

Zbigniew Wójcik  
Politechnika Warszawska

**AUTOMATYCZNE ROZPOZNAWANIE POŁOŻEŃ PRZEDMIOTÓW PRZEZ  
ROBOTY-MANIPULATORY**

**Streszczenie.** Praca ta przedstawia kilka praktycznych metod automatycznego rozpoznawania położeń przedmiotów. Pominęta została metoda analizy scen, ponieważ wymaga ona stosowania dużych komputerów, obszernego oprogramowania oraz na obecnym stanie techniki nie może być prowadzona w czasie rzeczywistym.

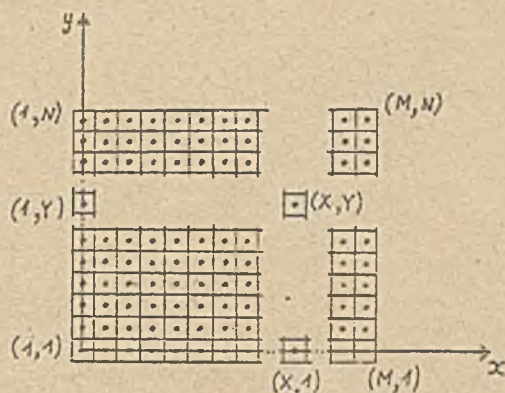
**1. Wstęp**

Nowoczesne, programowane roboty przemysłowe wymagają dodatkowego stosowania precyzyjnych, mechanicznych podajników lub zatrudniania dodatkowych robotników, podstawiających przedmioty w ściśle określone położenia. Nasuwa się wątpliwość: po co stosować roboty? Robotnicy mogą przecież podstawiać przedmioty od razu w ich końcowe pozycje, bez pomocy programowanych robotów. Roboty są więc przede wszystkim wykorzystywane w warunkach pracy szkodliwych dla zdrowia ludzi. Stosowanie robotów ma jednak duże znaczenie, gdy potrafią one samodzielnie rozpoznawać położenia przedmiotów. W pewnych gałęziach przemysłu automatyczne rozpoznawanie położeń przedmiotów jest bardzo pilną potrzebą. Na przykład, w produkcji półprzewodników konieczna jest automatyzacja procesu precyzyjnego, powtarzalnego ustawiania płytek i masek półprzewodnikowych oraz chipów (z dokładnością 1  $\mu$ m!). Wzrokowa ocena położeń jest subiektywna, wyniki centrowania nie są powtarzalne, w wyniku czego uzysk produkcyjny jest zmniejszony.

**2. Kryterium scentrowania obrazów graficznych [1]**

Kryterium to pozwala prowadzić automatyczną ocenę poprawności ustawienia (tj. scentrowania) dowolnych przedmiotów. W przypadku oceny scentrowania po-

jedynczego przedmiotu, położenie tego przedmiotu pod obiektywem cyfrowego przetwornika obrazów (w skrócie CPO) jest porównywane z położeniem, uznanym przez operatora jako wzorcowe. Położenie wzorcowe jest otrzymywane w wyniku rzutowania obrazu badanego przedmiotu na raster przetwornika optyczno-elektrycznego. Raster jest prostokątną tablicą, złożoną z  $R = M \times N$  punktów (rys. 1). Wartość  $v(X,Y)$  sygnału, odpowiadającego punktowi  $(X,Y)$ , jest



Rys. 1. Raster przetwornika optyczno-elektrycznego

proporcjonalna do wielkości oświetlenia niewielkiego wycinka rastru, rozłożonego wokół tego punktu  $(X,Y)$ . Skwantowany, dyskretny, dwuwartościowy obraz graficzny jest reprezentowany w komputerze przez zbiór

$$W = \{w(1,1), w(2,1), \dots, w(X,1), \dots, w(M,1), \dots, w(X,2), \dots, w(X,y), \dots, w(M,N)\}$$

przy czym:

$$\forall ((X,Y) \in R) (w(X,Y) = \begin{cases} 1, & \text{jeśli } v(X,Y) \geq Q, \\ 0, & \text{w przeciwnym przypadku,} \end{cases} \quad (1)$$

gdzie  $Q$  jest wartością progową, ustaloną automatycznie lub przez operatora.

\* czasie przeprowadzania kontroli prawidłowości scentrowania, obraz graficzny badanego przedmiotu, aktualnie podstawionego pod obiektyw systemu CPO, rzutowany jest na raster. W systemie CPO odpowiada mu zbiór  $W'$ . Na zbiorach  $W$  oraz  $W'$  określona jest następująca relacja  $S \subset W \times W'$ :

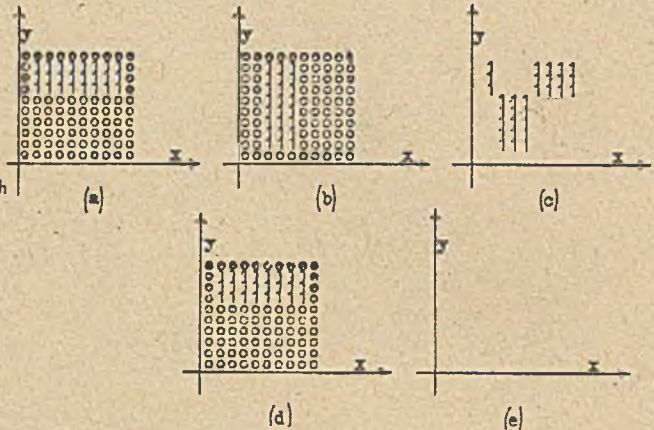
$$S = \{(X, Y) \in R: w(X, Y) \neq w'(X, Y)\} \quad (2)$$

DEFINICJA 1. Obraz  $W'$  jest scentrowany z obrazem  $W$ , jeżeli spełniony jest następujący związek (rys. 2):

$$S = \emptyset \quad (3)$$

gdzie  $\emptyset$  jest zbiorem pustym.

Rys. 2. Graficzna interpretacja kryterium scentrowania: a) obraz  $W$  przedmiotu ustawionego poprawnie; b) obraz  $W'$  tego samego przedmiotu, wczytany do pamięci komputera. Przedmiot ten zajmuje jedno z możliwych położeń; c) zbiór  $S$  nie jest pusty, wskazuje na złe ustawienie przedmiotu; d) obraz  $W'$  tego samego przedmiotu, podstawionego ponownie pod obiektyw; e) zbiór  $S$  jest pusty, wskazuje na poprawne ustawienie przedmiotu.



W praktyce warunek (3) może okazać się niemożliwy do spełnienia. Centrowanie obrazów polega wtedy na szukaniu minimum absolutnego następującego funkcjonału  $J$ :

$$J = \text{card } S, \quad (4)$$

gdzie  $\text{card } S$  jest liczbą elementów (tj. liczbą kardynałą) zbioru  $S$ .

Praktyczne wykorzystanie minimum funkcjonału (4) jest łatwe w przypadku, gdy badany przedmiot zajmuje jedno z kilku możliwych położeń (np. w przypadku mechanicznego docisku przedmiotu do nieruchomej ramy). Zbiór  $S$  (lub funkcjonał  $J$ ) wskazuje wtedy na niezające położenie przedmiotu.

### 3. Centrowanie przedmiotów metodą pomiaru środków ciężkości znaków centrujących na rastrze [1]

ZAŁOŻENIE 1. Obrazom graficznym przedmiotów  $P_1$  oraz  $P_2$  przyporządkowane są układy współrzędnych  $O_1^{xy}$  oraz  $O_2^{xy}$  w taki sposób, że po pokryciu się

tych układów, obrazów  $W_1$  oraz  $W_2$  przedmiotów  $P_1$  oraz  $P_2$  są ustawione prawidłowo.

ZAŁOŻENIE 2. Początki układów współrzędnych  $O_{xy}^1$  oraz  $O_{xy}^2$  są wyznaczone przez środki ciężkości obrazów prostych figur geometrycznych (np. kół), naniesionych na badane przedmioty. Figury te nazywane będą znakami centrującymi. Osie  $Ox$  tych układów przechodzą przez środki ciężkości innych obrazów znaków centrujących.

Z założeń tych wynika, że przedmioty  $P_1$  oraz  $P_2$  są scentrowane, jeżeli pokrywają się układy współrzędnych, wyznaczone przez środki ciężkości znaków centrujących. Scentrowanie przedmiotu  $P_1$  wymaga przesunięcia tego przedmiotu o następujący wektor  $D_1(x,y,a)$ :

$$D_1 = C_1 - B_1, \quad (5)$$

gdzie:  $B_1(x,y,e)$  i  $C_1(x,y,a)$  są wektorami odpowiednio położenia bieżącego i docelowego przedmiotu  $P_1$ ,

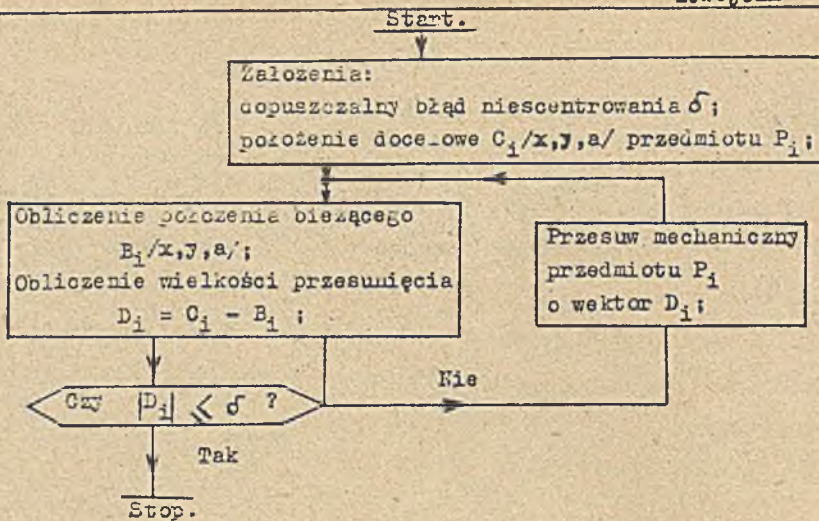
$x,y$  są współrzędnymi środków ciężkości znaków centrujących na rastrze, wyznaczających początki układów odniesienia przedmiotu  $P_1$ :

$$x = \frac{m_{10}}{m_{00}}; \quad y = \frac{m_{01}}{m_{00}}; \quad m_{pq} = \sum_{Y=1}^N \sum_{X=1}^M x^p y^q r(x,y);$$

$$r(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{gdy element } (X,Y) \text{ rastru należy do obrazu znaku centrującego,} \\ 0, & \text{w przeciwnym przypadku.} \end{cases} \quad (6 \text{ a,b,c,d})$$

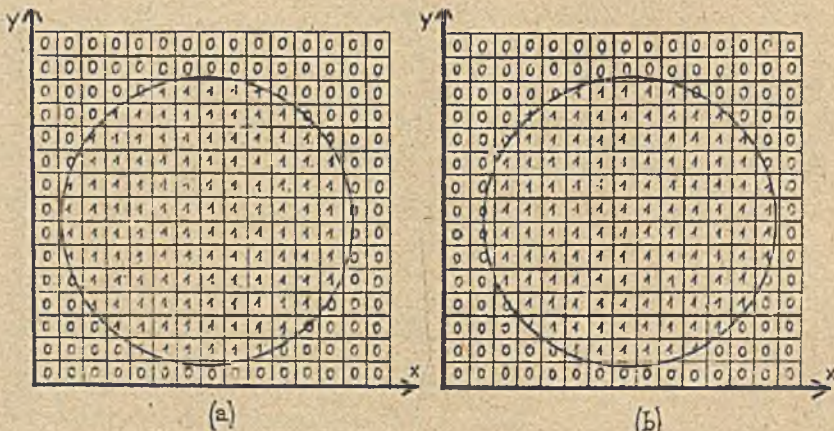
W iteracyjnym procesie centrowania (rys. 3) nieliniowość rastru nie ma wpływu na dokładność wykonywania procesu centrowania.

Pierwsze próby wielokrotnego obliczania środka ciężkości obrazu tego samego koła, mającego średnicę ok. 30 elementów rastru, nie zmieniającego względem rastru swojego położenia, wykazały rozbieżności wyników nie przekraczające 0,05 wielkości odstępu pomiędzy dwoma najbliższymi punktami rastru (pomiar przeprowadzone były przy pomocy kamery TV sprzężonej z komputerem [1]). Dokładność taka jest uzyskiwana dzięki statystycznemu uśrednieniu nierównomierności brzegów obrazów znaków centrujących na rastrze. Nierównomierność ta powstaje w wyniku dyskretnej natury rastru. Na rys. 4 każdy ele-



Rys. 3. Algorytm iteracyjnego procesu centrowania

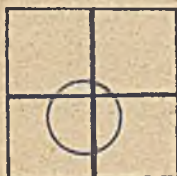
ment rastru przyjmuje wartość 1, jeżeli więcej niż połowa powierzchni tego elementu należy do wnętrza obrazu tego koła oraz w przeciwnym przypadku wartość 0. Po przesunięciu obrazu koła na rastrze o ok. 0,3 elementu, część elementów rastru, przez które przechodzi brzeg obrazu koła, zmienia swoją wartość z 1 na 0 albo z 0 na 1. Dzięki tym zmianom stał się możliwy pomiar współrzędnych środków ciężkości obrazów znaków centrujących na rastrze z dużą dokładnością, zwiększającą głębię ostrości układu optycznego i ułatwiającą konstrukcję robotów.



Rys. 4. a) obraz koła w reprezentacji rastru; b) ten sam obraz koła przesunięty na rastrze wzdłuż osi  $Ox$  o około 0,3 elementu rastru

#### 4. Metoda "ważenia" obrazu badanego przedmiotu [3]

Badany obraz rzutowany jest na płaszczyznę złożoną z kilkunastu fotodetektorów. Wartość sygnału na wyjściu każdego fotodetektora jest proporcjonalna do wielkości powierzchni oświetlonej części fotoczułej płaszczyzny tego fotodetektora, tj. do wielkości rzutowanego na niego obrazu badanego przedmiotu. W przypadku prawidłowego ustawienia przedmiotu, fotodetektory muszą leżeć na krawędziach (brzegach) obrazu. Wtedy sygnały, otrzymane na wyjściach tych fotodetektorów są sobie równe. Nieznaczne przesunięcie przedmiotu od tego prawidłowego ustawienia powoduje wzrost wartości sygnałów, pochodzących od fotodetektorów, leżących na krawędziach obrazu w kierunku ruchu tego przedmiotu oraz malenie sygnałów na wyjściach fotodetektorów, leżących na krawędziach obrazu od strony przeciwnej do kierunku ruchu tego przedmiotu. Przesuwanie przedmiotu do jego prawidłowego położenia polega na



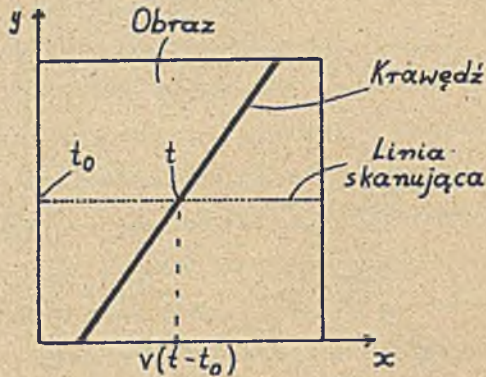
szukaniu minimum różnicy sygnałów, otrzymywanych na wejściach odpowiednich par fotodetektorów. Rys. 5 przedstawia matrycę czterech fotodetektorów (każdy w kształcie kwadratu) oraz obraz koła, rzutowanego na tę matrycę. Koło będzie ustawione prawidłowo, jeżeli jego środek ciężkości pokryje się ze środkiem matrycy. Po prawidłowym ustawieniu koła, sygnały otrzymane na wyjściach wszystkich czterech fotodetektorów będą

Rys. 5.  
sobie równe.

#### 5. Metoda wyznaczania położeń przez pomiar chwil przecięć wiązki skanującej z krawędziami obrazu przedmiotu [2]

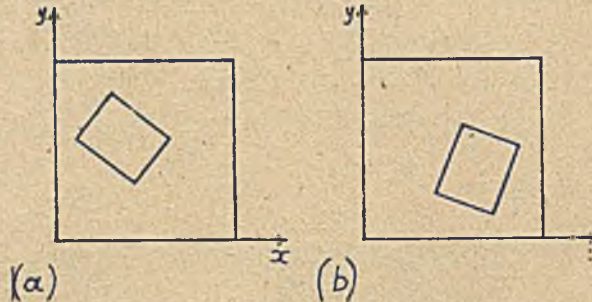
W metodzie tej wiązka skanująca (np. oświetlająca przedmiot) jest przesuwana wzdłuż linii prostych w płaszczyźnie obrazu. Obiekt badanego obrazu odróżnia się optycznie od tła (np. jest ciemniejszy od tła). Fotodetektor odbiera światło, pochodzące od całego badanego obrazu. Przekięcie krawędzi obrazu przez tę wiązkę skanującą jest sygnalizowane dużą wartością pochodnej sygnału, otrzymywanego na wyjściu fotodetektora. Maximum tej pochodnej wyznacza chwilę "t" przecięcia wiązki z krawędzią obrazu przedmiotu. Na przykład, położenie krawędzi, zaznaczonej na rys. 6 linią skośną, może być

reprezentowane na osi  $Ox$  pewnego układu odniesienia przez współrzędną  $x = v(t - t_0)$ , gdzie  $v$  jest stałą prędkością skanowania,  $t_0$  jest chwilą po-



Rys. 6. Krawędź obrazu przedmiotu w polu obserwacji robota, przecięta wiązką skanującą w chwili "t"

czątku skanowania. W przypadku obrazu prostokątnego (rys. 7) należy rozważyć kilka przypadków możliwych położzeń przedmiotu w płaszczyźnie obrazu. Trzeba zapewnić możliwość skanowania wzdłuż kilku (np. dwóch) linii pozio-



Rys. 7. Dwa przypadki położzeń przedmiotu w kształcie prostokąta w polu obserwacji robota

mych i pionowych. Musi być również określany kąt obrotu przedmiotu. W przypadku złożonych obrazów, odszukiwanie położzeń przedmiotów tą metodą jest bardzo trudne.

## 6. Metoda określania położeń przez poszukiwanie ekstremum światła pochodzącego od obrazów przedmiotów

W metodzie tej na drodze wiązki świetlnej, pomiędzy fotodetekтором a badanym przedmiotem umieszczany jest specjalny wzorec. Kształt tego wzorca odpowiada kształtowi badanego przedmiotu, z uwzględnieniem odpowiednich proporcji, zgodnych z powiększeniem zastosowanego układu optycznego. Wiązka światła przechodzi lub odbija się od badanego przedmiotu, przechodzi przez wzorec i pada na fotodetektor. Przedmiot jest prawidłowo ustawiony, jeżeli sygnał elektryczny, otrzymany na wyjściu fotodetektora, posiada ekstremum. W metodzie tej o kierunku przesuwu przedmiotu do jego prawidłowego ustawienia można wnioskować jedynie na podstawie zmian oświetlenia przy zmianach położeń przedmiotów, dla ich niektórych kształtów.

## 6. Wnioski

Przedstawione powyżej metody wymagają dobrego kontrastu badanych obrazów względem tła. Rzeźba, barwy i odcienie badanych przedmiotów muszą być mniej kontrastowe.

Metody te stają się łatwiejsze do praktycznego wykorzystania w przypadku możliwości nanoszenia na badane przedmioty specjalnych znaków centrujących.

Metoda poszukiwania ekstremum światła jest mało dokładna i niewygodna w praktyce.

Metoda ważenia obrazu wymaga specjalnego doboru położeń fotodetektorów dla każdego kształtu badanego przedmiotu i powiększenia optycznego oddzielnie. Wymaga również jednakowych czułości fotodetektorów.

Kryterium scentrowania jest metodą uniwersalną. Stosowanie tego kryterium wymaga jedynie zapamiętywania obrazu przedmiotu w jego położeniu wzorcowym (poprawnym). Praktyczne wyznaczanie zbiorów (2), (4) polega na obliczaniu sumy mod. 2 (realizowanej przy pomocy funkcji EXCLUSIVE OR). Metoda pomiarów środków ciężkości znaków centrujących znajduje zastosowanie w technologii elektronowej, w procesach automatycznego montażu oraz centrowania masek i płytek półprzewodnikowych [1].



## LITERATURA

- [1.] Wójcik Z.M.: "Wykorzystanie systemów cyfrowego przetwarzania obrazów w produkcji układów półprzewodnikowych", praca doktorska, Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa - 1976.
- [2.] Mathisen E.S., Moore R.L., Sheiner L.S.: "Optical alignment method and apparatus", USA patent, No 3796497, dn. 12.03.1974.
- [3.] Murphy H.E.: "Circuit for determination of the centroid of an illuminated area", USA patent, No 3532892, Oct. 6, 1970.
- [4.] Wójcik Z.M.: "Automatyczny analizator obrazów graficznych", Biuletyn Mera, No 1-5, 1971.

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРЕДМЕТОВ РОБОТАМИ - МАНИПУЛЯТОРАМИ

## Р е з ю м

В работе даётся обзор нескольких практических методов автоматического определения положения предметов. Не рассматривается метод анализа сцен так как требует он применения больших электронно-вычислительных машин, большой программной работы и при имеющейся технике не может быть использован в реальном времени.

## AUTOMATIC OBJECT POSITION RECOGNITION BY ROBOTS-MANIPULATORS

## S u m m a r y

Some practical methods for automatic object position recognition are presented. The methods of scene analysis are not presented because of their heavy demand on computing power, complicated software and their inability - at the present stage of development - of real-time implementation.