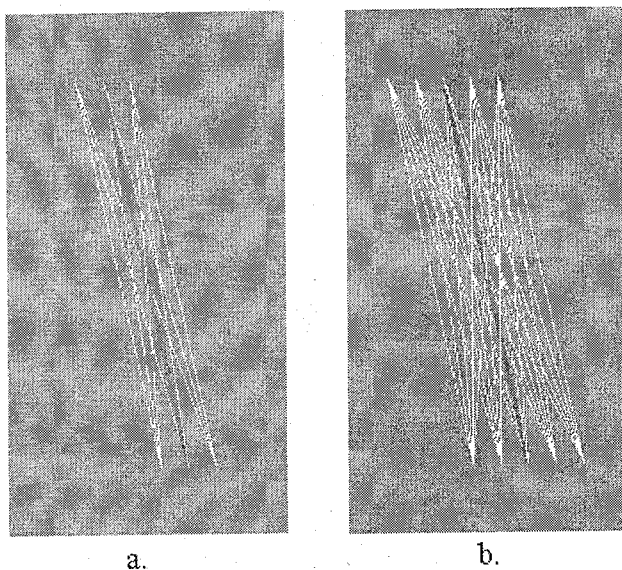
- Nachylenie krawędzi, które dla różnych obrazów może zmieniać się tylko w ograniczonym zakresie (obrót kamery o więcej niż kilkadziesiąt stopni nie zostanie spowodowany drganiami układu pomiarowego), można więc badając różne nachylenia prostej uodpornić system na obrót układu pomiarowego spowodowany drganiami,
- Poziom jasności pikseli należących do krawędzi okładziny czarnej. Krawędź na obrazie jest ciemniejsza niż pozostałe elementy należące do tarczy hamulcowej, samej okładziny, czy też elementów mocujących układ hamulcowy. Ponadto na całej krawędzi jasności pikseli jest bardzo zbliżona,

- Długość poszukiwanej linii. Na obrazach uzyskiwanych w systemie diagnozującym okładziny cierne nie znajdują się elementy, które są dłuższe niż poszukiwana krawędź.
- Odległość krawędzi od siebie jest na obrazie ograniczona do przedziału, w którym dozwolone jest maksymalne zużycie okładziny czarnej. Przedział ten należy jednak nieco powiększyć aby zabezpieczyć system przed zmianami stopnia powiększenia obrazu wynikające z zakłócenia czy niedokładności układu optycznego.
- Położenie krawędzi tylko w ograniczonym obszarze znajdującym się wewnątrz obrazu. Przyjmując, że kamera zbierająca obrazy będzie umieszczona na stałe w jednym miejscu, można ograniczyć znacznie poszukiwany obszar do tej części obrazu, w której spodziewana jest obecność okładziny czarnej.

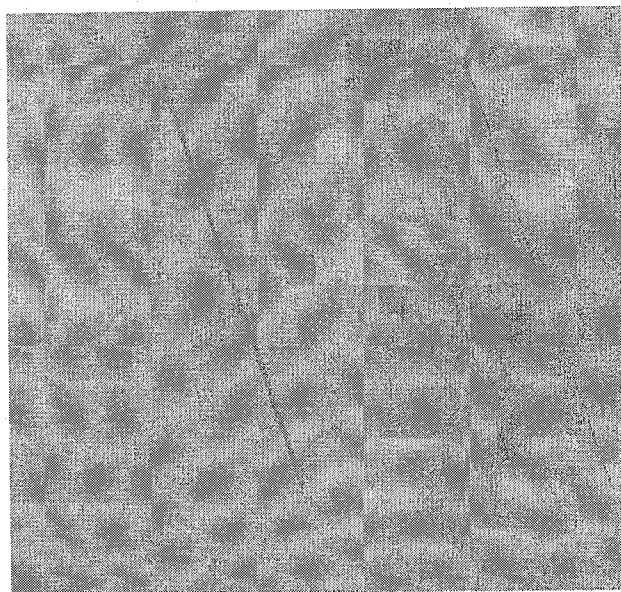
Łącząc wymienione powyżej kryteria można dokonując w odpowiedni sposób przeszukania obrazu wydobyć z niego tylko te elementy, które są pożądane:

1. Pierwszym czynnikiem, ograniczającym znacznie przeszukiwanie całego obrazu, jest prowadzenie poszukiwań tylko w określonym miejscu obrazu.
2. Następnie, na wydzielonej części obrazu poszukiwana jest linia prosta cechująca się minimalną wartością średniej oraz wariancji jasności pikseli. Odpowiada ona lewej krawędzi okładziny czarnej układu hamulcowego. Badane są proste o różnych nachyleniach, przedział nachyleń ustalany jest przed rozpoczęciem poszukiwań (dobrany może zostać np. po zbadaniu drgań, stopnia obrotu, jakiemu podlega układ pomiarowy). Na rys. 3.a, który przedstawia bardzo duże powiększenie fragmentu pewnego obrazu, celem uwidocznienia pojedynczych pikseli, zilustrowano jedną z badanych linii (kolor czarny) oraz jej lokalne sąsiedztwo rozpięte na odległość jednego piksela (kolor biały), na rys. 3.b. lokalne sąsiedztwo badanej linii wynosi 2 piksele. Widać, że zwiększając sąsiedztwo, poszukiwania uwzględniają większy przedział nachyleń prostych. Badane proste posiadają odpowiednią długość, co pozwala na wyeliminowanie ciemnych fragmentów obrazu, które są krótsze niż przyjęta długość krawędzi.
3. Poszukiwania prostej (odpowiadającej lewej krawędzi okładziny) ograniczone są do przeszukania tego fragmentu obrazu, na którym może się ona znaleźć. Jest to uzależnione od jej odległości od prawej krawędzi okładziny czarnej, a ściślej od maksymalnej wartości badanego przedziału odległości, w którym poszukiwane są krawędzie. Sytuacja ta jest przedstawiona na rys. 4. Linia ciągłą czarną oznaczono tam maksymalnie w prawo wysuniętą prostą, która zostanie przeanalizowana metodą omówioną w punkcie drugim, zaś linie czarne kreskowane przedstawiają odpowiednio minimalny oraz maksymalny przyjęty do poszukiwań przedział odległości krawędzi od siebie.
4. Po poziomym przeszukaniu całego wiersza zostaje wybrana prosta, która minimalizuje kryterium jakości w postaci minimalnej wartości średniej jasności pikseli leżących na prostej zsumowanej z wariancją tych wartości. Jeśli prosta minimalizuje to kryterium względem pozostałych, wcześniej znalezionych prostych, następuje przeszukanie fragmentu obrazu (znajdującego się w zadanym przedziale odległości) celem dobrania do niej prawej krawędzi okładziny.

5. Poszukując prawej krawędzi okładziny czarnej badane jest kryterium w postaci pierwiastka kwadratowego z sumy wartości kryterium dla każdej z linii oraz wartości odległości krawędzi od siebie. Powoduje to dobranie prostych leżących jak najbliżej siebie. Jeśli wartość kryterium jest minimalna, para krawędzi zostaje zapamiętana jako najlepsza z dotychczas przebadanych. Poszukiwania są następnie prowadzone dla następnych wierszy aż do dojścia do końca obrazu.
6. Po wykryciu pary równoległych linii minimalizujących przedstawione powyżej kryterium jakości poprowadzona jest prosta prostopadła do nich i ze współrzędnych pikseli system odczytuje odległość, która jest grubością okładziny. Jako miarę odległości na obrazie przyjmuje się wzorzec długości znajdujący się na obrazie w postaci wspomnianych już wcześniej punktów laserowych oddalonych względem siebie o pewną znaną, ustaloną odległość albo przyjęte z góry wymiary obrazu.



Rys. 3. Lokalne sąsiedztwo analizowanej linii w metodzie automatycznego poszukiwania krawędzi w obrazie:
a – sąsiedztwo jednopunktowe, b – sąsiedztwo dwupunktowe.



Rys. 4. Poziome ograniczenie obszaru poszukiwań lewej krawędzi okładziny czarnej.

LITERATURA

- [1] J. C. Bezdek. *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*. Plenum Press, 1983.
- [2] C. M. Bishop. *Neural Networks for Pattern Recognition*. Clarendon Press. Oxford. 1995.
- [3] S. Bocian, P. Boguś, M. Kaluba, A. Kardacz. Pozyskanie obrazu przez komputerowe systemy graficzne do wizyjnej kontroli i diagnostyki hamulca tarczowego. *Pojazdy Szynowe*, Nr. 2/2000, pp. 37-53.
- [4] P. Boguś, A.M. Massone, F. Masulli, A. Schenone. Interactive graphical system for segmentation of multimodal medical volumes using fuzzy clustering. *Machine GRAPHICS & VISION*, Vol. 7, No. 4, 1998, pp. 781-791.
- [5] P. Boguś, S. Bocian. Shape Deformation Analizys of Rail Car Brakes with Using Image Processing Techniques. *Book of Abstracts of European Mechanics Society EUROMECH 406 Colloquium – Image Processing Methods in Applied Mechanics*, May 6-8, 1999, Warsaw, Poland. *Prace IPPT PAN, ATOS, Warszawa, 1999*, pp. 47-49.
- [6] P. Boguś. Neural Representation of Fuzzy and Possibilistic Clustering Algorithms. L. Rutkowski, R. Tadeusiewicz (Eds.). *Proceedings of the Fourth Conference „Neural Networks and Their Applications”*. Zakopane 18 V – 22 V 1999. Polish Neural Networks Society, Częstochowa 1999, pp. 172 – 176.
- [7] K.R. Castleman. *Digital Images Processing*. New Jersey, Prentice Hall, 1996.
- [8] R. T. Chin, C. R. Dyer. *Model-Based Recognition in Robot Vision*. *ACM Computing Surveys*, Vol. 18, No. 1, March 1986, pp. 67-108.
- [9] R. Duda, P. Hart. *Pattern Classification and Scene Analysis*. New York, Wiley Interscience, 1973.
- [10] E. Gose, R. Johnsonbaugh, S. Jost. *Pattern Recognition and Image Analysis*. New Jersey, Prentice Hall, 1996.
- [11] J. Hertz, A. Krogh, R. G. Palmer. *Wstęp do teorii obliczeń neuronowych*. WNT, Warszawa, 1993.
- [12] A. K. Jain, F. Farrokhnia. *Unsupervised Texture Segmentation Using Gabor Filters*. *Pattern Recognition*, Vol. 24, No. 12, 1991, pp. 1167-1186.
- [13] E. T. Jaynes. *Information Theory and Statistical Mechanics*. *Physical Review*, Vol. 106, No. 4, May 15, 1957, pp. 620-630.
- [14] R. Krishnapuram, J. M. Keller. A Possibilistic Approach to Clustering. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 1, No. 2, May 1993, pp. 98-110.
- [15] T. Pavlidis. *Grafika i przetwarzanie obrazów*. WNT, Warszawa, 1987.
- [16] K. Rose, E. Gurewitz, G. C. Fox. A deterministic annealing approach to clustering. *Pattern Recognition Letters* 11 (1990) 589-594.
- [17] J. C. Russ. *The Image Processing Handbook*. Third Edition. CRC Press, Springer, IEEE Press, 1999.
- [18] R. Tadeusiewicz, M. Flasiński. *Rozpoznawanie obrazów*. PWN, Warszawa, 1991.
- [19] R. Tadeusiewicz. *Systemy wizyjne robotów przemysłowych*. WNT, Warszawa, 1992.
- [20] J. Woźnicki. *Podstawowe techniki przetwarzania obrazu*. WKŁ, Warszawa, 1996.