ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1996
Seria: AUTOMATYKA z.119 Nr kol. 1339

Jan BARCZYK, Piotr SOŁYGA
Politechnika Warszawska

ANALIZA UCHWYCENIA OBIEKTU NA PODSTAWIE OBRAZU Z KAMERY

Streszczenie. W referacie przedstawiono algorytm umożliwiający znalezienie najlepszego miejsca uchwycenia obiektu manipulacji o dowolnym kształcie, na podstawie informacji zawartej w obrazie wizyjnym pochodzącym z kamery wideo. Opracowano i testowano algorytm, który przetwarza obraz uzyskany z kamery wideo, analizuje go i w wyniku końcowym przekazuje jednoznaczną informację o miejscu i kącie uchwycenia obiektu. Najlepsze miejsce uchwycenia określane jest przy uwzględnieniu wybranych parametrów chwytaka oraz przyjętych kryteriów.

THE ANALYSIS OF AN OBJECTS GRIPPING PROCESS ON A PICTURE BASIS

Summary. The subject of this paper is a gripping process of manipulation objects on a video picture basis. The first part of the paper presents theoretical problems and describes issues connected with a gripping process and structure it devices. Second part describes the computer algorithm of picture processing and finding the best point of gripping an object. There are presented step by step stages of processing and analysing a picture getting from a video camera.

1. Wprowadzenie

Robotyka jest dziedziną nauki, która intensywnie wkracza w codzienne życie człowieka. Coraz więcej robotów znajduje zastosowanie w przemyśle do prac spawalniczych, malarskich, montażowych, obsługi pras i do obróbek wykańczających, jak szlifowanie i polerowanie. Pozwala to podwyższyć jakość wykonywanych prac oraz uwolnić człowieka od ciężkiej, monotonnej, a w szczególności niebezpiecznej dla zdrowia pracy. Dzięki uzbrojeniu robota w sensory osiąga się znaczne dostosowanie do warunków otoczenia i robot coraz skuteczniej może zastępować człowieka. Prognozy na najbliższe lata przewidują, iż w związku z rozwojem techniki mikroprocesorowej nastąpi gwałtowny rozwój nowych generacji "inteligentnych" robotów mających znacznie większe możliwości pracy w zmiennym otoczeniu.

W referacie przedstawiono procedury komputerowe, umożliwiające sprzęgnięcie robota z kamerą wideo, co pozwoli chwytać obiekty manipulacji o dowolnym kształcie i dowolnym usytuowaniu w przestrzeni; opracowano algorytm, który pozwoli szybko i skutecznie wygeneruje informację o punktach najlepszego uchwycenia obiektu.

2. Zadania urządzenia chwytającego

Podstawowym zadaniem urządzenia chwytającego jest uchwycenie obiektu manipulacji, trzymanie go w trakcie czynności manipulacyjnych i uwolnienie w miejscu docelowym. Każde z tych zadań wymaga pobrania i przekazania odpowiednich informacji o obiekcie [1]. Prezentowana praca skupia się na zadaniu uchwycenia, a w szczególności na przetworzeniu informacji o obiekcie z postaci obrazu wizyjnego na parametry zrozumiałe dla układu sterującego, jak współrzędne punktów uchwycenia i kąt chwytu.

W ogólnym przypadku uchwycenie obiektu może być związane z koniecznością określenia jego pozycji i orientacji, identyfikacji jego kształtu, rozpoznania płaszczyzny styku końcówek chwytnych z powierzchnią obiektu, wykonania ruchów korekcyjnych chwytaka, mających na celu właściwe ustawienie chwytaka względem obiektu manipulacji itd. Dopiero potem następuje przemieszczenie mechanizmu wykonawczego chwytaka, powodujące uchwycenie obiektu.

Prawidłowe uchwycenie obiektu zależne jest od: sposobu unieruchomienia obiektu w chwytaku, parametrów obiektu manipulacji, wzajemnego początkowego ustawienia chwytaka i obiektu, warunków dynamicznych procesu manipulacji [2]. Unieruchomienie obiektu może odbywać się na drodze chwytania siłowego lub kształtowego; musi być na tyle skuteczne, aby pozbawić obiekt manipulacji możliwości przemieszczenia względem urządzenia chwytającego. Na prawidłowe uchwycenie wpływ mają takie parametry obiektu, jak: kształt, jego wymiary, masa, położenie środka ciężkości, rodzaj materiału, odporność na naprężenia, stan powierzchni i inne; parametry obiektu wpływają na kształt i sposób przemieszczania końcówek chwytnych oraz dobór czujników. Niedokładność wzajemnego początkowego ustawienia chwytaka i obiektu powstała np. wskutek niedokładności urządzeń podająco-orientujących, może doprowadzić do wystąpienia niepożądanych obciążeń, a nawet uszkodzeń obiektu, manipulatora lub urządzeń współpracujących. Prawidłowe uchwycenie powinno zapewniać unieruchomienie w najbardziej niekorzystnym przypadku obciążeń dynamicznych pojawiających się w trakcie procesu manipulacji.

W przypadku ściśle zdefiniowanego procesu manipulacji, gdy posiadamy wiedzę o obiekcie manipulacji i o jego położeniu, wystarczy raz przeanalizować proces i dobrać odpowiedni chwytak zapewniający poprawne uchwycenie. Sytuacja znacznie się komplikuje przy założeniu zmienności otoczenia, tzn. jeżeli nie mamy jednoznacznej informacji o położeniu i orientacji obiektu, jego kształcie i wymiarach. W takiej sytuacji nie wystarczy zastosowanie prostych urządzeń chwytających; należy użyć bardziej uniwersalnego chwytaka, np. wielopalcowej końcówki chwytnej, wzorowanej na ludzkiej dłoni, charakteryzującej się dużą elastycznością i zdolnością dopasowania do kształtu obiektu [3].

Zwiększenie możliwości chwytania można uzyskać wyposażając chwytak w czujniki do określenia stanu otoczenia robota. W nowoczesnych konstrukcjach robotów istotne znaczenie mają następujące rodzaje czujników: zbliżenia, dotyku, poślizgu, siły chwytu oraz sensory

wizyjne. Sensorami wizyjnymi nazywa się czujniki wraz z układem obróbki informacji, służące do zbierania metodami optycznymi informacji o scenie w otoczeniu robota. Tylko sensory wizyjne są w stanie dostarczyć odpowiednią ilość informacji o obiekcie manipulacji, aby można było zrealizować zadanie uchwycenia obiektu o dowolnym kształcie i położeniu w przestrzeni.

3. Zadania systemu wizyjnego

Współcześnie coraz częściej wymaga się, aby robot pracował w środowisku niezdeterminowanym i był zdolny reagować na sytuacje nieprzewidziane w czasie programowania. Aby zadanie to mogło zostać spełnione, należy zaopatrzyć robota w system wizyjny. Według [4], zadaniem systemu wizyjnego w systemach zrobotyzowanych jest: lokalizacja i ustalenie orientacji obiektu, rozpoznanie obiektu oraz nawigacja robotem.

Określenie położenia i orientacji obiektu pozwala robotowi na jego prawidłowe uchwycenie albo na określenie trajektorii ruchu względem obiektu. Bez lokalizacji za pomocą systemu wizyjnego robot skazany jest na współpracę z układami pomocniczymi, jak podajniki czy sortowniki, które gwarantują jednoznaczne usytuowanie obiektu.

Rozpoznanie obiektu jest zwykle wstępną funkcją systemu wizyjnego robota przed wykonaniem dalszych czynności, jak kontrola stanu jakości, montaż czy sortowanie. Realizacja tego zadania, oparta na analizie obrazu otoczenia uzyskanego z systemu wizyjnego, pozwala na poruszanie się robota mobilnego tak, aby nie następowały kolizje z otaczającymi przedmiotami.

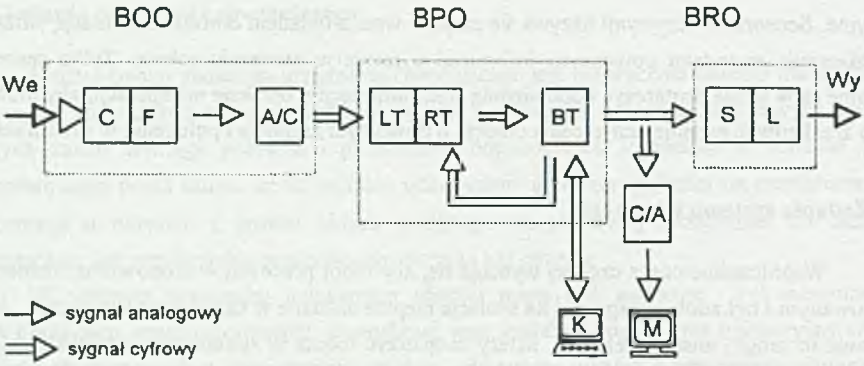
4. Budowa systemu wizyjnego

Opracowano wiele systemów wizyjnych przeznaczonych dla robotyki [4], wśród nich są także rozwiązania rodzime, jak system CESARO-2 [5].

Na rys. 1. przedstawiono uproszczony schemat typowego układu wizyjnego.

Zadaniem bloku odczytu obrazu jest zebranie informacji o scenie w polu widzenia czujnika i przesłanie do dalszej obróbki w postaci sygnału cyfrowego. Najważniejszym elementem tego bloku jest czujnik wizyjny - najczęściej stosuje się: półprzewodnikowe przetworniki obrazu CCD lub CJD, skanery laserowe oraz włókna optyczne. W bloku tym dokonywana jest filtracja, umożliwiająca polepszenie jakości obrazu. Przyczyną występowania zniekształceń obrazu jest na przykład niewłaściwe oświetlenie, wadliwie ustawiona ostrość lub szum dodający się do sygnału wizyjnego. Stosuje się jedną z dwóch technik poprawy obrazu: przetwarzanie w punkcie albo przetwarzanie w otoczeniu punktu.

Głównym celem binaryzacji jest redukcja ilości informacji zawartych w obrazie. Najogólniej biorąc zadanie binaryzacji sprowadza się do przekształcenia obrazu o wielu poziomach jasności w obraz, którego piksele przyjmują tylko dwie wartości 0 i 1, co zwykle odpowiada pojęciom "tła " i "obiektu".



Rys.1. Schemat budowy układu wizyjnego:
BOO - blok odczytu obrazu: C - czujnik wizyjny, F - filtr, A/C - przetwornik analogowo-cyfrowy,
BPO - blok poprawy obrazu: LT - przetwarzanie obrazu, RT - przetwarzanie w otoczeniu punktu, BT - pamięć,
BRO - blok rozpoznania obrazu: S - segmentacja obrazu, L - lokalizacja obiektu,
K - system nadrzędny (komputer), M - monitor, C/A - przetwornik cyfrowo-analogowy.

Fig. 1. Schematic diagram of a vision system

Zadaniem bloku analizy obrazu jest rozpoznanie obiektów widocznych na obrazie i lokalizacja tego spośród nich, który ma być obiektem manipulacji. W skład procesu analizy wchodzą kolejno: segmentacja, wyznaczenie cech obiektów przydatnych do rozpoznania oraz określenie lokalizacji obiektu. Segmentacja polega na rozbiciu przefiltrowanego obrazu na fragmenty odpowiadające poszczególnym widocznym na obrazie obiektom. Segmentacja umożliwia wydzielenie obszarów spełniających pewne kryteria jednorodności, jak kolor, poziom jasności, faktura. Obszary te mają swoje odpowiedniki w scenie rzeczywistej. Podstawowym zadaniem analizy kształtów jest wyznaczenie takich cech obiektów, które dobrze charakteryzują kształty, a równocześnie są odporne na deformacje. Cechy powinny być niezmienne względem typowych przekształceń obrazów, jakimi są obroty, przesunięcia, zmiany skali i zmiany kąta patrzenia na obiekt. Ostatecznym celem analizy obrazu jest lokalizacja zadanego obiektu na rozważanej scenie. Przez lokalizację rozumie się podanie współrzędnych wybranego punktu obiektu w pewnym układzie odniesienia, oraz wyznaczenie orientacji obiektu.

5. Analiza uchwycenia

Algorytm analizy obrazu z kamery wideo, od chwili odczytu obrazu do wygenerowania informacji o parametrach obiektu, opracowano przy następujących założeniach [6]:

1) Przy analizie uchwycenia przyjęto najprostszy i najczęściej wykorzystywany model chwytaka o dwóch równoległych końcówkach. Jeżeli zajdzie potrzeba użycia innego typu chwytaka, można dokonać prostych zmian kilku procedur modułu *ANALIZA.PAS*.

2) Ze względu na szeroki zakres pracy i dość skomplikowane obliczenia analiza obrazu została przedstawiona w płaszczyźnie dwuwymiarowej, co umożliwia chwytanie przedmiotów w kształcie walca czy graniastosłupa. Jeżeli zajdzie potrzeba chwytania przedmiotów o innych kształtach, należy użyć dwóch lub trzech odpowiednio rozmieszczonych kamer wideo i przeprowadzić nieco bardziej rozbudowaną analizę kilku obrazów.
3) Przyjęto, że obraz pobierany jest z monochromatycznej kamery wideo w postaci cyfrowej o 256 progach jasności; taka rozdzielczość jest dostatecznie duża dla zadania lokalizacji i uchwycenia obiektu.
4) Algorytm umożliwia lokalizację i analizę kilku obiektów manipulacji widocznych na jednym obrazie wizyjnym. Jednak obrazy obiektów nie mogą się nakładać ani stykać. Pomocniczy program do testowania algorytmu *OBIEKT.PAS* dokonuje analizy obrazów, na których znajduje się jeden obiekt manipulacji.
5) Wszystkie obliczenia dokonywane są w prostokątnym układzie współrzędnych, związanym z kamerą, a jednostką obliczeniową jest piksel.
6) Algorytm kończy się podaniem współrzędnych dwóch najlepszych punktów uchwycenia i kąta uchwycenia obiektu lub wygenerowaniem komunikatu, jeżeli na obrazie brak jest obiektu, albo znajduje się kilka obiektów manipulacji.

Pierwszą czynnością poprzedzającą analizę obrazu powinna być rezerwacja obszaru pamięci na obraz. Ponieważ w trakcie wstępnej obróbki niezbędne będzie kilkakrotne przeglądanie jasności punków obrazu, konieczne jest jego buforowanie. Służy do tego procedura *InitTab*, która rezerwuje w pamięci obszar na tablicę danych *Dane* o rozmiarze *Xsize* x *Ysize*. Po dokonaniu obróbki obrazu pamięć zajmowaną przez tablicę danych należy zwolnić, wykorzystując procedurę *FreeTab*. Wypełnienie tablicy danych *Dane* następuje za pomocą procedury *ReadTab*. Jest to procedura, która odczytuje dane liczbowe ze zbioru dyskowego, symulując odczyt z kamery wideo.

Ostatnim i najtrudniejszym elementem analizy jest znalezienie najlepszej pary punktów uchwycenia (*X1chwyt,Y1chwyt*), (*X2chwyt,Y2chwyt*) i kąta uchwycenia *KatChwytu* obiektu, którego wierzchołki zapisane są w liście *PoczList*. Odpowiada za to procedura *Uchwycenie*.

Procedura *Uchwycenie* zasadniczo składa się z dwóch procedur: *UchwycenieBokWierzchołek* i *UchwycenieBokBok*. Procedury te dokonują analizy i znajdują najlepszy punkt uchwycenia (para punktów i kąt) w zależności od tego, czy uchwycenie następuje za bok i wierzchołek obiektu, czy za dwa boki. Uchwycenie za dwa wierzchołki jest niestabilne i nie jest brane pod uwagę przy analizie uchwycenia.

Każda z procedur dokonuje analizy dla każdej pary bok-wierzchołek lub bok-bok wieloboku, znajdując (o ile to możliwe) punkt najlepszego uchwycenia i wagę *Waga* określającą jakość chwytu; niemożliwemu uchwyceniu odpowiada maksymalna waga. Ostatecznie punkt uchwycenia jest wybierany jako najlepszy ze wszystkich punktów dla każdej

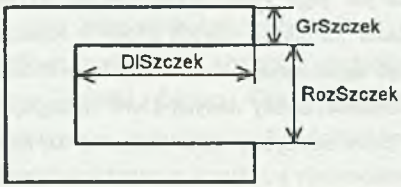
pary, tak aby waga chwytu *Waga* była najmniejsza. Wartość zmiennej *Waga* zależy od następujących czynników:

- odległości punktów uchwycenia od środka ciężkości (najlepiej, gdy momenty działające na chwytak są najmniejsze),
- kąta nachylenia boków, za które chwytany jest obiekt, jeżeli chwyt następuje za dwa boki (najlepiej, gdy boki są równoległe).

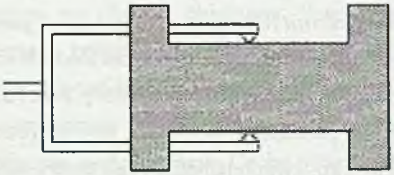
Analiza uchwycenia przebiega następującymi etapami:

1) Za pomocą procedury *MakePomList* tworzona jest pomocnicza lista wierzchołków o początku *PoczPom* i długości listy *PoczList*. Pomocnicza lista jest wykorzystywana do transformowania punktów listy *PoczList*.

2) Przy użyciu procedury *MakeChwytList* tworzona jest lista punktów chwytaka *PoczChwyt*. Lista ta opisuje chwytak, aby można było sprawdzać, czy przy próbie uchwycenia nie występuje kolizja pomiędzy chwytakiem a obiektem. Dzięki opisaniu chwytaka za pomocą listy możliwe jest dokonywanie analizy dla dowolnego modelu chwytaka.Domyślnie został przyjęty model chwytaka o szczękach równoległych. Wymiary gabarytowe chwytaka określone są przez trzy parametry: *RozSzczek* - maksymalne rozwarcie szczęk chwytaka, (minimalne rozwarcie wynosi 0) *DlSzczek* - długość końcówki chwytnej i *GrSzczek* - grubość szczęki chwytaka; dzięki temu można szybko zmieniać wymiary chwytaka bez ingerencji w kod programu (rys. 2).



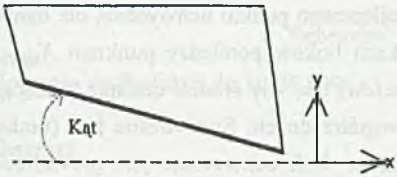
Rys.2. Przyjęty model chwytaka
Fig.2. Schematic view of a gripper



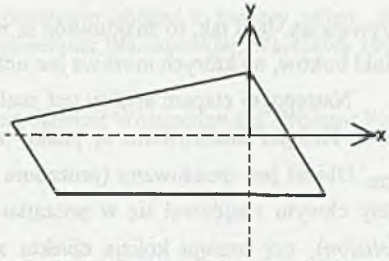
Rys.3. Przykład kolizji chwytaka i obiektu
Fig.3. Example of a collision

Z chwytakiem związana jest także procedura *ChangeChwytList*, która służy do zmiany wartości punktów listy *ChwytList*. Umożliwia to symulowanie zaciskania szczęk chwytaka, co jest niezbędne do sprawdzania, czy po zaciśnięciu końcówek chwytaka nie występuje kolizja pomiędzy chwytakiem (listą *ChwytList*) a obiektem (listą *PoczList*) (rys. 3).

3) Wykonywana jest procedura *UchwycenieBokWierzcholek*, która znajduje najlepszy punkt uchwycenia za jeden bok i wierzchołek obiektu. Kolejno analizowane są wszystkie boki obiektu, a dla nich wszystkie punkty obiektu (z wyjątkiem punktów, które są końcami analizowanego boku). Przy użyciu funkcji *AngleSide* znajdowany jest kąt *Kat*, pod jakim analizowany bok jest nachylony do osi X (rys. 4).

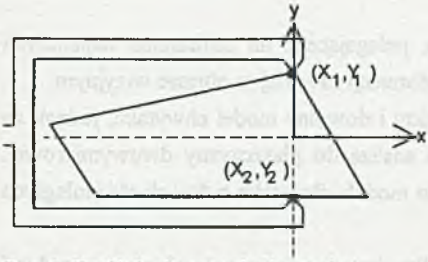


Rys.4. Kąt nachylenia analizowanego boku
Fig.4. Bent angle of the object

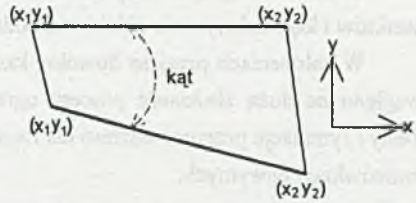


Rys.5. Obrócenie i przesunięcie obiektu
Fig.5. Rotation and movement of the object

Następnie obiekt jest obracany (procedura *RotateList*) i przesuwany (procedura *TranslateList*) tak, aby analizowany bok był równoległy do osi X, i początek układu współrzędnych znajdował się w połowie odległości pomiędzy analizowanym bokiem i analizowanym punktem chwytu (rys. 5). Wówczas symulowany jest zacisk końcówek chwytaka (procedura *ChangeChwytList*) (rys. 6) i następuje sprawdzenie, czy nie występuje kolizja przy chwycie (funkcja *IsColision*) - jeżeli uchwycenie jest prawidłowe, obliczana jest waga chwytu *Waga*. Uchwycenie symulowane jest także z drugiej strony obiektu (procedura *MirrorList*) - wybierane jest lepsze.



Rys.6. Zaciśnięcie szczęk chwytaka
Fig.6. Part being grasped



Rys.7. Kąt pomiędzy analizowanymi bokami
Fig.7. Angle between object sides

Ostatnią czynnością jest dokonanie przekształcenia odwrotnego (translacja i obrót) znalezionych punktów chwytu (X_1,Y_1) i (X_2,Y_2). Kątem uchwycenia będzie kąt *Kat* lub kąt *Kat*+π.

4) Wykonywana jest procedura *UchwycenieBokBok*, która znajduje najlepszy punkt uchwycenia za dwa boki obiektu. Kolejno analizowane są wszystkie pary boków obiektu; za pomocą funkcji *AngleBetweenSides* znajdowany jest kąt *Kat* pomiędzy analizowanymi bokami (rys.7). Jeżeli kąt jest większy od maksymalnego dopuszczalnego kąta uchwycenia dwóch boków (stała *MaxKatChwytu*), to znaczy, że za tę parę boków nie można uchwycić obiektu. Znajdowana jest wartość *Kat* dwusiecznej kąta pomiędzy analizowanymi bokami - dokonuje tego funkcja *AngleBisectorSides*. Następnie obiekt jest obracany (procedura *RotateList*) tak, aby dwusieczna kąta pomiędzy analizowanymi bokami była równoległa do osi X.

Dalej sprawdzane jest wzajemne położenie analizowanych boków. Procedura *Overlap* sprawdza, czy jest możliwe uchwycenie za dane boki, tzn. czy rzuty obu boków na oś X

pokrywają się. Jeśli tak, to znajdowane są wartości X_{min}, Y_{min}, X_{max}, Y_{max}. Wyznaczają one odcinki boków, na których możliwe jest uchwycenie obiektu.

Następnym etapem analizy jest znalezienie najlepszego punktu uchwycenia dla danych boków. Kolejno analizowane są punkty na odcinkach boków pomiędzy punktem X_{min} a X_{max}. Obiekt jest przesuwany (procedura *TranslateList*) tak, aby środek odcinka łączącego punkty chwytu znajdował się w początku układu współrzędnych. Sprawdzane jest (funkcja *IsColision*), czy nastąpi kolizja obiektu z chwytakiem. Jeśli uchwycenie jest prawidłowe, oblicza się jego *Waga*.

Po przeanalizowaniu wszystkich par boków uzyskiwane są współrzędne punktów najlepszego chwytu (X_1,Y_1) i (X_2,Y_2) oraz kąt uchwycenia obiektu *Kat*. Należy dokonać transformacji odwrotnej na punktach uchwycenia przesunąć o odpowiedni wektor i obrócić o kąt -*Kat*.

5) Na koniec wybierany jest najlepszy punkt uchwycenia (*X1chwyt,Y1chwyt*) i (*X2chwyt,Y2chwyt*) oraz kąt uchwycenia *KatChwyt*, zaś lista pomocnicza *PoczPom* i lista wierzchołków chwytaka *PoczChwyt* są usuwane przy użyciu procedur *DelPomList* i *DelChwytList*.

6. Wnioski

Dokonano algorytmizacji procesu chwytania, polegającego na znalezieniu najlepszych punktów i kąta uchwycenia obiektu na podstawie informacji zawartej w obrazie wizyjnym.

W założeniach przyjęto dowolny kształt obiektu i dowolny model chwytaka, jednak ze względu na dużą złożoność procesu ograniczono analizę do płaszczyzny dwuwymiarowej. Testy i symulacje przeprowadzono dla najprostszego modelu chwytaka o dwóch równoległych końcówkach chwytnych.

Praktycznym rezultatem przedstawionej analizy jest przygotowanie zbioru procedur i funkcji komputerowych oraz programów pomocniczych pozwalających na dokonanie testów i symulacji na komputerze osobistym klasy IBM PC.

LITERATURA

1. Barczyk J.: Mechanizmy chwytające robotów. WNT, Robotyka, nr 1, Warszawa 1986, ss. 34-48.
2. Barczyk J.: Laboratorium podstaw robotyki. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1994.
3. Barczyk J.: Modelowanie procesu chwytania obiektów manipulacji chwytakiem z wieloczłonowymi końcówkami. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Automatyka, z. 115, 1994, ss. 275-284.
4. Tadeusiewicz R.: Systemy wizyjne robotów przemysłowych. WNT, Warszawa 1992.
5. Pachowicz P.W.: Tadeusiewicz R.: Porównanie systemu CESARO z wybranymi systemami analizy i rozpoznawania obrazów. Elektrotechnika, tom 3, nr 2, 1984, ss.173-182.

6. Sołyga P.: Analiza uchwycenia obiektu na podstawie obrazu z kamery video. Praca dyplomowa. Instytut Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1995.

Recenzent: Dr hab.inż. Konrad Wojciechowski, Profesor Pol.Śl.

Wpłynęło do Redakcji do 30.06.1996 r.

Abstract

The subject of this paper are issues connected with a gripping process of manipulation objects on a video picture basis. The first part of the paper presents theoretical problems, describes issues connected with a gripping process and structure of gripping devices, issues on image processing and vision applications for industrial robots. Second part describes the computer algorithm of picture processing and finding the best point of gripping an object. There is presented step by step stages of processing and analysing a picture getting from a video camera, starting with obtaining a picture to generating an information about gripping an object. The next chapter presents results of the algorithm working with reference to different manipulation objects and different parameters of gripping quality. The library of optimum procedures and functions in Turbo Pascal 6.0 was prepared on the algorithm basis. In the future it may be used in building a laboratory stand.