ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1994
Seria: AUTOMATYKA z.115 Nr kol. 1251

Jan BARCZYK
Politechnika Warszawska

MODELOWANIE PROCESU CHWYTANIA OBIEKTÓW MANIPULACJI CHWYTAKIEM Z WIELOCZŁONOWYMI KOŃCÓWKAMI

Streszczenie: Tematem prezentowanej pracy są zagadnienia związane z procesem chwytania obiektów manipulacji oraz algorytmizacją tego procesu. Przedstawiono wybrane problemy teoretyczne dotyczące procesu chwytania, a także zagadnienia budowy i zastosowań chwytaków robotów przemysłowych. Podano przyjęte założenia, określono parametry wejściowe oraz założony cel procesu chwytania. Przedstawiono analizę procesu chwytania obiektów manipulacji o przekroju kołowym.

MODELLING OF MANIPULATION OBJECT GRASPING PROCESS WITH MULTIFINGER GRIPPER

Summary: Some questions related to a grasping process of manipulated objects and an algorithm of the process are prescuted. A view on selected theoretical issues concerning the grasping process, as well as questions of the structural design and applications of the gripping mechanisms of industrial robots are disseussed. Assumptions, input parameters and a proposed objective of the grasping process are included. An analysis of the grasping of manipulated objects with circular cross-sections that are handled by a three-digit gripping mechanism is also described.

MODELLIERUNG DES PROZESSES DER ERGREIFUNG VON HANDHABUNGS-OBJEKTEN DURCH EINEN GREIFER MIT MEHRTEILIGEN ENDSTÜCKEN

Zusammenfassung: Das Thema der vorliegenden Arbeit bestimmen die Probleme der Ergreifung von Handhabungsobjekten sowie der Algorithmierung dieses Prozesses. Ausgewählte theoretische Probleme des Greifprozesses und Probleme des Aufbaus und der Anwendung von Greifern in Industrierobotern werden vorgestellt. Die Voraussetzungen des Greifprozesses werden gezeigt. Die Eigangsparameter werden bestimt und das Ziel des Greifprozesses wird beschreiben. Eine Analyse des Greifprozesses von Handhabungsobjekten mit rundem Querschnitt wird präsentiert.

1. Proces chwytania

Posługiwanie się dłonią, szczególnie czynność chwytania, należy do tego typu działań człowieka, które wymagają największego zaangażowania myśli. Jednakże przebieg procesu myślowego, generowanie sygnałów sterujących mięśniami, przemieszczenie poszczególnych palców dłoni oraz wprowadzanie informacji wzrokowej i dotykowej w torze sprzężenia zwrotnego należą do grupy zagadnień nie w pełni jeszcze zbadanych. Robot przemysłowy wyposażony w urządzenie chwytające, zastępując człowieka przy wykonywaniu niektórych funkcji manipulacyjnych, w niewielkim stopniu imituje działanie dłoni, a praktycznie nie uwzględnia procesu myślowego.

Procesem chwytania nazywa się [1] taki proces, w wyniku którego element aktywny (chwytak) i element bierny (obiekt manipulacji) zostają trwale połączone, a następnie rozdzielone. Chwytanie jest złożonym procesem, łączącym w sobie zagadnienia geometrii, kinematyki oraz dynamiki. Kompleksowy opis tego procesu wymaga stworzenia kilku jego modeli, m.in.:

- geometrycznego, definiującego powierzchnie, linie i punkty elementów, które mają być połączone,
- kinematycznego, opisującego ruchy w różnych układach odniesienia (bezwzględnym oraz we względnym),
- dynamicznego, przedstawiającego siły i momenty działające w układzie związanym z procesem oraz w jego otoczeniu,
- operacyjnego, zawierającego kolejność procedur w procesie chwytania.

Obiekty manipulacji określane są następującymi parametrami [2]:

- wymiary gabarytowe i kształt powierzchni, zakresy błędów wymiarów i kształtu,
- położenie i orientacja charakterystycznych osi, linii i powierzchni,
- masa i inne wielkości związane z pojęciem bezwładności,
- dopuszczalne wartości sił w punktach styku obiektu z chwytakiem,
- zakresy błędów ustawienia obiektu względem chwytaka.

Chwytanie realizowane przez robota nie zostanie prawidłowo wykonane, jeżeli obiekt znajduje się w zbyt dużej odległości od końcówek chwytnych; w tej sytuacji nie dochodzi do uchwycenia obiektu albo zostaje on uchwycony nieprawidłowo, co może mieć wpływ na dalszy przebieg cyklu technologicznego (np. wysunięcie lub wypadnięcie obiektu w trakcie przemieszczania albo nieprawidłowe ustawienie obiektu w miejscu docelowym). Z tego względu korzystne jest przeprowadzenie analizy geometrycznej i siłowej umożliwiającej:

- wybranie najlepszego wariantu konfiguracji chwytaka i obiektu, np. orientacji końcówek chwytnych względem obiektu, położenia obiektu,

- określenie wymaganych wartości sił i momentów sił oraz ograniczeń co do wartości przyspieszeń,
- sformułowanie warunków zapewniających ochronę trwałości i jakości powierzchni obiektu oraz końcówek chwytnych.

Proces chwytania składa się z kilku etapów, różniących się liczbą oraz rozmieszczeniem punktów styku obiektu z końcówkami chwytnymi. W pierwszym etapie pojawia się jeden punkt styku, a następnie wskutek oddziaływania końcówek chwytnych i względnego przemieszczenia obiektu pojawiają się kolejne punkty, linie lub powierzchnie styku. W najkorzystniejszym przypadku proces chwytania kończy się z chwilą, gdy obiekt osiąga trwałe położenie optymalne, charakteryzujące się istnieniem wszystkich założonych punktów styku. Efektywność i precyzja procesu chwytania mogą być znacznie poprawione poprzez zastosowanie w chwytaku urządzeń sensorycznych.

2. Chwytaki robotów przemysłowych

Roboty przemysłowe wyposażane są w różnego rodzaju urządzenia chwytające [3, 4], wśród których najczęściej stosowane są chwytaki. Chwytakiem nazywa się urządzenie chwytające, stanowiące mechanizm utrzymujący obiekt w końcówkach chwytnych. Urządzenia chwytające są obecnie najbardziej zróżnicowanym konstrukcyjnie zespołem robotów przemysłowych, gdyż ogromna różnorodność obiektów manipulacji (ich: masy, kształtu, wymiarów, struktury powierzchni itp.), wielorakość zadań, zmienność parametrów procesu manipulacji i inne warunki wymuszały tworzenie wciąż nowych konstrukcji chwytaków. Dla każdego konkretnego zadania należy zastosować chwytak o właściwych parametrach technicznych. Najważniejszymi parametrami technicznymi chwytaków są:
- dopuszczalna masa obiektu,
- siła chwytu,
- maksymalne wartości sił i momentów sił (w układzie współrzędnych chwytaka),
- czas uchwycenia i czas uwolnienia obiektu,
- masa chwytaka,
- wymiary gabarytowe chwytaka,
- wskaźniki niezawodności działania chwytaka.

Wybór rozwiązania technicznego, określającego konstrukcję urządzenia chwytającego, dokonywany jest z uwzględnieniem podstawowych wymagań:
1) osiągnięcia wysokiego stopnia elastyczności i minimalizacji czasu cyklu produkcyjnego (rozbudowa chwytaków, stosowanie kilku chwytaków, wymiana chwytaków),

2) wprowadzenia elementów sztucznego intelektu do systemów sterowania chwytakami (stosowanie czujników i urządzeń sensorycznych),
3) zwiększenia możliwości manipulacyjnych urządzeń chwytających (konstruowanie chwytaków o wysokim stopniu manewrowości).

Rozwój konstrukcji urządzeń chwytających dla robotów przebiegał dotychczas raczej w kierunku ich specjalizacji (przystosowania do konkretnego zadania) niż w kierunku ich uniwersalności. Chwytak uniwersalny powinien umożliwić chwytanie obiektów o różnych kształtach i wymiarach, a jego siła chwytu powinna być dobierana automatycznie w zależności od masy obiektu, struktury jego powierzchni oraz od przewidywanych parametrów ruchu. Prace badawcze nad budową chwytaków uniwersalnych prowadzone są w trzech kierunkach:
- tworzenia konstrukcji na wzór dłoni, proponowane rozwiązania zawierają końcówki chwytne składające się z kilku członów,
- opracowania konstrukcji wieloczłonowych końcówek, które opasują obiekt manipulacji podczas chwytania,
- proponowania nietypowych konstrukcji przestrzennych.

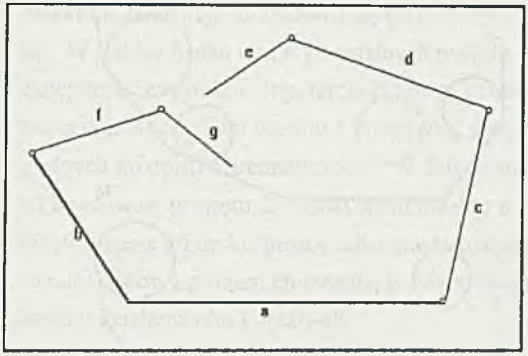
Naturalnym wzorem do naśladowania jest ludzka dłoń, charakteryzująca się dużą elastycznością oraz zdolnością dopasowania się do kształtu obiektów, mogąca realizować wiele typów chwytania oraz zmieniać siłę chwytu. W wyniku badań dotyczących funkcjonowania dłoni stwierdzono [3], że przy chwytaniu znaczenie poszczególnych palców nie jest jednakowe - kciuk, palec wskazujący i palec środkowy są wykorzystywane mniej więcej w jednakowym stopniu , natomiast znaczenie dwóch pozostałych jest o około 50% mniejsze. Obliczono także, [3], że około 65% obiektów może być uchwycone przez chwytaki z dwiema końcówkami, dodatkowo 25% - przez chwytaki z trzema końcówkami, a tylko około 10% obiektów wymaga stosowania bardziej złożonych rozwiązań. W wielu ośrodkach naukowych prowadzone są prace nad budową chwytaków uniwersalnych; jedno z najlepszych rozwiązań tego typu opisano w pracy [5] - chwytak ten zawiera 4 palce, każdy o czterech stopniach swobody, z czujnikami pozycji i siły w każdym połączeniu.

3. Założenia, parametry wejściowe i cel procesu chwytania

Do rozważań nad algorytmizacją procesu chwytania przyjęto konstrukcję chwytaka z trzema wieloczłonowymi końcówkami chwytnymi. Model takiego chwytaka został wykonany w Instytucie Automatyki Przemysłowej. Chwytak składa się z korpusu a-b oraz trzech końcówek:
- "kciuka", składającego się z dwóch członów f-g,

- dwóch "palców", każdy składający się z trzech członów **c-d-e**, umieszczonych obok siebie w ten sposób, że kciuk wchodzi między palce.

Schemat kinematyczny chwytaka przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Struktura kinematyczna chwytaka
Fig. 1. Gripper's kinematic structure

Przyjęto następujące założenia:

- obie końcówki trójczłonowe **c-d-e** poruszają się równocześnie i równolegle, w związku z czym analizowany jest ruch tylko jednej z nich,
- kąt między krawędziami korpusu **a-b** jest większy od 90°,
- maksymalne kąty rozwarcia między końcówkami a podstawą, a także między poszczególnymi członami końcówek są mniejsze do 180°,
- oś obiektu o przekroju kołowym jest prostopadła do płaszczyzny rysunku,
- jeżeli obiekt znajduje się w zasięgu końcówek, to proces chwytania rozpocznie się od ruchu końcówki **c-d-e**, która dosuwa obiekt do krawędzi korpusu chwytaka.

Zadanymi parametrami wejściowymi są:

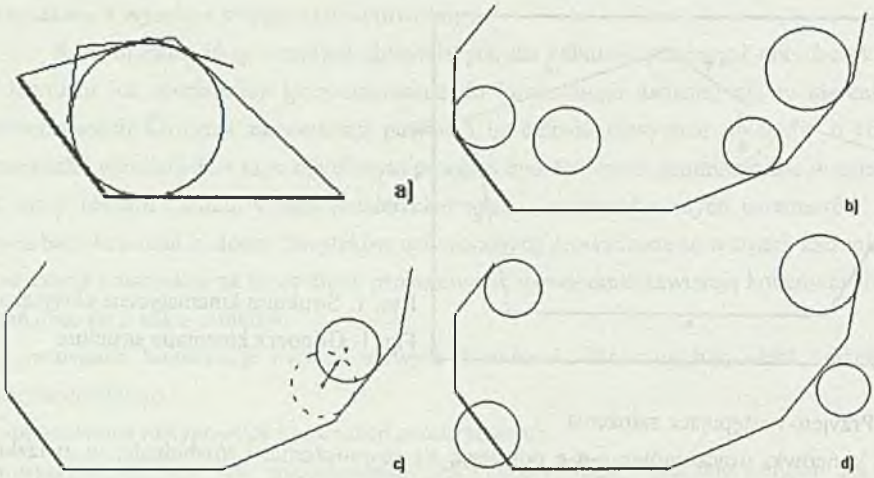
- wymiary geometryczne chwytaka,
- rodzaj materiału, z którego wykonane są końcówki chwytaka,
- parametry przekroju obiektu,
- rodzaj materiału, z którego jest obiekt wykonany,
- początkowe położenie obiektu względem chwytaka.

Celem procesu chwytania jest dosunięcie obiektu do położenia optymalnego, w którym przekrój obiektu styka się z krawędziami korpusu oraz końcówkami chwytaka (rys. 2a).

4. Analiza procesu chwytania obiektów o przekroju kołowym

W pierwszym etapie analizy procesu chwytania należy sprawdzić, czy obiekt znajduje się w strefie chwytania, tj. w obszarze między krawędziami **a-b** korpusu chwytaka

a końcówkami **c-d-e** i **f-g** w stanie ich maksymalnego rozwarcia (rys. 2b). Wynik tego sprawdzenia zależy od średnicy obiektu, położenia środka jego przekroju względem wybranego punktu chwytaka oraz od parametrów geometrycznych chwytaka.



Rys. 2. Przykłady procesu chwytania chwytakiem wieloczłonowym: a) optymalne końcowe położenie obiektu, b) obiekty w strefie uchwycenia, c) przemieszczanie się obiektu po końcówce, d) obiekty poza strefą chwytania

Fig. 2. Examples of the grasping process of multifinger gripper: a) an optimum end position of the object, b) objects in the grasping zone, c) relocation of an object on the gripper's Finger, d) objects out of the grasping zone

Obiekt znajduje się w zasięgu końcówki **c-d-e**, jeżeli odległość l (środka przekroju obiektu od końca krawędzi **a**, rys.3) nie przekracza wartości maksymalnej, opisanej zależnością:

$$l \le \sqrt{m^2 + c^2 - 2 \cdot m \cdot c \cdot \cos \varepsilon}$$

przy czym

$$\varepsilon = \gamma - arctg \frac{r}{d - r \cdot ctg\left(\frac{\delta}{2}\right)}$$

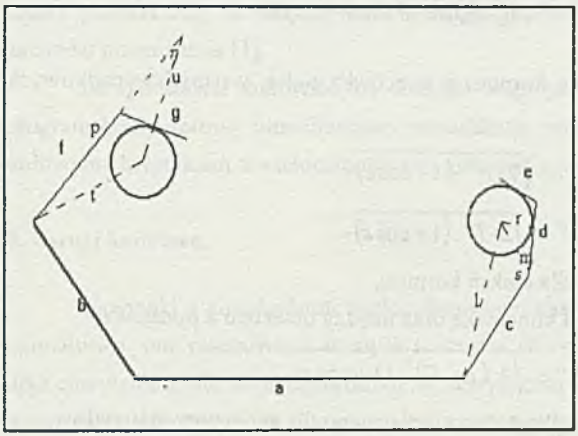
$$m = \sqrt{r^2 + \left(d - r \cdot ctg\left(\frac{\delta}{2}\right)\right)^2}$$

gdzie: γ jest maksymalnym kątem rozwarcia członów **c** i **d**,

δ jest maksymalnym kątem rozwarcia członów **d** i **e**,

r jest promieniem przekroju obiektu.

Jako skrajne położenie obiektu znajdującego się w zasięgu końcówki przyjęto takie,w którym przy maksymalnych kątach rozwarcia między członami końcówki styka się on jednocześnie z członami **d** i **e**. Wszystkie dalsze położenia obiektu, w których styka się on tylko z członem **e**, nie prowadzą do pomyślnego zakończenia procesu chwytania, gdyż podczas ruchu końcówki obiekt ma tendencję do toczenia się po członie końcówki i oddalania od strefy chwytania (rys. 2c). W trakcie badań eksperymentalnych modelu chwytaka stwierdzono, że ruch ten zależy od dużej liczby czynników (np. tarcie ślizgowe i tarcie wiertne między obiektem a podłożem, tarcie w punkcie styku obiektu z końcówką, wzajemne ustawienie obiektu i końcówki), trudnych do opisu matematycznego. W dalszej analizie pominięto zjawisko toczenia się obiektu po końcówce; przyjęto, że punkt styku obiektu z końcówką nie zmienia się w czasie sprowadzania go do korpusu - założenie to ułatwia analizę,a jednocześnie nie ma wpływu na wynik końcowy procesu chwytania, bowiem osiągnięcie położenia optymalnego następuje w wyniku działania obu końcówek.



Rys. 3. Oznaczenie zależności geometrycznych

Fig. 3. Designation of geometrical dependences

Obiekt nie może być uchwycony, jeżeli przy maksymalnych kątach rozwarcia członów końcówki przekrój obiektu ma dwa punkty przecięcia z końcówkami lub korpusem chwytaka, albo leży poza strefą chwytania (rys. 2d); m.in. sprawdzić należy położenie, w którym końcówka styka się z powierzchnią obiektu - kąt między końcówką a krawędzią korpusu nie może być większy od założonej wartości maksymalnej.

Analogicznie realizowane jest sprawdzenie, czy obiekt znajduje się w zasięgu końcówki **f-g** - rys.3. Obiekt znajduje się w zasięgu tej końcówki, jeżeli spełniona jest nierówność:

$$t < \sqrt{p^2 + u^2 - 2 \cdot p \cdot u \cdot \cos \eta}$$

gdzie:

t - odległość środka obiektu od punktu końca krawędzi **b**,

$$p = f + \frac{g}{\cos(\pi - \phi)}$$

$$u = r + g \cdot tg(\pi - \phi)$$

$$\eta = \phi - \frac{\pi}{2}$$

ϕ - maksymalny kąt rozwarcia końcówki **f-g**.

Po dosunięciu obiektu do korpusu chwytaka należy sprawdzić, czy nacisk końcówki spowoduje jego przesuwanie się po krawędzi korpusu. Siły działające na obiekt zależą od miejsca styku z korpusem, od wymiarów obiektu i elementów chwytaka, rodzaju materiałów, z którego zostały one wykonane, a także od stanu stykających się powierzchni.

Układ sił działających na obiekt w chwili jego zetknięcia z krawędzią korpusu chwytaka przedstawiono na rys. 4.

Jeżeli obiekt został dosunięty do korpusu **a** końcówką **c-d-e**, wartości wypadkowych sił F' oraz F'' wynoszą:

$$F' = \sqrt{2 \cdot F^2 \cdot (1 - \cos\varepsilon)}$$

$$F'' = \sqrt{2 \cdot T^2 \cdot (1 + \cos\varepsilon)}$$

gdzie: F - siła nacisku końcówki oraz siła reakcji korpusu,

T - siła tarcia między obiektem a końcówką oraz między obiektem a podstawą,

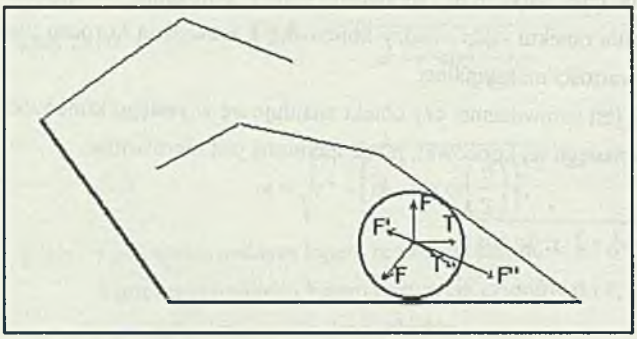
$T = \mu_s \cdot F$, więc: $$F'' = \sqrt{2 \cdot (\mu_s \cdot F)^2 \cdot (1 + \cos\varepsilon)}$$

μ_S - współczynnik tarcia ślizgowego statycznego dla danej pary materiałów,

ε - kąt między wektorami sił, przy czym:

$\varepsilon = \alpha$, gdy obiekt styka się z członem **c**,

$\varepsilon = \alpha + \gamma - \pi$, gdy obiekt styka się z członem **d**.



Rys. 4. Rozkład sił

Fig. 4. Force distribution

Jeżeli obiekt został dosunięty do korpusu końcówką f-g, wówczas wartości kąta ε wynoszą: $\varepsilon = \beta$, gdy obiekt styka się z członem f,

$\varepsilon = \beta + \phi - \pi$, gdy obiekt styka się z członem g.

Obiekt będzie przemieszczać się po krawędzi korpusu, jeżeli:

$$\sqrt{1-\cos\varepsilon} > \mu_s \cdot \sqrt{1+\cos\varepsilon}\ ;$$

podczas przemieszczania się obiektu sprawdzana jest zależność:

$$\sqrt{1-\cos\varepsilon} > \mu_k \cdot \sqrt{1+\cos\varepsilon}\ ,$$

gdzie: μ_k - współczynnik tarcia ślizgowego kinetycznego dla danej pary materiałów.

Przedstawiony opis ruchu obiektu po krawędzi korpusu ma charakter przybliżony, gdyż nie uwzględnia on sił zewnętrznych działających na obiekt oraz zawiera uproszczony zapis zachowania się ściskanego obiektu. W rzeczywistości obiekt ściskany przez dwie zbliżające się nierównoległe powierzchnie wykonuje ruchy złożone - w momencie gdy obiekt toczy się po jednej powierzchni, to między nim a drugą powierzchnią następuje poślizg, zjawisko to zachodzi przemiennie [1].

Na podstawie omówionych założeń oraz prezentowanych rozważań opracowano program komputerowy umożliwiający wizualizację procesu chwytania obiektów o przekroju kołowym chwytakiem z wieloczłonowymi końcówkami chwytnymi [6].

5. Uwagi końcowe

Chwytaki z końcówkami wieloczłonowymi charakteryzują się wieloma zaletami, m.in. umożliwiają one realizowanie różnych rodzajów chwytania, bazowanie obiektów manipulacji oraz chwytanie z siłami mniejszymi niż w chwytakach z dwiema końcówkami. Proponowane rozwiązania konstrukcyjne mogą znaleźć zastosowania przemysłowe, np. w przypadkach chwytania obiektów w ruchu lub nie pozycjonowanych.

Przeprowadzona analiza procesu chwytania obiektów manipulacji chwytakiem z wieloczłonowymi końcówkami umożliwia wyznaczenie warunków uchwycenia dla danych parametrów chwytaka oraz obiektu. Możliwe jest także analizowanie wpływu parametrów konstrukcyjnych chwytaka (w tym także materiałów końcówek) na przebieg procesu chwytania - dla danego obiektu można więc dobrać optymalne parametry konstrukcyjne chwytaka.

LITERATURA

[1] Rovetta A., Tanie K.: Grasping in Nature and in Robotics: A Parallel Logical Concept. Bulletin of Mechanical Engineering Laboratory, 1989, No.51, p.1.

[2] Czełpanow I.B., Kołpasznikow S.N.: Schwaty promyszliennych robotow. Maszinostrojenije, Leningrad 1989, s.10.

[3] Pham D.T., Heginbotham W.B.: Robot Grippers. IFS (Publications) Ltd., Bedford 1986.

[4] Kato I., Sadamoto K.: Mechanical Hands Illustrated. Hemisphere Publishing Corporation, New York 1987

[5] Allen P., Michelman P., Roberts K.: Current Research in Robotics and Automation. An Intelligent Grasping System. Computer, N.3, 1989, pp.50-52.

[6] Szymański L.P.: Algorytmizacja i wizualizacja procesu chwytania obiektów manipulacji. Praca dyplomowa. Politechnika Warszawska Instytut Automatyki Przemysłowej. Warszawa 1993.

Recenzent: Prof. dr inż. Henryk Kowalowski

Wpłynęło do Redakcji do 30.04.1994 r.

Abstract

Some questions related to a grasping process of manipulated objects and an algorithm of the process are prescuted. A view on selected theoretical issues concerning the grasping process, as well as questions of the structural design and applications of the gripping mechanisms of industrial robots are disseussed. Assumptions, input parameters and a proposed objective of the grasping process are included. An analysis of the grasping of manipulated objects with circular cross-sections that are handled by a three-digit gripping mechanism is also described. Then some examples of the grasping process with a multifinger gripper, such as: an optimum end position of an object, relocations of an object on the gripper finger, objects in and out of the grasping zone, are persented.

The final part of the paper presents conclusions and applications of multifinger gripping mechanisms of industrial robots.