

# **POBR/CPOM laboratorium – ćwiczenie nr 3**

Zagadnienia:

1. Zapoznanie się z lekcją multimedialną H 2.3 na temat zastosowania operacji morfologicznych w cyfrowym przetwarzaniu obrazów.

*Wywołanie programu lekcji multimedialnej:* Start/Programy/POBR\_CPOM/Morpho

2. Zapoznanie się z lekcją multimedialną H 2.5 przedstawiającą pełny projekt przykładowego systemu cyfrowej analizy obrazów.

*Wywołanie programu lekcji multimedialnej:* Start/Programy/POBR\_CPOM/H25

3. Zapoznanie się z lekcją multimedialną H 2.4 przedstawiającą przykład zastosowania cyfrowego przetwarzania obrazów w diagnostyce medycznej.

*Wywołanie programu lekcji multimedialnej:* Start/Programy/POBR\_CPOM/H24

4. Zapoznanie się z załączonymi materiałami na temat metod wyznaczania cech (*kopia rozdziału z książki R. Tadeusiewicza "Systemy wizyjne robotów przemysłowych"*).

Implementacja i testowanie wybranych algorytmów wyznaczania cech obiektów (współczynników kształtu, niezmienników momentowych) dla prostych przykładów obrazów binarnych zawierających zróżnicowane figury geometryczne – np. koło, elipsa, trójkąt, prostokąt (obrazy testowe należy wygenerować za pomocą np. programu Microsoft Paint).

Przypominam, że kolokwia oraz egzamin obejmują również materiał laboratoriów i projektu.

- Applications and Robot Control, IEEE Computers, Dec. 1982.
8. Ibrahim H.A.H., Kender J.R., Shaw D.E.: The analysis and performance of two middle-level vision tasks on a fine-grained SIMD Tree Machine. Proceedings CVPR'85 - IEEE Comp. Soc. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 1985.
  9. Lagendijk R.L., Angwin D.L., Kaufman H., Biemond J.: Recursive and iterative methods for image identification and restoration, Signal Processing IV: Theories and Applications, Proc. of EUSIPCO-88, Grenoble 1988, s. 235-239.
  10. Mundy J.: Computer vision applied to industrial problems. Inv. pap. from General Electric Corporate Research Center, 5-th SCIA, Stockholm 1987.
  11. Myers W.: Industry Regions to Use Visual Pattern Recognition, Computing, May, 1980, s. 21-31.
  12. Pachowicz P.W., Tadeusiewicz R.: Efektywność zastosowania przetwarzania porównolegatego w sekwencyjnych systemach obrazowych, Konf. Przetwarzanie Sygnałów w Telekomunikacji, Sterowaniu i Kontroli, Bydgoszcz 1984, s. 216-219.

### **5.3. ANALIZA CECH OBIEKTÓW I ICH POMIAR**

Podstawowym zadaniem analizy kształtów jest wyznaczenie takich cech obiektów [7], które dobrze charakteryzuje ich kształty, przyjmując jednakowe wartości dla obiektów mających jednakowy kształt (na przykład dla wszystkich kwadratów), a równocześnie dobrze różnicujących obiekty o różnych kształtach (na przykład koła od kwadratów). Ponieważ z procesem wprowadzania obrazu wiążą się pewne deformacje obiektów, które najczęściej w procesie analizy należy ignorować, proto interesują nas takie współczynniki, które są niezmiennicze względem typowych przekształceń obrazów, jakimi są obroty, przesunięcia i zmiany skali [2]. Parametry otrzymywane droga pomiarów bezpośrednio na obrazie, takie jak współrzędne obiektów, pole, obwód, maksymalny gabaryt itd., nie wykazują oczekiwanej niezmienniczości [4] na wszystkie powyższe przekształcenia, choć mogą być użyteczne w przypadku, gdy występują tylko niektóre z nich.

(przykładowo pole powierzchni jest niezmiennicze względem przesunięcia). Doskonalsze cechy kształtów obiektów i metody ich wyznaczania zostały omówione dokładnie w pracy [20]. Tam też podano pełne definicje współczynników oraz wyniki badań podstawowych przeprowadzonych na nich. W tej książce zostaną przedstawione skrótnie jedynie podstawowe definicje cech obiektów z zachowaniem podziału na tak zwane współczynniki kształtu i momenty geometryczne.

### 5.3.1. Współczynniki kształtu

W literaturze stosunkowo często spotyka się propozycje różnych parametrów, które mogą być wykorzystane do opisu kształtu obiektów widocznych na obrazie. Najprostszym z nich jest, jak się wydaje, **współczynnik Maliowskiej** [17] oznaczony poniżej jako W3. Ma on prostą postać i jest łatwy do obliczenia (obliczanie pola i obwodu jest zwykle zaledwie elementarnym). Współczynnik ten można jeszcze bardziej uprościć, otrzymując w rezultacie współczynnik używany w systemie wizyjnym robota przemysłowego opracowanym na AGH [20]. W podanym niżej zestawieniu ta wersja współczynnika jest oznaczona symbolem W9. Innymi cechami używanymi w tym samym systemie są **współczynniki cyrkularności** W1 i W2, gdzie W1 wyznacza średnicę koła o obwodzie równym obwodowi analizowanego obiektu, W2 wyznacza średnicę koła, którego pole jest równe polu danego obiektu. Powyższe dwa współczynniki powinny być normalizowane.

Opisana wyżej grupa współczynników charakteryzuje się głównie możliwością ich bardzo szybkiego obliczania, co jest bardzo ważne w systemie, który - jak każdy system przeznaczony do współpracy z robotem - musi dostarczać wyników przetwarzania obrazu w czasie rzeczywistym. W przypadku, kiedy szybkość działania nie jest najważniejsza, a istotna jest dokładność opisu obiektów za pośrednictwem ich cech - można odwołać się do bardziej wyrafinowanych metod i subtelniejszych cech opisujących obiekty. Pierwszą tego typu cechą może być zaproponowany przez Blaira i Bliss'a [1] współczynnik W4. Jego interpretacja jest bardziej złożona niż wcześniej omawianych, ale i jego potencjalna wrażliwość na zmiany kształtu charakteryzowanych obiektów jest lepsza niż w przypadku poprzednio

przedstawionych współczynników. Kolejna godna wzmianki cechę proponuje Danielsson [3]; **współczynnik Danielssona** został oznaczony W5. Współczynnik ten ma bardzo ciekawe właściwości, jest jednak niestety mało przydatny w zastosowaniach z uwagi na bardzo długi czas obliczeń (kilka-dziesiąt razy dłuższy niż dla pozostałych współczynników). Następną brana pod uwagę cechą kształtu jest **współczynnik Haralicka** [9] oznaczony W6. On także jest stosunkowo pracochłonny ze względu na konieczność sumowania wielu elementów obrazu w celu uzyskania syntetycznej miary i oceny.

Przedstawione wyżej dwie grupy cech można wykorzystywać łącznie lub można wybierać tylko niektóre współczynniki, decydując się albo na dokładniejsze odwzorowanie kształtu obiektów, albo na szybsze działanie algorytmu. Czasami są przydatne cechy pośrednie, dwa tego typu współczynniki zaproponowano w pracy [20]. Są to: **współczynnik Lp1** (oznaczony W7), badający zmienność minimalnej i maksymalnej odległości środka ciężkości od konturu obiektu oraz **współczynnik Lp2** (W8) podający stosunek maksymalnego gabarytu do obwodu obiektu. Wzory opisujące wszystkie wzmiankowane współczynniki są zestawione poniżej.

$$W1 = 2 \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} - \text{współczynniki cyrkularności}$$

$$W2 = \frac{L}{\pi} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} - \text{współczynnik Malinowskiej}$$

$$W3 = \frac{L}{2 \sqrt{\pi S}} - 1 \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} - \text{współczynnik Blaira-Blissa}$$

$$W5 = \frac{S^3}{(\int \int l ds)^2} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} - \text{współczynnik Danielssona}$$

$$W_6 = \sqrt{\frac{(\sum d)^2}{n \sum d^2 - 1}} \quad - \text{współczynnik Haralicka}$$

$$W_7 = \frac{r_{\min}}{R_{\max}} \quad - \text{współczynnik Lp1}$$

$$W_8 = \frac{L_{\max}}{L} \quad - \text{współczynnik Lp2}$$

$$W_9 = \frac{2 \sqrt{\pi S}}{L} \quad - \text{współczynnik Mz}$$

gdzie:

$L$  - obwód rzutu obiektu,

$S$  - pole rzutu obiektu,

$r$  - odległość elementu pola ds od środka ciężkości obiektu,

$l$  - minimalna odległość elementu ds od konturu obiektu,

$d$  - odległość pikseli konturu obiektu od jego środka ciężkości,

$n$  - liczba punktów konturu,

$r_{\min}$  - minimalna odległość konturu od środka ciężkości,

$R_{\max}$  - maksymalna odległość konturu od środka ciężkości,

$L_{\max}$  - maksymalny gabaryt obiektu.

Podane wyżej cechy kształtu analizowanych w systemie wizyjnym obiektów są generalnie bardzo użytecznymi parametrami. W większości zadań, w których obiekty na rastrze są dostatecznie duże, aby ich kształty mogły być dokładnie ocenione - wartości tych współczynników pozwalały na bardzo wygodne i niezawodne rozróżnianie obiektów o różnych kształtach. Co więcej, fakt, że każdy z omówionych współczynników jest skalarną miarą opisywanego kształtu - obliczenie wartości tych współczynników pozwala na krajową (jeśli tak można to określić) redukcję ilości informacji zawartej w obrazie. Z kilkudziesięciu tysięcy liczb, opisujących obraz w kategoriach pikseli stosowanego rastra, jest dokonywana redukcja do pojedynczej liczby - mającej w dodatku równoważną (z merytorycznego punktu widzenia) przydatność praktyczną! W dodatku

współczynniki kształtu mają także i tę właściwość [7], że dla podobnych (lecz nie identycznych!) kształtów obiektów mają bardzo zbliżone wartości. Daje to możliwość nie tylko kategorycznego rozpoznawania zadanej z góry klasy obiektów, lecz pozwala również na określenie stopnia podobieństwa nieznanego obiektu do poszczególnych znanych klas [19].

Jak z tego wynika, rozważane tu współczynniki kształtu są bardzo przydatne w systemach wizyjnych robotów przemysłowych i są w nich chętnie stosowane jako podstawa do automatycznego rozpoznawania obiektów, którymi robot ma się posługiwać. Jednak gdyby na tym stwierdzeniu zamienić ten podział - przedstawiono by nie całą prawdę o współczynnikach kształtu, gdyż w badaniach autora [20] dowodnie wykazano, że w niektórych konkretnych zadaniach ich użyteczność może być ograniczona. Przykładowo, duże zmiany skali rozważanych obiektów powodują zauważalne zmiany ich wartości. W takim przypadku wyliczane wartości tych współczynników dla obiektów o tym samym kształcie mogą różnić się od siebie, a w dodatku z kolei ich wartości, nawet dla obiektów o bardzo różnych kształtach, są zbliżone. (Przedziały zmienności są niewielkie). Jeśli nałożą się na to jeszcze niedokładności wynikające z dyskretnej postaci rastru - to może się zdarzyć, że wartości tych współczynników dla obiektów tej samej klasy (na przykład prostokątów) o różnych rozmiarach będą się od siebie różnić bardziej niż wartości współczynników dla figur o odmiennych kształtach, lecz zbliżonych rozmiarach (na przykład koło i kwadrat o podobnej powierzchni). Jeśli dodać do tego stwierdzenie, że bardziej wyrafinowane zniekształcenia (m.in. powodowane przez perspektywę) powodują tak silne zaburzanie ich wartości, że owe "niezmienności" potrafią zmieniać się o rząd (!) wielkości - to nic dziwnego, że ich praktyczna przydatność w niektórych zastosowaniach może być problematyczna. Zjawisko to należy zbadać dokładniej i dlatego przeprowadzimy teraz porównanie teoretycznych wartości kilku przykładowych współczynników dla wybranych figur geometrycznych: koła, elipsy (jako deformacji liniowej koła wywołanej np. zmianą punktu widzenia lub niedokładnością kamery), wielokąta (jako deformacji koła wywołanej nieliniowością rastru), prostokąta (jako figury odmiennej od elipsy, która powinna mieć wyraźnie inny współczynnik kształtu), kwadratu (jako interesującego przypadku szczególnego prostokąta) i odcinka (jako innego interesującego przypadku szczególnego

prostokąta). Wykorzystywać przy tym będziemy wyprowadzone przez Zenona Kulpe i jego współpracowników [13,14] wzory analityczne, które określają wartości współczynników kształtu dla rozpatrywanych tu figur. Używać będziemy następujących oznaczeń: K - oznaczać będzie koło, E - elipsę o mimośrodzie wynoszącym  $g$ , W - wielokąt o  $m$  bokach, P - prostokąt o stosunku boków wynoszącym  $g$ , Q - kwadrat oraz I - odcinek. Zapis  $W_j(f)$  oznaczać będzie wartość  $j$ -tego współczynnika kształtu (do analizy wybrano przypadki  $j = 3, 4, 5, 6$ ) dla  $f$ -tej figury geometrycznej ( $f = K, E, W, P, Q, I$ ). We wszystkich przypadkach, kiedy wzór oryginalny podawany przez Kulpe jest zbyt złożony, będziemy operować łatwiejszymi do analizy i porównań wzorami przybliżonymi.

$$W_3(K) = 0$$

$$W_3(E) \approx 0,75 \frac{1+g}{\sqrt{g}} - 1,5$$

$$W_3(W) = \sqrt{\frac{m}{\pi} \operatorname{tg} \frac{\pi}{m}} - 1$$

$$W_3(P) = \frac{1+g}{\sqrt{\pi g}}$$

$$W_3(Q) \approx 0,128$$

$$W_3(I) = \infty$$

$$W_4(K) = 1$$

$$W_4(E) = \sqrt{\frac{2g}{1+g^2}}$$

$$W_4(W) = \sqrt{\frac{m}{\pi \left( \operatorname{ctg} \frac{\pi}{m} + \frac{1}{3} \operatorname{tg} \frac{\pi}{m} \right)}}$$

$$W_4(P) = \sqrt{\frac{6}{\pi} \cdot \frac{g}{1 + g^2}}$$

$$W_4(Q) \approx 0,977$$

$$W_4(I) = 0$$

$$W_5(K) = 28,274$$

$$W_5(E) = ?$$

$$W_5(W) = 9 \text{ m } \operatorname{tg} \frac{\pi}{m}$$

$$W_5(P) = \frac{144}{g (g - 3)^2}$$

$$W_5(Q) = 36$$

$$W_5(I) = \infty$$

$$W_6(K) = 0$$

$$W_6(E) = ?$$

$$W_6(W) = \sqrt{\frac{(\pi/m) \operatorname{tg}(\pi/m)}{\ln^2 \left( \frac{1 + \sin(\pi/m)}{\cos(\pi/m)} \right)} - 1}$$

$$W_6(P) = \sqrt{g \ln \left( \left( 1 + \sqrt{1 + g^2} \right) g^{-1} \right) + \ln \left( g + \sqrt{1 + g^2} \right)}$$

$$W_6(Q) = 0,105$$

$$W_6(I) = \infty$$

Jak wynika z tych wzorów, rozważane współczynniki kształtu generalnie spełniają swoje zadanie, gdyż na podstawie ich wartości można łatwo ustalić, z jakim kształtem obiektu mamy do czynienia. Jednak działanie tych współczynników nie jest doskonałe nawet dla idealnych figur geometrycznych, ponieważ przyjmują często zbliżone wartości dla różnych figur (na przykład prostokąta i koła), mają zróżnicowaną wrażliwość na zmiany proporcji figury (parametr  $g$  dla elipsy i prostokąta) oraz są w różnym stopniu podatne na błędy dyskretyzacji (możliwe do oszacowania na podstawie danych dla wielokąta i dla koła). Ponadto warto zauważyc, że współczynniki te mają różne przedziały zmienności, a ich wartości mogą rosnąć albo maleć w miarę przechodzenia od figur bardzo regularnych (koło) do coraz bardziej wydłużonych (elipsa, prostokąt, odcinek). Czasami celowe jest takie przeskalowanie różnych współczynników, aby uzgodnić ich wskazania; zagadnienie to było przedmiotem innej pracy autora [19].

### 5.3.2. Momenty geometryczne

Ponieważ współczynniki kształtu nie są wystarczająco dobrymi cechami opisującymi formę różnych obiektów, stale poszukuje się nowych parametrów. Jednymi z bardziej obiecujących są **momenty geometryczne** [5, 8, 16, 18, 21].

**Dwuwymiarowy moment** rzędu  $(p+q)$  obliczany dla funkcji  $f(x,y)$  jest definiowany jako

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q f(x,y) dx dy$$

Moment centralny  $f(x,y)$  jest definiowany

$$M_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \tilde{x})^p (y - \tilde{y})^q f(x,y) dx dy$$

gdzie:

$$\tilde{x} = m_{10} / m_{00}; \quad \tilde{y} = m_{01} / m_{00}$$

Dla cyfrowego obrazu podwójne całki mogą być aproksymowane sumami. I tak dla kwadratowej matrycy o rozmiarach  $[n \times n]$  składającej się z punktów  $[x_{ij}]$  otrzymujemy:

$$m_{pq} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n i^p j^q x_{ij} - \text{moment zwykły rzędu } p \text{ ze względu na wiersze i } q \text{ ze względu na kolumny}$$

$$\tilde{i} = m_{10} / m_{00}; \quad \tilde{j} = m_{01} / m_{00} - \text{centrum obrazu}$$

$$M_{pq} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (i - \tilde{i})^p (j - \tilde{j})^q x_{ij} - \text{moment centralny}$$

Centralne momenty można przedstawić za pomocą momentów zwykłych<sup>1</sup>:

$$M_{00} = m_{00}$$

$$M_{01} = m_{01} - (m_{01} / m_{00}) m_{00}$$

$$M_{10} = m_{10} - (m_{10} / m_{00}) m_{00}$$

$$M_{11} = m_{11} - m_{10} m_{01} / m_{00}$$

$$M_{20} = m_{20} - m_{10}^2 / m_{00}$$

<sup>1</sup>Uwaga: Momenty centralne  $M_{01}$  i  $M_{10}$  mają oczywiście wartości zerowe,

przytoczono jednak dla nich odpowiednie formuły w celu ujednolicenia.

$$M_{02} = m_{02} - m_{01}^2 / m_{00}$$

$$M_{21} = m_{21} - 2 m_{11} \tilde{i} - m_{20} \tilde{j} + 2 m_{01} \tilde{i}^2$$

$$M_{12} = m_{12} - 2 m_{11} \tilde{j} - m_{02} \tilde{i} + 2 m_{10} \tilde{j}^2$$

$$M_{30} = m_{30} - 3 m_{20} \tilde{i} + 2 m_{10} \tilde{i}^2$$

$$M_{03} = m_{03} - 3 m_{02} \tilde{j} + 2 m_{01} \tilde{j}^2$$

Mając określone niezbędne podstawowe zależności z algebry kwantowej [15] można wyznaczyć niezmienniki momentowe [18]:

$$M1 = \{M_{20} + M_{02}\} / m_{00}^2$$

$$M2 = \{(M_{20} - M_{02})^2 + 4 M_{11}^2\} / m_{00}^4$$

$$M3 = \{(M_{30} - 3 M_{12})^2 + (3 M_{21} - M_{03})^2\} / m_{00}^5$$

$$M4 = \{(M_{30} + M_{12})^2 + (M_{21} + M_{03})^2\} / m_{00}^5$$

$$M5 = \{(M_{30} - 3 M_{12})(M_{30} + M_{12})[(M_{30} + M_{12})^2 - 3(M_{21} + M_{03})^2] + \\ + (3 M_{21} - M_{03})(M_{21} + M_{03})[3(M_{30} + M_{12})^2 - (M_{21} + M_{03})^2]\} / m_{00}^{10}$$

$$M6 = \{(M_{20} - M_{02})[(M_{30} + M_{12})^2 - (M_{21} + M_{03})^2] + \\ + 4 M_{11} (M_{30} + M_{12})(M_{21} + M_{03})\} / m_{00}^7$$

$$M7 = \{M_{20} M_{02} - M_{11}^2\} / m_{00}^4$$

$$M8 = \{M_{30} M_{12} + M_{21} M_{03} - M_{12}^2 - M_{21}^2\} / m_{00}^5$$

$$M9 = \{M_{20} (M_{21} M_{03} - M_{12}^2) + M_{02} (M_{03} M_{12} - M_{21}^2)\} - \\ - M_{11} (M_{30} M_{03} - M_{21} M_{12})\} / m_{00}^7$$

$$M10 = \{(M_{30} M_{03} - M_{12} M_{21})^2 - 4 (M_{30} M_{12} - M_{21}^2)(M_{03} M_{21} - M_{12}^2)\} / m_{00}^{10}$$

Znormalizowane centralne momenty oznaczane  $N_{pq}$  można zdefiniować jako

$$N_{pq} = M_{pq} / M_{00}^{(p+q)/2+1}$$

co jest równoważne z

$$N_{pq} = M_{pq} / m_{00}^{(p+q)/2+1}$$

Korzystając z powyższej zależności otrzymujemy:

$$M1 = N_{20} + N_{02}$$

$$M2 = (N_{20} - N_{02})^2 + 4 N_{11}^2$$

$$M3 = (N_{30} - 3 N_{12})^2 + (3 N_{21} - N_{03})^2$$

$$M4 = (N_{30} + N_{12})^2 + (N_{21} + N_{03})^2$$

$$M5 = (N_{30} - 3 N_{12})(N_{30} + N_{12})[(N_{30} + N_{12})^2 - 3 (N_{21} + N_{03})^2] + \\ + (3 N_{21} - N_{03})(N_{21} + N_{03})[3 (N_{30} + N_{12})^2 - (N_{21} + N_{03})^2]$$

$$M6 = (N_{20} - N_{02})[(N_{30} + N_{12})^2 - (N_{21} + N_{03})^2] + \\ + 4 N_{11} (N_{30} + N_{12})(N_{21} + N_{03})$$

$$M7 = N_{20} N_{02} - N_{11}^2$$

$$M8 = N_{30} N_{12} + N_{21} N_{03} - N_{12}^2 - N_{21}^2$$

$$M9 = N_{20} (N_{21} N_{03} - N_{12}^2) + N_{02} (N_{30} N_{12} - N_{21}^2) - \\ - N_{11} (N_{30} N_{03} - N_{21} N_{12})$$

$$M10 = (N_{30} N_{03} - N_{12} N_{21})^2 - 4 (N_{30} N_{12} - N_{21}^2)(N_{03} N_{21} - N_{12})$$

Wszystkie powyższe momenty teoretycznie powinny być invariantne ze względu na obrót, translację i zmianę skali obiektu [18]. Badania autora i jego zespołu, opisane w kolejnym podrozdziale, potwierdziły to przypuszczenie [20].

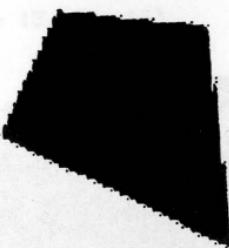
### 5.3.3. Badania współczynników kształtu i momentów geometrycznych

Opisane wyżej współczynniki kształtów i momenty geometryczne, oprogramowane zgodnie z podanymi wzorami, poddano badaniom na rzeczywistych obrazach przedmiotów będących obiektemi działania robota [20]. Przy prowadzeniu szczegółowych badań wrażliwości współczynników kształtu na przekształcenia geometryczne wykorzystano 581 obrazów 18 obiektów. Każdy obiekt źródłowy przed wprowadzeniem do pamięci komputera był poddawany odpowiednim przekształceniom geometrycznym:

- obrotowi (0, 5, 10, 30, 60, 80, 90, 100, 120, 180 stopni),
- powiększeniu (1, 2, 3 razy),
- przesunięciu (w trzy skrajne położenia - bok, dół, róg obrazu).

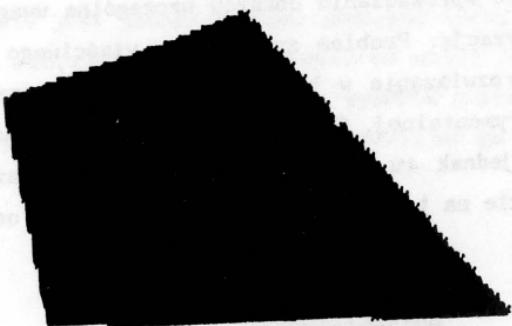
Należy podkreślić, że wszystkie te operacje były wykonane mechanicznie na obiektach (nie programowo w komputerze) tak, aby do pamięci były wprowadzone obrazy rzeczywiste. Wszystkie wprowadzone obrazy podlegały wstępnej obróbce za pomocą filtrów logicznych, a następnie zostały zbinaryzowane. Dalej, jeżeli zachodziła potrzeba, za pomocą odpowiednich procedur pomocniczych z obrazów były usuwane zbędne elementy w postaci zakłóceń, ciemnego tła itp. Tak przetworzone obrazy stanowiły materiał badawczy dla analizy cech.

Na rysunku 5.3.1 przedstawiono przykładowy obiekt powiększony dwukrotnie i obrócony o  $60^\circ$ . Ten sam obiekt powiększony trzykrotnie i obrócony o  $30^\circ$  znajduje się na rysunku 5.3.2. Na rysunkach tych można zauważać deformację obiektu wywołaną zmianą skali i obrotem, oraz to, jak nieprecyzyjnie aproksymowane są na cyfrowym obrazie linie proste.



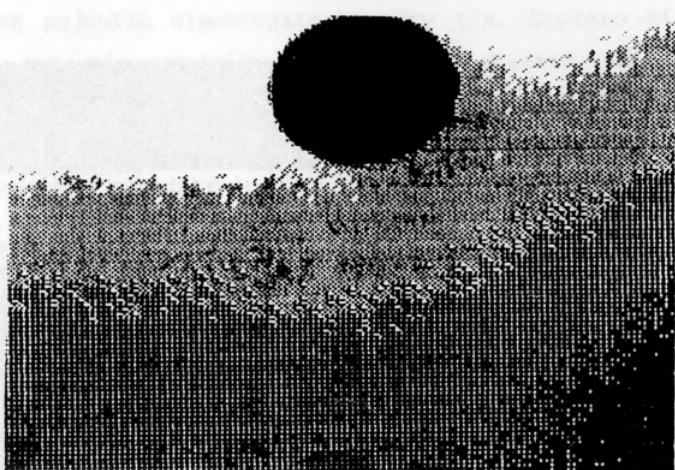
Rys. 5.3.1. Deltoid - powiększenie 2x, obrót 60°

Przy pracy z obrazami rzeczywistymi istnieje niebezpieczeństwo popełnienia błędów, które w dalszej kolejności mogą silnie zwiększać wyniki analizy. Poniżej omówiono kilka typowych sytuacji, posługując się celowo obrazami źródłowymi nie poddanymi wstępnej obróbce.



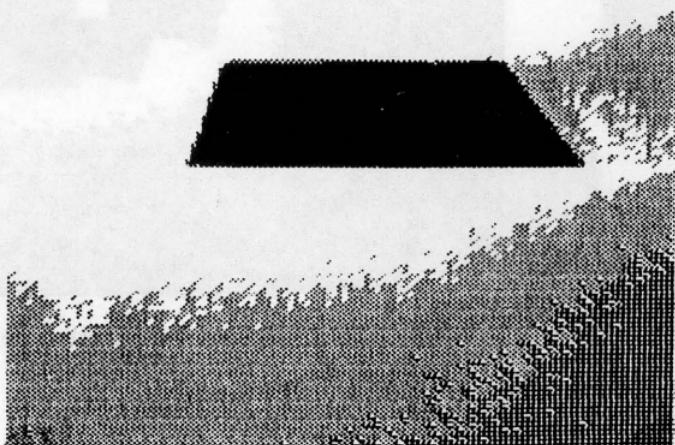
Rys. 5.3.2. Deltoid - powiększenie 3x, obrót 30°

Obraz koła, które zostało przesunięte do górnej krawędzi obrazu, pokazano na rys. 5.3.3. Do prezentacji wybrano w tym przypadku ten uproszczony kształt, gdyż deformacja koła jest najłatwiej zauważalna. Identyczny efekt powstaje po odchyleniu kamery od pionu.

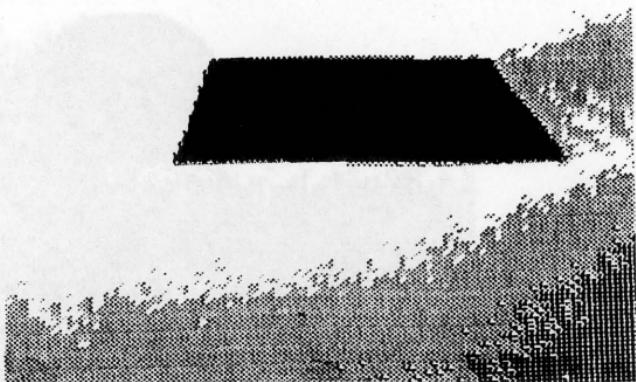


Rys. 5.3.3. Koło przesunięte do górnej krawędzi obrazu

Kolejnym ważnym czynnikiem powodującym błędy przy wprowadzaniu obrazu jest wrażliwość jakości uzyskiwanego obrazu cyfrowego na obrót analizowanego obiektu. Istotę problemu pokazano na rysunkach 5.3.4 i 5.3.5.

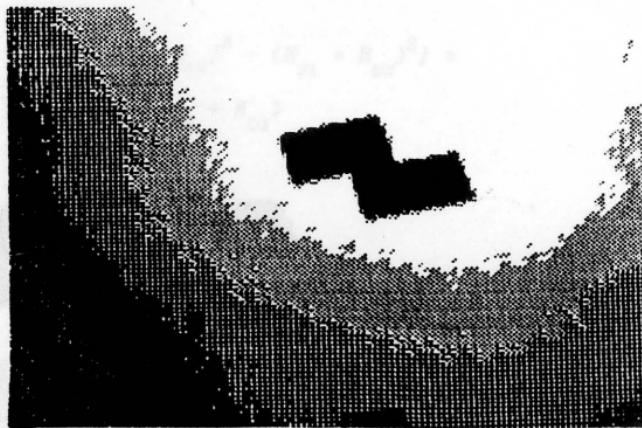


Rys. 5.3.4. Trapez w położeniu wyjściowym



Rys. 5.3.5. Trapez obrócony o  $1^\circ$

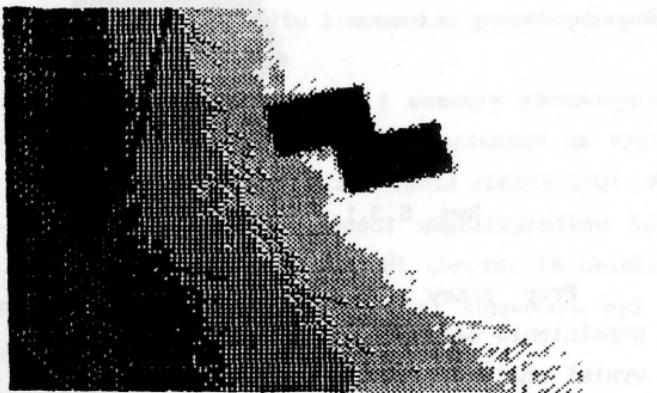
Na rysunku 5.3.4 przedstawiono źródłowy obraz, a na rysunku 5.3.5 jest pokazany ten sam obiekt, w tym samym położeniu, ale minimalnie (o  $1^\circ$ ) odchylony. Rysunki te pozwalają dostrzec, jakie błędy może powodować nawet minimalny obrót wynikający z braku precyzji pozycjonera lub niestandardowości operatora przy wykonywaniu obrotu obiekta.



Rys. 5.3.6. Obraz prawidłowo oświetlony

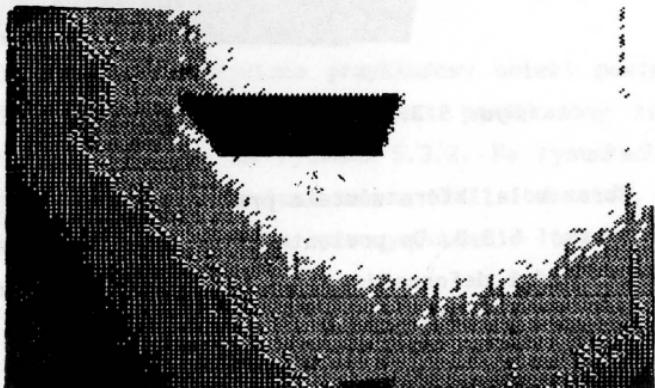
Na rysunku 5.3.6 pokazano detal przemysłowy oświetlony w sposób prawidłowy za pomocą systemu czterech lamp, natomiast na rysunku 5.3.7 przedstawiono tę samą sytuację, ale po zgaszeniu jednej lampy. Natych-

miał sę zauważalne zmiany w rozkładzie cieni na obrazie, lecz najbardziej istotne sę zmiany brzegów obiektu.



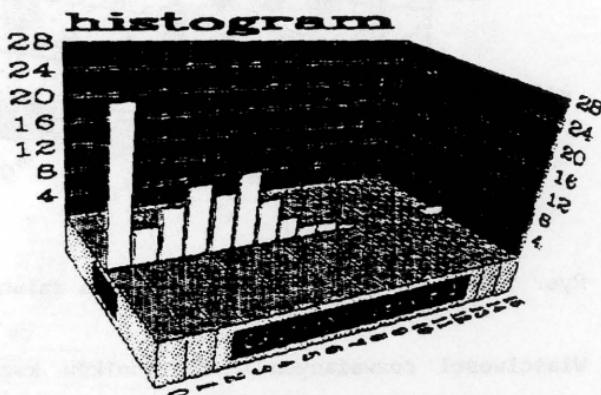
Rys. 5.3.7. Obraz nieprawidłowo oświetlony

Po wprowadzeniu obrazów szczególną uwagę należy zwrócić na właściwa binaryzację. Problem znalezienia właściwego progu jest bardzo złożony i jego rozwiązanie w takich przypadkach nierzadko znajduje się na drodze eksperymentalnej. Szersze omówienie tego tematu znaleźć można w rozdziale 3.2, jednak tu odnotujmy głównie fakt wrażliwości obrazów poddawanych analizie na ten czynnik. Weźmy na przykład oraz źródłowy z rysunku 5.3.8.



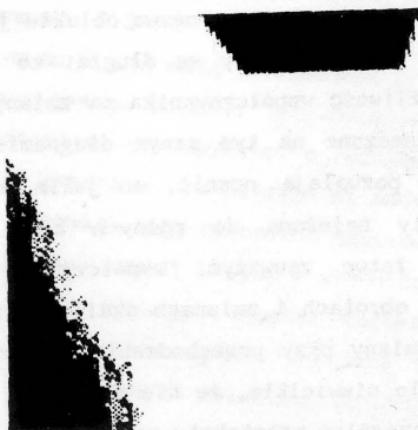
Rys. 5.3.8. Obraz poddawany binaryzacji

Histogram tego obrazu jest przedstawiony na ilustracji 5.3.9. Na podstawie obrazu i histogramu odczytać można, że znajdujący się na nim obiekt ma zapewne stopień szarości 15, co pozwala wyznaczyć próg binaryzacji na poziomie 11 (lub dowolnie 12, 13, 14).



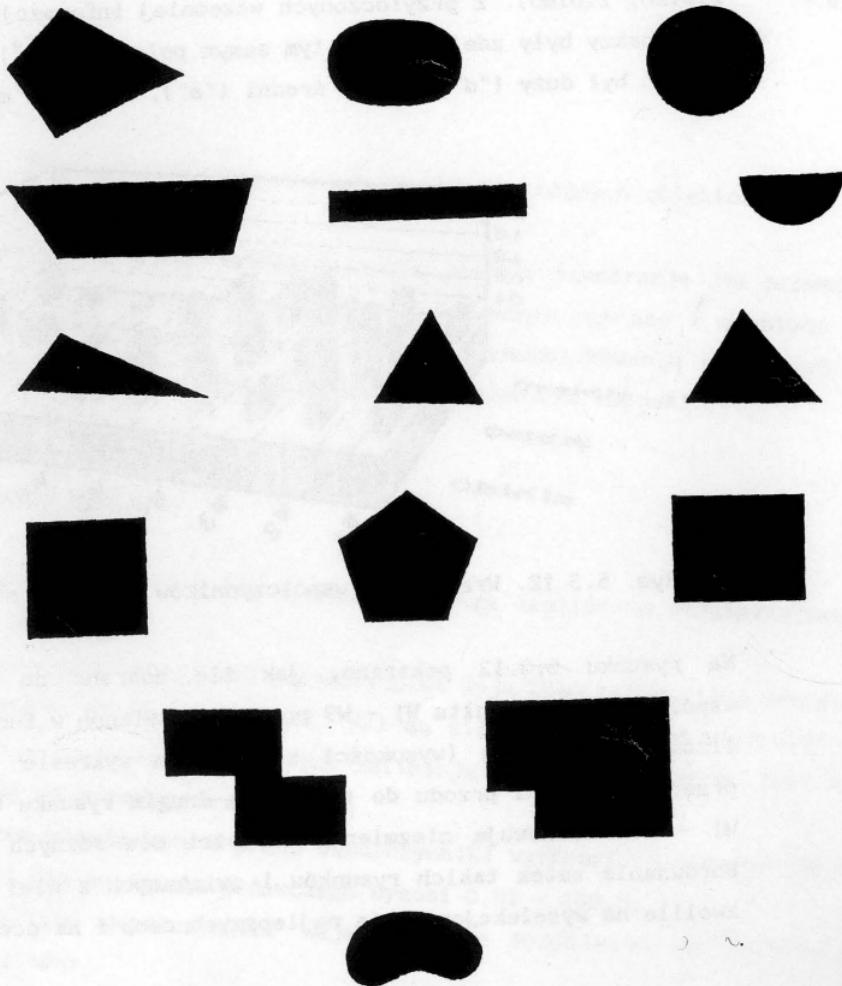
Rys. 5.3.9. Histogram obrazu z rysunku 5.3.8

Takie postępowanie jest jednak błędem, ponieważ każdy wprowadzony do pamięci komputera rzeczywisty obraz obiektu ma mniej lub bardziej rozmyte brzegi i ustawianie progu binaryzacji na wysokim poziomie zwykle pozostawia na obrazie jedynie wnętrze obiektu pozbawiając go krawędzi.



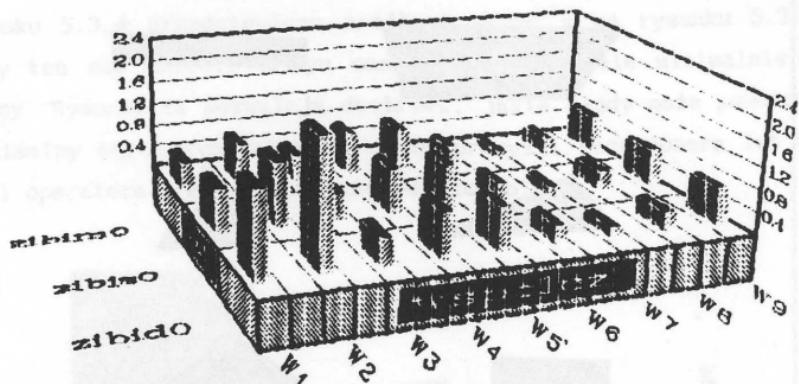
Rys. 5.3.10. Obraz z rysunku 5.3.8 po poprawnej binaryzacji

Obniżenie progu do poziomu 10 też niewiele pomaga, choć na obrazie zaczynają się już pojawiać ciemniejsze obszary tła. Dopiero binaryzacja na poziomie 9 zapewnia właściwe odwzorowanie obiektu, bez utraty jego punktów brzegowych i jednocześnie eliminując znakomitą większość punktów tła wokół obiektu (rys. 3.3.10). Zbinaryzowane obrazy niektórych obiektów użytych w badaniach przedstawiono na rysunku 3.3.11.



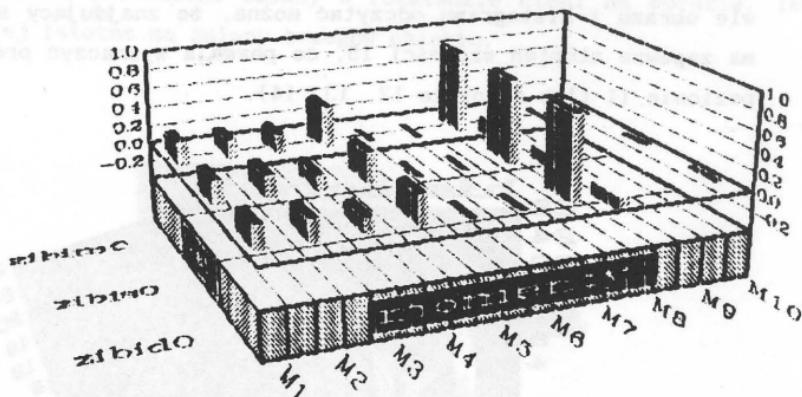
Rys. 3.3.11. Kształty obiektów używanych w badaniach

Wyniki badań wszystkich współczynników kształtu i wszystkich momentów zebrano w pracy [20]. Ze względu na ich objętość (ponad 100 stronnic tabel, zestawień i wykresów) przytoczenie tu tych wyników jest niemożliwe. Dlatego na rysunkach 5.3.12 i 5.3.13 pokazano przykładowe wyniki badań za pomocą "trójwymiarowych" wykresów, na których wartości rozważanych współczynników przedstawiono w postaci wysokości słupków. Symbole badanych współczynników są wypisane wzdłuż osi przebiegającej od lewej do prawej strony (na pierwszym wykresie są współczynniki od W1 do W9, a na drugim momenty od M1 do M10). Natomiast wzdłuż osi biegającej "w głąb" podano nazwy trzech rozważanych mutacji tego samego obrazu (*zibido*, *zibiso*, *zibimo*). Z przytoczonych wcześniej informacji wynika, że wszystkie obrazy były zdejmowane w tym samym położeniu ( $0^\circ$ ), natomiast pierwszy z nich był duży ("d"), drugi średni ("s"), a trzeci mały ("m").



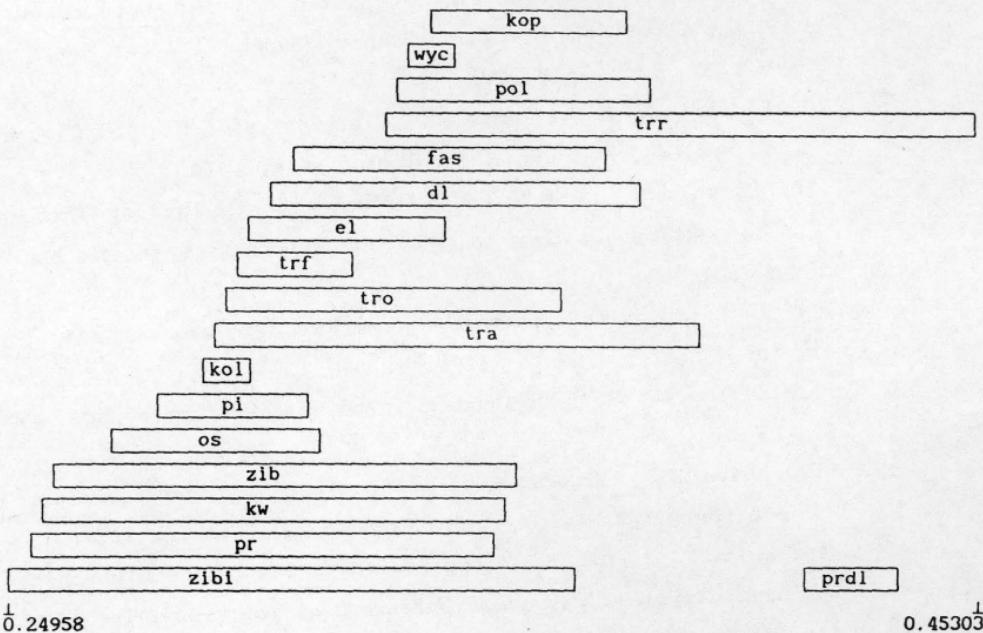
Rys. 5.3.12. Wrażliwość współczynników kształtu na wielkość obiektu

Na rysunku 5.3.12 pokazano, jak źle dobrane do charakteru zadania współczynniki kształtu W<sub>1</sub> - W<sub>9</sub> podlegają zmianom w funkcji wielkości analizowanego obiektu (wysokości słupków na wykresie zmieniają się przy przechodzeniu od przodu do tyłu). Na drugim rysunku widzimy, że momenty M<sub>1</sub> - M<sub>10</sub> zachowują niezmienne wartości dla różnych wielkości obiektu. Porównanie setek takich rysunków i związanych z nimi tabel wartości pozwoliło na wyselekcjonowanie najlepszych cech i na ocenę ich jakości.



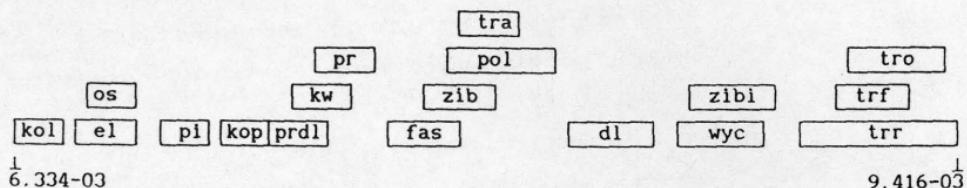
Rys. 5.3.13. Niewrażliwość momentów na zmiany wielkości obiektu

Właściwości rozważanych współczynników kształtu i momentów geometrycznych można także wygodnie prześledzić na diagramach obrazujących, jakie wartości przyjmują te współczynniki dla różnych mutacji tego samego obiektu (np. w różnych położeniach i w różnej skali) oraz dla różnych (pod względem kształtu) obiektów. Przykładowe diagramy tego typu przedstawiono na rysunkach 5.3.14 i 5.3.15. Na pierwszym z nich pokazano zachowanie współczynnika  $W_8$ , który w wyniku badań okazał się mało przydatny. Wartości rozważanego współczynnika odkładano wzdłuż osi poziomej w postaci prostokątów o długości odpowiadającej zmienności wartości współczynnika, odnotowanych przy zbadanych zniekształcenach geometrycznych rozważanego obiektu (umowna nazwa obiektu jest wpisana wewnątrz prostokąta). Widac, że prostokąty są długie, co interpretować można jako niekorzystną wrażliwość współczynnika na zmiany, np. rozmiarów obiektu. Równocześnie zaznaczone na tym samym diagramie podobne prostokąty dla innych obiektów pozwalają ocenić, w jakim stopniu ten współczynnik różnicuje obiekty należące do różnych klas (mające istotnie różne kształty). Jak łatwo zauważyc, współczynnik  $W_8$  cechuje się silną zmiennością przy obrotach i zmianach skali wszystkich badanych obiektów, natomiast jego zmiany przy przechodzeniu od jednej do drugiej klasy obiektów są na tyle niewielkie, że nie pozwalają na ich jednoznaczne rozpoznanie (poszczególne prostokąty zachodzą na siebie).



Rys. 5.3.14. Przedziały zmienności współczynnika W8

Odmienna i znacznie korzystniejsza sytuacja wynika z diagramów przedstawionych na rysunku 5.3.15. Pokazane na nim przedziały zmienności momentu M7 charakteryzują się małą zmiennością przy deformacjach geometrycznych obrazów tego samego rodzaju (poszczególne prostokąty mają bardzo małą długość), natomiast dla obiektów o różnych kształtach wartości tego momentu różnią się znacznie, co pozwala na podejmowanie prób rozpoznawania na podstawie wartości tego parametru niektórych rozważanych obiektów. Mimo tej wysokiej oceny moment M7 także nie może być użyty do rozpoznawania, jako jedyna miara opisująca kształt obiektów, ponieważ rozpoznanie takie byłoby niejednoznaczne (pewne wartości tego momentu występują - takie same - dla kilku różnych obiektów, co widać na diagramie jako wzajemne zachodzenie na siebie poszczególnych prostokątów).



Rys. 5.3.15. Wartości momentu M7 dla różnych obiektów

Przedstawione wyżej wyniki stanowią jedynie ilustrację dla prowadzonych rozważań, natomiast w opisywanych badaniach zebrano i oceniono takich diagramów i zestawień kilkaset. Po przeanalizowaniu całego zbioru wyników można było wyciągnąć następujące zasadnicze wnioski:

#### Współczynniki kształtu

- współczynniki kształtu wykazują większą czułość na zniekształcenia niż momenty;
- wpływ dyskretyzacji na współczynniki daje błąd rzędu kilku procent;
- niektóre współczynniki ( $W_1$ ,  $W_2$ ) są silnie zależne od wielkości obiektu (jest to zgodne z ich definicją) i ich użyteczność jest zależna od sposobu normalizacji;
- zakres przyjmowanych przez współczynniki wartości (z wyłączeniem  $W_1$  i  $W_2$ ) dla materiału badawczego wynosi 0,01 - 100,0;
- wszystkie współczynniki mają zblizioną wrażliwość na deformacje kształtów;
- czas obliczeń współczynnika Danielssona jest kilkadziesiąt razy dłuższy od czasu obliczeń pozostałych współczynników.

### Momenty

- wyrażenia momentowe nie są zbyt wrażliwe na zmiany kształtów obiektów;
- wpływ dyskretyzacji na momenty daje błąd rzędu kilku procent;
- błąd rośnie w miarę wzrostu rzędu momentów;
- zakres przyjmowanych wartości momentów dla materiału badawczego wynosi od  $10^{-22}$  do  $10^0$ ;
- w zależności od kształtu obiektów (dla określonej klasy) niektóre momenty przyjmują wartości zbyt małe dla istotności analizy (poniżej  $10^{-9}$ ), wtedy przy wyborze wektora cech można je pominać;
- największą inwariantność wykazują momenty M1 i M7;
- opracowane algorytmy obliczania momentów są bardzo szybkie.

Rozdział ten można zamknąć stwierdzeniem, że w wyniku badań zdecydowanie najlepszym parametrem okazał się moment M7, chociaż i on wykazywał niekiedy niekorzystne właściwości, zwłaszcza przy małych obiektach.

### LITERATURA

1. *Blair D., Bliss T.*: Geography Department of Nottingham University Bulletin, 1967.
2. *Bribiesca E., Guzman A.*: How to describe Pure Form and How to Measure Differences in Shape Numbers. Pattern Recognition, vol.12, no.2, 1980, s. 101-112.
3. *Danielsson P.*: A New Shape Factor. Techn. Rep. ISY-I0066 Linkoping University 1975.
4. *Duda R.O., Hart P.E.*: Pattern Classification and Scene Analysis. Wiley, New York 1973.
5. *Dudani S.A., Breeding K.J., McGhee R.B.*: Aircraft Identification by Moment Invariants. IEEE Transactions on Computers, vol.C26, no.1, 1977, s.39-46.
6. *Freeman H., Glass J.M.*: On the Quantization of Line-Drawing Data. IEEE Transactions on Systems, Science and Cybernetics, vol.SSC5, no.1, 1969, s. 70-79.

7. Gonzales R.C., Wintz P.: Digital Image Processing. Addison-Wesley Reading, 1977.
8. Gupta L., Srinath M.D. : Contour Sequence Moments for the Classification of Closed Planar Shapes. Pattern Recognition, 1987, vol.20, no.3, s.267-272.
9. Haralick R. M.: A Measure of Circularity of Digital Figures. IEEE Tr. on Systems, Man and Cybernetics, SMC-4, 1974.
10. Hsia T. C.: A Note on Invariant Moments in Image Processing. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics vol.SMC11, no.12, 1981, s. 831-834.
11. Hu M. K.: Visual pattern recognition by moment invariants. IRE Trans. Inf. Theory, 1962, s. 179-187.
12. Kulikowski J. L. : Cybernetyczne układy rozpoznające. PWN, Warszawa 1972.
13. Kulpa Z.: Analiza właściwości współczynników kształtu. Mat. Konf. Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna. Wrocław 1979.
14. Kulpa Z. i in.: Ilościowe pomiary zmian kształtu komórek w ruchu przy użyciu systemu cyfrowego przetwarzania obrazów CPO-2. Mat. Konf. Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna. Gliwice 1978.
15. Leja F.: Geometria analityczna. PWN, Warszawa 1966.
16. Lucas D.: Moment techniques in picture analysis, Proc. IEEE Computer Society on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington 1983.
17. Malinowska K.: Ocena stopnia rozwinięcia kształtu przekrojów poprzecznych włókien. Przegląd Włókienniczy nr 4, 1975.
18. Śluzek A.: Zastosowanie metod momentowych do identyfikacji obiektów w cyfrowych systemach wizyjnych. WPW, Warszawa 1990.
19. Tadeusiewicz R., Mikrut Z.: Komputerowa analiza współczynników kształtu ziaren z wykorzystaniem systemu "CESARO". XIII Krakowska Konferencja Przeróbki Kopalin. Kraków 1979, s. 356 - 366.
21. Tadeusiewicz R. i in.: Raporty naukowe z prac badawczych CPBP 02.13 temat 3.4.: Oprogramowanie systemu wizyjnego robota przemysłowego, Tom IV - Metody analizy obrazów, Kraków 1989.
22. Zakaria M.F., Vroomen L.J., Zsombor-Murray P.J.A., Kessel J.M.: Fast