ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1980

Seria: AUTOMATYKA z. 56 Nr kol. 652

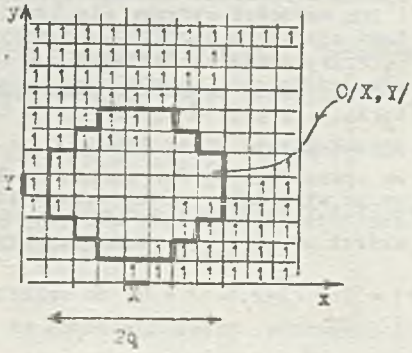
Zbigniew M. Wójcik
Centrum Badań Kosmicznych
Polska Akademia Nauk

METODA ANALIZY LINII W PROCESIE ROZPOZNAWANIA PRZEDMIOTÓW PRZEZ ROBOTY

Streszczenie. Obrazy obiektów posiadających wydłużone kształty są po wstępnej obróbce analizowane za pomocą operatora, mającego kształt koła. W zależności od liczby spójnych obszarów, zawartych w tym kole, rozpoznawane są odcinki, połączenia i zakończenia linii. Rozpoznawane obiekty są reprezentowane za pomocą grafów. Przedstawiony jest wyspecjalizowany procesor rozpoznawania postaci linearnych.

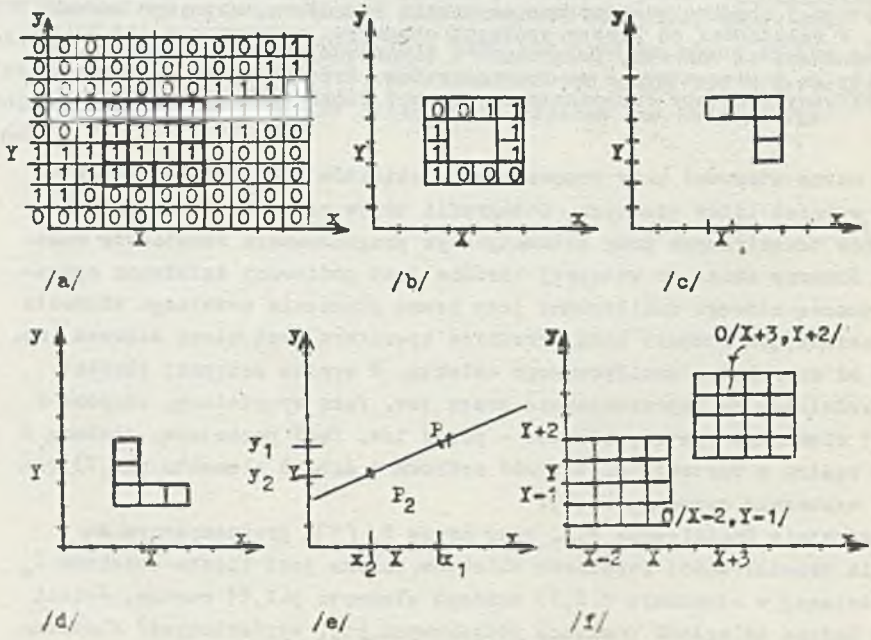
Metodę można stosować przy rozpoznawaniu obiektów o kształtach wydłużonych, jak również liter pisanych, fotografii torów cząstek elementarnych lub rysunków technicznych przy automatycznym programowaniu obrabiarek numerycznych. Binarny obraz po wstępnej obróbce jest poddawany działaniu operatora, za pomocą którego analizowane jest pewne otoczenie dowolnego elementu rastra, posiadające kształt koła. Średnica operatora jest nieco większa (np. dwa razy) od szerokości analizowanego obiektu. W wyniku wstępnej obróbki obrazy przedmiotów są reprezentowane przez tzw. fazę wyróżnioną, złożoną z wartości 1 elementów rastra, ich tło - przez tzw. fazę pozostałą, złożoną z elementów rastra o wartości 0. Wartość cyfrowa 1 albo 0 elementu p(X,Y) rastra jest oznaczana symbolem (X,Y).

W E-algorytmie Danielssona P.E. oraz Kruse B. [1], przeznaczonym do sprawdzania prawidłowości rozmiarów obiektów, badana jest liczba obiektów I_w fazy wyróżnionej w otoczeniu O(X,Y) każdego elementu p(X,Y) rastra. Jeżeli $I_w > 1$, to badana odległość pomiędzy jedynkowymi (tj. wyróżnionymi) obszarami jest mniejsza od założonej średnicy 2q otoczenia O(X,Y) (rys. 1).



Rys. 1. Otoczenie O(X,Y) zawiera więcej niż jeden obiekt i dlatego E-algorytm wydaje poprawną decyzję, że odległość pomiędzy obszarami jedynkowymi jest mniejsza od średnicy 2q.

Stosując otoczenie (operator) o średnicy większej od grubości obiektów, można prowadzić proces rozpoznawania linii. Kierunek przesuwania operatorów łatwo wyznaczyć, analizując cyfrowe wartości (X,Y) elementów leżących na granicy otoczenia. Na przykład, dla operatora szesnastoelementowego badane są elementy przedstawione na rys. 2b. Rys. 2b przedstawia także wartości elementów granicznych tego otoczenia dla linii, pokazanej na rys. 2a. Jeśli



Rys. 2. a) Fragment linii na rastrze, reprezentowanej przez wartości 1 oraz operator szesnastoelementowy; b) Elementy graniczne tego operatora i ich wartości cyfrowe dla linii z rys. 2a; c) Elementy graniczne tego operatora uwzględniane przy obliczaniu współrzędnych punktu $P_1(x_1,y_1)$, gdy (X-1,Y+2) = 0 i (X+2,Y-1) = 0; d) Elementy tego operatora, brane pod uwagę przy wyznaczaniu współrzędnych punktu $P_2(x_2,y_2)$, gdy (X-1,Y+2) = 0 i (X+2,Y-1) = 0; e) Odcinek prostej, przechodzącej przez punkty P_1 i P_2 i wyznaczającej kierunki przesuwu operatora; f) Dwa operatory O(X+3,Y+2) oraz O(X-2,Y-1), otrzymane po wykonaniu przemieszczeń otoczenia O(X,Y) z rys. 2a,b w miejsca wyznaczone przez elementy p(X+3,Y+2) i p(X-2,Y-1), leżące wzdłuż prostej przechodzącej przez P_1 i P_2

(X-1,Y+2) = 0 i (X+2,Y-1) = 0, to obliczane są współrzędne $P_1(x_1,y_1)$ środka ciężkości elementów, przedstawionych na rys. 2c i posiadających wartości cyfrowe równe 1. Współrzędne te wynoszą:

$$x1 = \frac{X - 1 + 3X + 3\cdot 2}{4} = X + 1,75$$

$$y1 = \frac{2Y + 2\ 2 + Y + 1 + Y}{4} = Y + 1,25$$

Wyznaczane są również w analogiczny sposób współrzędne $P_2(x_2,y_2)$ środka ciężkości elementów, przedstawionych na rys. 2d i posiadających jednocześnie wartości cyfrowe równe jedności:

$$x2 = \frac{3X - 3\cdot 1}{3} = X-1$$

$$y2 = \frac{Y - 1 + Y + Y + 1}{3} = Y$$

Przez obliczone punkty P_1 i P_2 można przeprowadzić odcinek prostej, jak na rys. 2e. Prosta ta i punkty P_1 oraz P_2 wyznaczają dwa elementy rastra, na które należy przesunąć operator. Centralny element $p(X,Y)$ otoczenia $O(X,Y)$ powinien być przesunięty w okolice punktów P_1 i P_2. Ten centralny element $p(X,Y)$ może być przesunięty również na zewnątrz punktów P_1 oraz P_2 (np. na element $p(X-2,Y-1)$ lub na element $p(X+3,Y+2)$ jak na rys. 2f) w celu dalszej analizy linii, przedstawionej na rys. 2a. Zgodnie z rys. 2e,f, mogą być uzupełniane (kompensowane) drobne ubytki cienkich linii. W tym celu odcinek prostej, przechodzącej przez punkty P_1 i P_2, należy odpowiednio wydłużyć. Ogólny wzór na wartość współrzędnej x_k punktów $P_1(x_1,y_1)$ i $P_2(x_2,y_2)$ można zapisać następująco:

$$x_k = \frac{\sum_{i=1}^{m} X_i(X_i,Y_i)}{\sum_{i=1}^{m} (X_i,Y_i)} \qquad /1/$$

gdzie: $k = 1$ albo 2,

m jest liczbą elementów, leżących na brzegach założonego otoczenia $O(X,Y)$ i uwzględnianych przy wyznaczaniu współrzędnych punktu P_k;

(X_i,Y_i) jest cyfrową wartością 0 albo 1 elementu $p(X_i,Y_i)$, leżącego na krawędzi otoczenia $O(X,Y)$ i uwzględnianego przy obliczaniu współrzędnych punktu P_k;

X_i jest pierwszą współrzędną elementu $p(X_i,Y_i)$, należącego do otoczenia $O(X,Y)$;

Wartość X_i jest odnoszona do elementu centralnego $p(X,Y)$ otoczenia $O(X,Y)$ (tzn. $X_i \in \{X-1,X+3,X,X-4,\ldots\}$).

Podobnie zapisujemy wzór na y_k:

$$y_k = \frac{\sum_{i=1}^{m} Y_i(X_i,Y_i)}{\sum_{i=1}^{m} (X_i,Y_i)} \qquad /2/$$

W praktyce wygodniej jest stosować takie otoczenia O(X,Y), których średnica 2q jest liczbą nieparzystą. Na przykład, linia pozioma lub pionowa o grubości dwóch elementów, przechodząca przez środek szesnastoelementowego otoczenia, nie może być łatwo zwężona, ponieważ punkty P_1 i P_2 przechodzą dokładnie pomiędzy elementami rastra.

Przed procesem rozpoznawania linii powinna być oszacowana grubość linii zgodnie z E-algorytmem; jeżeli liczba I_w obiektów fazy wyróżnionej (tj. złożonej z elementów posiadających wartości 1) w założonym otoczeniu O(X,Y), analizującym cały raster, przekracza wartość 1 chociaż dla jednego elementu p(X,Y), to należy użyć otoczenia o mniejszej średnicy. W ten sposób sformułowany został algorytm automatycznego dobierania wielkości otoczenia O(X,Y) dla rozpoznawanego obrazu graficznego. Zastosowanie w miarę dużego otoczenia O(X,Y) zwiększa natomiast szybkość analizy linii (otoczenie to jest przesuwane o wielkość równą promieniowi q tego otoczenia).

Dowolny rozpoznawany (i zwężony) odcinek linii, wydzielony w otoczeniu O(X,Y), jest opisany przez współrzędne p(x,y), kierunek a (a jest kątem nachylenia linii względem osi Ox rastra), długość d oraz ewentualnie także przez grubość i kolor linii:

$$x = \frac{x_1 + x_2}{2} \qquad /3/$$

$$y = \frac{y_1 + y_2}{2} \qquad /4/$$

$$a = \arctan \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \qquad /5/$$

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

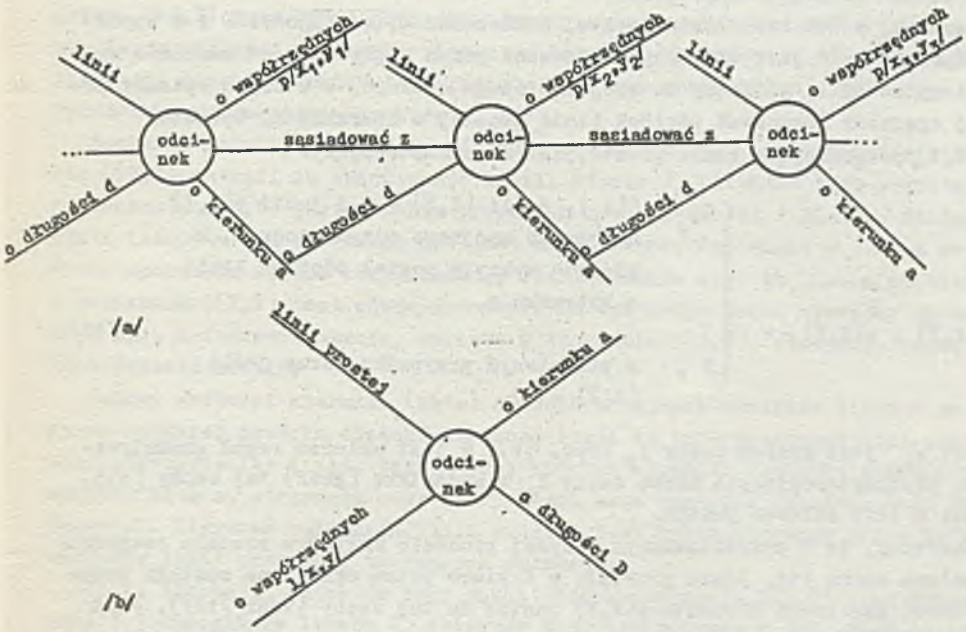
gdzie: x_1, y_1 są współrzędnymi punktu P_1, natomiast
x_2, y_2 są współrzędnymi punktu P_2.

Cztery współrzędne x_1, x_2, y_1, y_2 punktów P_1 i P_2 zostały więc zastąpione przez cztery inne parametry, praktycznie bardziej użyteczne i intuicyjnie bardziej zrozumiałe:

przez współrzędne x,y środka geometrycznego odcinka tej linii,
przez kierunek a tego odcinka oraz
przez długość d tego odcinka.

W wyniku kolejnych kroków operatora (np. w kierunku punktu P_1) linia prosta transformowana jest w graf, złożony z ciągu identycznych węzłów. Każdy

węzeł posiada cztery atrybuty (tzn. każdy węzeł jest argumentem czterech relacji jednoczłonowych). Węzły są połączone łukami nieskierowanymi, indeksowanymi wyrażeniem "sąsiaduje z" (rys. 3a). W grafie linii prostej zmienia się jedynie atrybut położenia (tzn. współrzędne p(x,y)). Nieznacznie może zmieniać się także długość d i kierunek a, ale wynika to już z dyskretnej natury rastra. Reprezentowanie linii prostej za pomocą rozbudowanego grafu,



Rys. 3. a) Graf trzech odcinków linii prostej, otrzymywany w wyniku trzech kolejnych kroków operatora; b) Zredukowany graf q_{lp} tych samych trzech odcinków linii prostej. D=3d. Wartości współrzędnych l(x,y) wynoszą: $x = (x_1+x_2+x_3)/3$ oraz $y = (y_1+y_2+y_3)/3$.

w którym niemal wszystkie elementy są identyczne, jest uciążliwe. Wygodne jest natomiast reprezentowanie odcinka linii prostej za pomocą grafu zredukowanego (rys. 3b), złożonego z jednego węzła, indeksowanego rzeczownikiem "odcinek" oraz z atrybutów tego węzła, indeksowanych słowami: "linii", "o kierunku "a"", "o długości "D"" i "o współrzędnych l(x,y)", przy czym:

$$D = n \cdot d \qquad /7/$$

$$x = \frac{x_1 + x_2 + \ldots + x_n}{n} \qquad /8/$$

$$y = \frac{y_1 + y_2 + \ldots + y_n}{n} \qquad /9/$$

gdzie n jest liczbą spójnych odcinków o jednakowych kierunkach a i długościach d, wykrytych przez operator w założonych otoczeniach o średnicy d.

Jeżeli $n > 1$, to atrybut indeksowany rzeczownikiem "linii" otrzymuje dodatkowe słowo "prostej" (rys. 3b).

Cecha l_p = "odcinek linii prostej o kierunku a, o długości D i o współrzędnych $l(x,y)$" jest więc reprezentowana przez każdy element rastra o wartości cyfrowej 1, należący do spójnego ciągu otoczeń, w których opisany powyżej operator rozpoznał odcinek linii prostej o kierunku a. Operator $h_{l_p}(X,Y)$, rozpoznający linie proste, jest więc następujący:

$$h_{l_p}(X,Y) : p(X,Y) \rightarrow \begin{cases} q_{l_p} = G(l_p), \text{ jeśli } (X,Y) = 1 \text{ i jeśli } p(X,Y) \text{ należy do spójnego ciągu otoczeń, w których wykryty został odcinek linii o kierunku a,} \\ \emptyset, \text{ w przeciwnym przypadku (oraz jeśli } (X,Y) = 0). \end{cases} \qquad /10/$$

gdzie: q_{l_p} jest grafem cechy l_p (rys. 3b); G jest zbiorem reguł gramatycznych, przekształcających nazwę cechy l_p w semantykę (graf) tej cechy [4,5, 6,10]; $\emptyset$ jest zbiorem pustym.

Zauważmy, że w przedstawionym powyżej procesie najpierw została rozpoznana badana cecha (tj. linia prosta), a dopiero potem określona została przynależność dowolnego elementu $p(X,Y)$ rastra do tej cechy (wzór /10/). Jest to bardzo istotna, dodatnia cecha tego procesu rozpoznawania. Algorytm rozpoznawania linii jest w ten sposób szybki: analizuje bowiem równolegle dość znaczne obszary rastra, zawarte w otoczeniach $O(X,Y)$. Jednocześnie zaś z nie mniejszą szybkością pozwala na określenie przynależności każdego elementu rastra do badanej cechy. Szybkość rozpoznawania linii jest znaczna również dlatego, że operator przesuwa się wzdłuż linii, nie tracąc czasu na przeszukiwanie miejsc, gdzie wartości elementów rastra są równe zeru.

Dwa obrazy są identyczne, jeżeli grafy tych obrazów są identyczne (tzn. automorficzne). Identyfikacja rozpoznanej linii polega więc na badaniu automorfizmu jej grafu, otrzymanego w wyniku rozpoznawania z grafem wzorcowym. Rozpoznawanie linii polega zaś na transformowaniu jej w jednoznaczny graf. Identyfikacja rozpoznanych linii może być również oparta na tzw. strukturalnym podejściu do rozpoznawania obrazów, w którym stosowane są gramatyki formalne [2].

Algorytm rozpoznawania linii spełnia podstawowy warunek reprezentowania

zdarzeń [4,5,6,10], ponieważ otoczenie O(X,Y) jest symetryczne. Parametry x,y,a,d odcinka linii zawartego w otoczeniu O(X,Y) są wyznaczane niezależnie od położenia linii w tym otoczeniu. Jednocześnie analizowane są wszystkie linie na rastrze, pomimo że otoczenie O(X,Y) przesuwa się tylko po tych liniach. Nietrudno jednak rozszerzyć działanie operatora rozpoznającego linie na każdy element p(X,Y) rastra z osobna. Wymagałoby to jednak długiego czasu rozpoznawania linii.

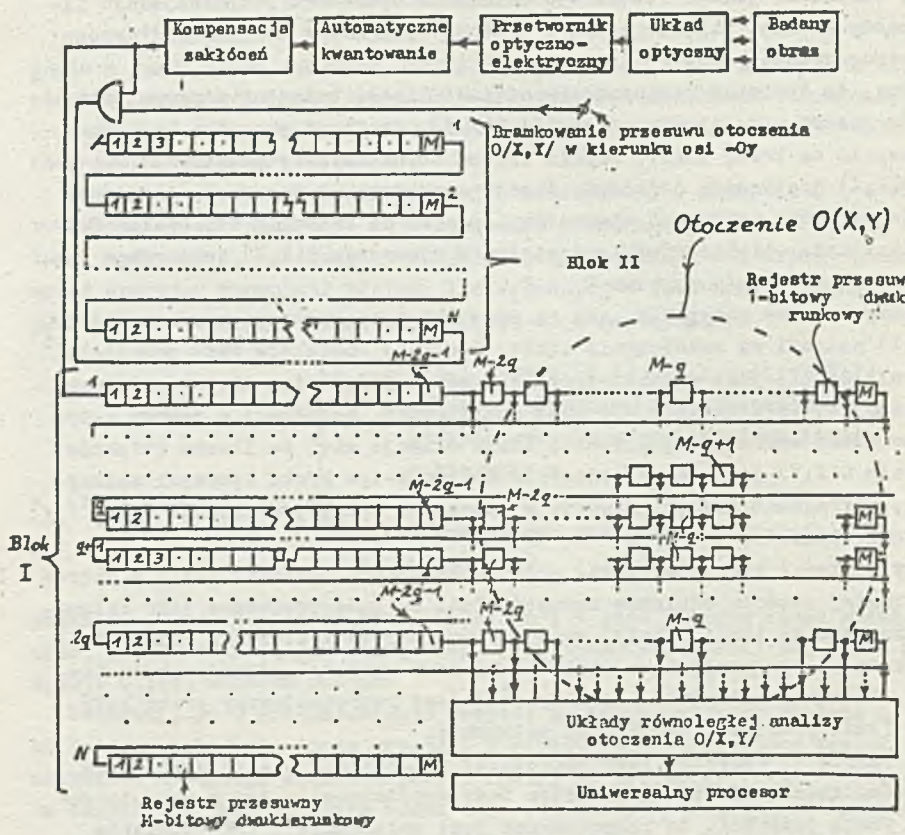
Załóżmy, że operator rozpoznający odcinki linii, badający zaczernienia elementów rastra w założonym otoczeniu O(X,Y), trafi na początku procesu rozpoznawania na brzeg linii. Dopóki liczba obiektów fazy pozostałej w otoczeniu O(X,Y) jest równa jedności, dopóty operator rozpoznawania linii nie analizuje wartości cyfrowych elementów leżących na krawędzi otoczenia. Dopiero gdy liczba obiektów fazy pozostałej w otoczeniu O(X,Y) jest równa dwa, wyznaczane są położenia punktów P_1 i P_2.

Rozważmy istotny przypadek, gdy na początku procesu rozpoznawania otoczenie O(X,Y) natrafi na zakończenie linii. Liczba I_o obiektów fazy pozostałej w otoczeniu O(X,Y) jest w takim przypadku równa jedności i dlatego odcinek linii leżący w tym otoczeniu nie jest analizowany. Natomiast w pewnym n-tym kroku operatora wzdłuż rozpoznawanej linii okazuje się, że liczba obiektów w otoczeniu O(X,Y) jest równa jedności. Na tym n-tym kroku operator zatrzymuje się, a fragment obrazu, zawarty w otoczeniu O(X,Y), otrzymuje nazwę "zakończenie linii".

Zmiany wartości kierunku (kąta) a dwóch kolejnych odcinków linii w szeregu co najmniej sześciu odcinków badanej linii są interpretowane jako załamanie (zakrzywienie) linii. Węzły, przy których atrybuty kierunku zmieniały wartość kąta a, otrzymują nowe nazwy (tzn. nowe wartości semantyczne): "załamania". Kierunek załamania linii prostej jest reprezentowany przez kąty odcinków linii prostych, tworzących załamanie.

Jeśli liczba I_o obiektów fazy pozostałej w otoczeniu O(X,Y) jest równa trzy i jednocześnie liczba I_w obiektów fazy wyróżnionej w tym samym otoczeniu jest równa jedności, to rozpoznawane jest połączenie trzech odcinków linii. Natomiast gdy liczba I_o obiektów fazy pozostałej w otoczeniu O(X,Y) równa jest cztery, a jednocześnie liczba I_w obiektów fazy wyróżnionej w tym samym otoczeniu O(X,Y) równa jest jedności, wtedy rozpoznawane jest skrzyżowanie dwóch linii.

Analiza otoczeń O(X,Y) jest niezwykle czasochłonna nawet przy użyciu dużej, uniwersalnej maszyny cyfrowej. Winę za ten fakt ponosi w dużej mierze szeregowa praca uniwersalnego procesora oraz częste przesyłania częściowych wyników obliczeń do pamięci. Równoległa, jednoczesna analiza otoczenia O(X,Y) w układzie przedstawionym na rys. 4 znacznie przyspiesza analizę linii. Sygnał elektroniczny, otrzymany na wyjściu rastrowego przetwornika optyczno-elektrycznego, poddawany jest automatycznemu kwantowaniu, a następnie kompensacji zakłóceń i defektów obrazów. Wynikowy obraz binarny przeka-



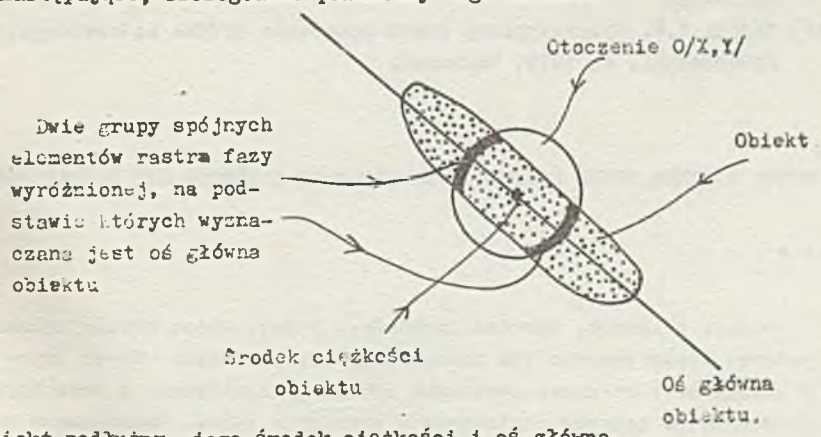
Rys. 4. Schemat wyspecjalizowanego procesora rozpoznawania linii w czasie rzeczywistym

zywany jest na wejście pamięci, zbudowanej z połączonych szeregowo rejestrów przesuwnych dwukierunkowych. W trakcie kolejnych kroków wzdłuż rozpoznawanej linii operator może przesuwać się we wszystkich możliwych kierunkach w wyniku przesuwu bitów w rejestrach. Elektroniczny przesuw obrazu w

pamięci (w rejestrach przesuwnych) jest najbardziej precyzyjny i szybszy od mechanicznego ruchu obrazu pod obiektywem układu rozpoznającego. Wielkość przesunięcia otoczenia O(X,Y) jest obliczana wcześniej na podstawie wzorów /1/ i /2/ w uniwersalnym procesorze. Procesor ten steruje jednocześnie przesuwem bitów w rejestrach. Odczytany obraz binarny jest wprowadzany do bloku I rejestrów (tj. do bloku N rejestrów przesuwnych M-bitowych). Blok II rejestrów służy wyłącznie do przechowywania obrazu przesuwnego wzdłuż osi -Oy rastra. Bloki I i II rejestrów przesuwnych dają więc możliwość przesuwania otoczenia O(X,Y) po całym rastrze, złożonym z M*N elementów. Otoczenie O(X,Y) jest analizowane w wyspecjalizowanych układach szybkiego, równoległego przetwarzania obrazów. Na przykład, liczba I obiektów, znajdujących się w otoczeniu O(X,Y), może być obliczana zgodnie z metodą przedstawioną w pracy [9]. Uniwersalny procesor steruje pracą układów równoległej analizy otoczenia O(X,Y) oraz przeprowadza identyfikację rozpoznanych obiektów.

System, który potrafi samodzielnie rozpoznawać odcinki linii, załamania tych linii, połączenia i zakończenia linii oraz relacje na tych cechach (np. relację "sąsiadować z"), może samodzielnie budować grafy wzorcowe wszystkich możliwych postaci linii. W tym celu pod obiektyw tego systemu muszą być podstawiane najczęściej spotykane obrazy wzorcowe badanych przedmiotów oraz niezależnie ich nazwy. Otrzymany w wyniku rozpoznania graf otrzymuje nazwę obrazu wzorcowego. System rozpoznający, budujący samodzielnie grafy wzorcowe, powinien posiadać algorytmy rozpoznawania cech elementarnych i relacji na tych cechach oraz algorytmy samodzielnego konstruowania grafów na podstawie rozpoznanych cech i relacji.

W niektórych przypadkach można znacznie uprościć proces rozpoznawania położeń przedmiotu. Na przykład w przypadku, jeśli pod obiektywem może znajdować się tylko jeden przedmiot, posiadający podłużny kształt, można obliczyć współrzędne x i y środka ciężkości jego obrazu na rastrze. W kolejnym kroku badane są następujące, szczegółowe parametry tego obiektu:



Rys. 5. Obiekt podłużny, jego środek ciężkości i oś główna.

a) grubość obiektu może być mierzona w otoczeniu obliczonego już środka ciężkości przez generowanie kilku otoczeń O(X,Y) o zwiększającej się średnicy 2q i pomiar liczby obiektów fazy pozostałej wewnątrz tego otoczenia;

b) pomiar kierunku nachylenia osi głównej tego obiektu może być przeprowadzony przez wygenerowanie otoczenia O(X,Y) o średnicy 2q większej od grubości obiektu. Element centralny tego otoczenia pokrywa się ze współrzędnymi środka ciężkości obiektu. Następnie obliczane są współrzędne środków ciężkości każdej z dwóch grup spójnych elementów rastra, znajdujących się na granicy otoczenia O(X,Y) i posiadających wartości cyfrowe 1. Współrzędne te wyznaczają oś główną obiektu (rys. 5).

LITERATURA

[1] Danielsson P.E., Kruse R. Distance Checking Algorithms, Linköping University, Szwecja, 1978.

[2] Fu K.S. Syntactic Methods in Pattern Recognition, Acad. Press, 1974.

[3] Integralnyje roboty, MIR, tom I (1974), tom II (1975) - wybór publikacji.

[4] Wójcik Z.M. Metoda rozpoznawania obrazów, Informatyka,2, 1979.

[5] Wójcik Z.M. Badania sztucznej inteligencji jako skuteczny środek poznania świata, Studia Filozoficzne, 4, 1979.

[6] Wójcik Z.M. Zagadnienia budowy sztucznej inteligencji, Wiadomości Telekomunikacyjne, WKŁ, 9, 1978.

[7] Wójcik Z.M. Automatic detection of semiconductor mask defects, Microelectronic and Reliability, vol. 15, 1976, Perg. Press.

[8] Wójcik Z.M. Automatyczna analiza obrazów metodą pomiaru współczynnika kształtu, Biuletyn MERA, 1, 1978, Warszawa.

[9] Wójcik Z.M. Układ zliczania obiektów, Biuletyn MERA-PIAP, 3, 1979, Warszawa.

[10] Wójcik Z.M. Cybernetyczny model znaczenia języka naturalnego, Postępy Cybernetyki, 4, 1979, Warszawa.

МЕТОД АНАЛИЗА ЛИНИИ В ПРОЦЕССЕ РАЗПОЗНАНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПОМОЩИ РОБОТОВ

Р е з ю м е

Образы объектов, имеющих удлиненную форму, после предварительной обработки анализируются при помощи оператора, который имеет форму круга. В зависимости от числа связанных образов, заключенных в этом круге разпознаются отрезки соединения и окончания линии. Разпознанные объекты

представляются при помощи графов. В статье представляется специальный процессор разпознания линейных структур.

A METHOD OF ANALYSIS OF LINES IN THE PROCESS OF THE OBJECTS' RECOGNITION BY ROBOTS

S u m m a r y

Images of prolonged objects are, after an initial processing, analysed by means of an operator which has a circular shape. Segments of lines, connections and ends of lines are recognized according to the number of compact areas which are included within the circle. The recognized lines are represented by means of graphs. A specialised processor for recognition of linear shapes is presented.