

**PRZEMYSŁOWY INSTYTUT AUTOMATYKI I POMIARÓW
MERA-PIAP**

Al. Jerozolimskie 202

02-222 Warszawa

Telefon 23-70-81

074 OŚRODEK ROBÓTÓW PRZEMYSŁOWYCH

Grupa Problemowa G/s Modelowania, Optymalizacji i Obliczeń
Inżynierskich

Główny wykonawca dr inż. J. Jabłkowski

Wykonawcy

Konsultant

Nr zlecenia

PR.01-09

ANALIZA I OCENA WSPÓŁCZESNYCH METOD
PROJEKTOWANIA WSPOMAGANEGO KOMPUTEREM
W ZAKRESIE CZĘŚCI MANIPULACYJNEJ
ROBÓTÓW PRZEMYSŁOWYCH

Zleceniodawca

Problem węzłowy 06.6

Pracę rozpoczęto dnia wrzesień 1985

Kierownik Grupy
Problemowej

dr inż. J. Jabłkowski

Z-ca Dyrektora
G/s Automatyki

dr inż. T. Gałazka

zakończono dnia 85-12-06

Kierownik G/s

mgr inż. L. Rybylski

Praca zawiera:

stron 48

rysunków -

fotografii -

tabel -

tablic -

załączników -

Rozdzielnik - ilość egz:

Egz. 1 PIAP - BOINTE

Egz. 2 PIAP - OAR

Egz. 3 PIAP - OAR

Egz. 4 PIAP - OAR

Egz. 5

Egz. 6

Nr rejestr. 5523

Analiza deskryptorowa

KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE PROJEKTOWANIA + ROBOTY
PRZEMYSŁOWE + MODELOWANIE + SYMULACJA

Analiza dokumentacyjna

W sprawozdaniu omówiono i oceniono wiele prac, publikowanych w ostatnich latach, a związanych przede wszystkim z modelowaniem i symulacją kinematyki i dynamiki części manipulacyjnej robotów przemysłowych. Przedstawione wnioski mogą być użyteczne przy formułowaniu zadań Instytutu i przy ich realizacji w zakresie związanym z omówioną tematyką.

Tytuły poprzednich sprawozdań

Nie było.

338.45162/69].002.1/2 Roboty przemysłowe

681.322, 004.14 Komputery - zastosowanie

UKD

PIAP-252/83-6000

SPIS TREŚCI
=====

	str.
1. WSTĘP	.5..
2. WPROWADZENIE	.8..
3. PRZEGLĄD WYBRANYCH PRAC	
3.1. Zagadnienia teoretyczne i ogólne związane z modelowaniem i symulacją części manipu- lacyjnej	.12..
3.2. Modelowanie i symulacja konkretnych obiektów dla lepszego poznania ich właś- ciwości kinematycznych i dynamicznych . . .	.18..
3.3. Modele napędu dla robotów	.20..
3.4. Zagadnienia teoretyczne i ogólne związa- ne z syntezą układu sterowania	.21..
3.5. Modelowanie i symulacja dla potrzeb opty- malizacji i syntezy układu sterowania dla konkretnych obiektów	.26..
3.6. Uniwersalne pakiety oprogramowania - symu- latory i systemy służące do programowania off-line	.27..
3.7. Modelowanie i symulacja działania robota lub wielu robotów na stanowisku pracy . . .	.28..
3.7.1. Możliwości grafiki komputerowej w zadaniu wizualizacji działania robota na stanowisku	.29..
4. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA OMAWIANYCH PRAC . . .	.30..

	str.
5. PODSUMOWANIE	.32.
6. BIBLIOGRAFIA	.33.
7. DODATEK	.43.

1. WSTĘP =====

Niniejsze opracowanie zawiera wyniki realizacji zlecenia nr PR.01-09 wykonanego w ramach Problemu Węzłowego 06.6.

W najbliższych latach przewiduje się podjęcie w PIAP wielu zadań, związanych z opracowaniem konstrukcji nowych robotów przemysłowych, zakłada się przy tym szerokie zastosowanie współczesnych technik komputerowego wspomaganie projektowania /KWP/ i użycie komputerów do obliczeń dynamiki, syntezy układu sterowania itp. Brak szerszych doświadczeń w Instytucie w tym zakresie w odniesieniu do robotów zrodził konieczność dokonania odpowiedniego rozpoznania w bieżącej, na ogół trudno dostępnej, literaturze przedmiotu, przede wszystkim w celu określenia miejsca i znaczenia modelowania i symulacji w podejmowanych pracach.

Jaką wagę przywiązują do tak rozumianego KWP zaawansowani producenci robotów, a jaką "goniący czołówkę", czy zastosowanie modelowania i symulacji w procesie opracowania, a później wdrażania nowych konstrukcji, relatywnie wzrasta czy maleje, czy ustalone są obszary i dziedziny zastosowań KWP, czy też jest to in statu nascendi - na te i podobne pytania powinny dać odpowiedź informacje zawarte w opracowaniu.

Przy zestawieniu tych informacji starano się wziąć pod uwagę to, że mają one znaczenie zarówno dla decy-

dentów /w jakich dziedzinach i w jakim zakresie warto angażować potencjał badawczy i finansowy/ jak i dla podejmujących zadania zespołów /pomoc w wyborze kierunku, metod, sprzętu/. Ze względu na nieprzewidzianą w chwili formułowania zlecenia obszerność materiału oraz ze względu na krótki czas realizacji zlecenia - mimo ograniczenia się do prac, publikowanych w latach 81-84 i częściowo 85 - przedstawiona analiza ma charakter powierzchowny.

Opracowanie zawiera:

- wprowadzenie, w którym omówiono m.in. przyjęty zakres pracy, źródła na których oparto opracowanie oraz wskazano na miejsce i znaczenie modeli kinematyki, dynamiki, układów sterowania w opracowaniu i doskonaleniu konstrukcji robotów.
- przegląd wybranych prac, z podziałem ich na grupy, uwzględniające cel budowy modeli i dziedziny ich stosowania.
- ogólną charakterystykę ostatnio publikowanych prac w omawianej dziedzinie.
- podsumowanie, w którym m.in. podkreślono te uwagi i spostrzeżenia, które mogą mieć znaczenie z punktu widzenia przewidywanych do realizacji w Instytucie zadań.

Na zakończenie zamieszczono obszerny spis literatury, w którym odrębnie zaznaczono prace, będące w posiadaniu autora sprawozdania. Wobec znanych trudności z dostępem do bieżącej literatury przedmiotu może to ułatwić zainteresowanym dotarcie do odpowiednich prac.

2. WPROWADZENIE

=====

Na wstępie wymaga wyjaśnienia jak będzie rozumiany termin "komputerowe wspomaganie projektowania" w odniesieniu do części manipulacyjnej robotów. Otóż przedmiotem zainteresowania będzie użycie komputerów nie tylko w fazie projektowania manipulatora, lecz również w dalszych działaniach, związanych z syntezą układu regulacji, oprogramowaniem a także aplikacjami gotowego robota. Natomiast w zasadzie pominięte zostaną zagadnienia, związane z pomocniczym wykorzystywaniem komputera jako środka przyspieszającego i usprawniającego obliczenia inżynierskie. Takie postawienie problemu pozwala w całości skoncentrować się na zagadnieniu modeli matematycznych opisujących geometrię, kinematykę, dynamikę i zagadnienia sterowania dla części manipulacyjnej robota.

Współczesny robot przemysłowy jest złożonym obiektem o silnie nieliniowej dynamice, co praktycznie biorąc wyklucza możliwość podejścia analitycznego do problemów związanych z jego konstrukcją i narzuca konieczność modelowania i symulacji jako środka prowadzącego do poznania właściwości kinematycznych i dynamicznych. Jest to konieczne już w najwcześniejszej fazie projektowania robota i pozwala wówczas na optymalizowanie jego części manipulacyjnej pod względem wytrzymałości, mocy, konstrukcji napędów, konstrukcji układów odciąż-

zajających, wielkości przenoszonych mas itd. dzięki obliczeniom prędkości, przyspieszeń a także sił i momentów wymuszających zaprogramowany ruch. W dalszych fazach projektowania modele są niezbędne dla syntezy regulatora optymalnego ze względu na postawione zadanie, do testowania oprogramowania off - line. Złożone modele oparte jednak o model kinematyki i dynamiki danego robota mogą być użyte przy aplikacjach służyć np. do symulacji działania stanowisk z wieloma robotami.

Trzy stwierdzenia dotyczące miejsca modelowania i symulacji we współczesnej robotyce powinny być podkreślone, mianowicie:

1. Model musi powstać. Wyjawszy niektóre konstrukcje prostych manipulatorów opracowanie współczesnego robota wymaga korzystania z modeli i wyników ich symulacji. Podkreślają to m.in. autorzy monografii /1/ /2/ /3/.
2. Powstanie modeli matematycznych powinno wyprzedzać odpowiednie fazy powstania konstrukcji. Autor pracy /4/ stwierdza wprost: "zanim jakikolwiek rysunek czy schemat trafi do warsztatu, należy zbudować model robota, ponieważ i tak musi on powstać". Podobny pogląd wyrażają autorzy pracy /5/ operując pojęciem symulatora, tj. rozbudowanego modelu robota: "Oceniając osiągi projektowanego robota z róż-

nych punktów widzenia przez użycie jego symulatora, przed wyprodukowaniem tej konstrukcji, mogliśmy stworzyć optymalny projekt nowego manipulatora". Podobne stwierdzenia podaje wielu innych autorów.

3. Modele są wykorzystywane na wszystkich etapach procesu opracowania i wdrażania konstrukcji, począwszy od fazy opracowania koncepcji a skończywszy na analizach współdziałania wielu egzemplarzy np. przy zrobotyzowanej linii produkcyjnej /wiele przykładów podano w następnym rozdziale/.

Przy opracowaniu zawartych w tym sprawozdaniu uwag i wniosków w zasadzie /z pojedynczymi wyjątkami, uzasadnionymi ich "klasycznością"/ oparto się na materiale, ograniczonym do prac, publikowanych po 1980 r. Uzasadnione to jest po pierwsze szybkim rozwojem tej dziedziny wiedzy, działającym na rzecz dezaktualizacji wcześniejszych opracowań, po drugie obfitością publikowanych materiałów i związanymi z tym trudnościami objęcia opracowaniem jeszcze większej ich liczby, wreszcie dostępnością bibliografii analizowanej dziedziny za lata 70-81 /6/. W bibliografii tej, w grupach tematycznych: KINEMATICS, DYNAMICS, CONTROL SYSTEMS, ACTUATORS i in. zestawiono informacje bibliograficzne o kilkuset pracach.

Wybór prac z lat 1982-84 oparto na danych, zawartych w przeglądzie /7/, a z roku 1985 - na śledzeniu zawartości wydawnictw i periodyków znanych z wcześniejszych publi-

kacji w analizowanej tematyce. Najwięcej informacji dostarczyły materiały z konferencji JSIR /8/, /9/, Ro-man-sy /10/ /11/, JCAR /12/ oraz /13/ i /14/, a także materiały z konferencji krajowych /15/ /16/ /17/. Zwłaszcza konferencje JSIR /coroczną/ i Ro-man-sy /co trzy lata/ uznać można za najpoważniejsze źródło aktualnych informacji w zakresie, będącym przedmiotem zainteresowania w tej pracy. Jeśli chodzi o periodyki, to najczęściej korzystano z Transactions of ASME Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control i Mechanism and Machine Theory oraz Simulation in Engineering Science a także Techničeskaja Kibernetika i Avtomatika.

3. PRZEGLĄD WYBRANYCH PRAC =====

Poniżej dokonano przeglądu wybranych prac, po podzieleniu ich na grupy, charakteryzujące cele budowy modeli, bądź ich obszary zastosowań. Zaproponowany przez autora podział ma charakter pomocniczy i wynika z potrzeby uporządkowania tak dużego materiału. Rzecz jasna niektórzy prace mają cechy kwalifikujące je do przynależności do więcej niż jednej grupy. W przeglądzie starano się uwzględnić przede wszystkim takie prace, które mają charakter nieco ogólniejszy oraz zawierają liczne odwołania do innych pozycji literatury - powinno to ułatwić dalsze wykorzystanie zawartych tu informacji.

3.1. Zagadnienia teoretyczne i ogólne związane z modelowaniem i symulacją części manipulacyjnej.

Robotyka jest dziedziną powstałą niedawno i znajduje się w fazie intensywnego rozwoju, stąd podejmowane w niej zagadnienia trudno usystematyzować w sposób możliwy do przyjęcia z punktu widzenia różnych autorów, nie mniej jednak próby takiego usystematyzowania są dokonywane /np. /18/, a także /1/, /2/, /3/ /. Tu będzie mowa o problemach kinematyki i dynamiki części manipulacyjnej robota.

Zazwyczaj, dla typowego robota o 6-ciu stopniach swobody wyróżnia się zbiór członów i par kinematycznych,

tworzących mechanizm pozycjonujący oraz zbiór członów i par kinematycznych tworzących mechanizm orientujący. Mechanizmy pozycjonujące, ze względu na rodzaje wykonywanych ruchów, zaliczyć można do jednej z czterech kategorii: działających we współrzędnych kartezjańskich, cylindrycznych, sferycznych i obrotowych.

Kinematyka robota zajmuje się geometrią przemieszczeń jego wybranych punktów w funkcji czasu, bez uwzględnienia sił i momentów powodujących ruch. Przyjęty jest powszechnie podział na dwa odrębne problemy: proste i odwrotne zagadnienie kinematyczne.

Zagadnienie proste polega na określeniu pozycji i ew. orientacji końcówki /efektora/ robota w układzie współrzędnych zewnętrznych, związanych z nieruchomą podstawą, gdy dane są współrzędne wewnętrzne, tzn. odpowiednie wielkości liniowe i/lub kątowe związane z przemieszczeniem dla poszczególnych par kinematycznych. Rozwiązanie tego zagadnienia najczęściej opiera się na metodzie, zaproponowanej w pracy /19/: z każdym ogniwem łańcucha kinematycznego, narzędziem oraz otoczeniem robota związany jest kartezjański prawoskrętny układ współrzędnych taki, że przekształcenie sąsiednich układów u siebie może być zawsze wykonane przez nie więcej niż dwa obroty i dwa przesunięcia względem osi tych układów.

Odwrotne zagadnienie kinematyczne, zwane też syntezą ruchów robota, polega na znalezieniu wartości współrzędnych

nych wewnętrznych, gdy położenie i orientacja końcówki robota są określone we współrzędnych zewnętrznych związanych z podstawą. Ponieważ zadania robota są najczęściej specyfikowane w układzie współrzędnych naturalnych tj. związanych z ziemią, odwrotne zagadnienie kinematyczne częściej niż proste występuje w modelowaniu i komputerowej symulacji.

Jeśli chodzi o aparat matematyczny to w zagadnieniach kinematyki korzysta się z rachunku wektorowego i algebry macierzy.

Dynamika zajmuje się sformułowaniem matematycznym równań ruchu opisujących dynamiczne zachowanie się manipulatora, równania te są następnie wykorzystywane do symulacji ruchu, projektowania odpowiedniego sterowania /syntezy regulatora/, oceny projektu struktury kinematycznej i ew. poprawek. Do opisu dynamiki używa się najczęściej równań Lagrange'a - Eulera, Newtona - Eulera uogólnionej zasady d'Alemberta, a także równań rekursywnych Lagrange'a - Eulera, równań Hamiltona i zasady najmniejszego skrępowania Gaussa /18/, /20/. Nieliniowe równania różniczkowe Lagrange'a - Eulera dają "pełny" opis dynamiki, uwzględniający siły bezwładności, siły Coriolisa, siły odśrodkowe i siły ciężkości, pomijają natomiast dynamikę układu sterowania, niemożliwe jest też uwzględnienie tarcia w przekładniach. Ze względu na prostą i elegancką formę budziły zainteresowanie wielu badaczy. Jednakże użycie pełnego modelu okazało

się nieefektywno ze względu na czas przeprowadzanych obliczeń. Dlatego korzysta się niekiedy z opisu przybliżonego, pomijającego siły Coriolisa i siły odśrodkowe - taki model może być użytkowany pod warunkiem, że prędkości ruchu są niewielkie. Dla przypadku, gdy prędkości ruchu są duże, a wymagania dokładności istotne stosuje się często równania wektorowe Newtona - Eulera. Z natury tych równań i metody wyliczania sił i momentów przy ich użyciu wynika możliwość uproszczenia obliczeń i skróceniu czasu ich trwania. Oznacza to, że taki opis może być stosowany w modelach, służących do sterowania w czasie rzeczywistym. Porównanie właściwości różnych metod opisu dynamiki przedstawiono m.in. w pracy /18/ i /28/.

Obecnie wymienione zostaną niektóre prace, zaliczone do omawianej tu grupy.

Podstawowe zagadnienie kinematyki to synteza ruchów, czyli rozwiązanie tzw. odwrotnego problemu kinematycznego. W tym zakresie możliwe są różne algorytmy i procedury obliczeniowe. W pracy /21/ przedstawiono algorytm obliczeniowy dla każdej struktury kinematycznej bez nadmiarowości stopni swobody i pokazano jego działanie na przykładzie robota PUMA-560 i robota prototypowego. Zbieżność algorytmu oceniono ścisłą metodą Lapunowa. Nieco inny algorytm podano w pracy /22/ na przykładzie robota o 5-ciu stopniach poruszono tu obszerniej aspekt sprzętowy realizacji zadania. Właściwości różnych algorytmów specjalnych, służących do rozwią-

zywania odwrotnego problemu kinematycznego przedstawiono w pracy /23/. Zupełnie nową metodę syntezy ruchów pozwalającą wyznaczyć położenie dla dowolnego robota o 6-ciu stopniach swobody, przedstawili autorzy pracy /24/. Metoda daje szybką zbieżność i wg autorów czas liczenia jest w wyniku tego ok. 10 razy szybszy niż w przypadku innych, najczęściej używanych algorytmów. Szybkość rozwiązania jest w centrum uwagi ze względu na zastosowanie do pracy w czasie rzeczywistym i oprogramowanie on-line /25/. Próbę uogólnienia i udoskonalenia narzędzi stojących do dyspozycji w zadaniu modelowania kinematyki podano w pracy /26/.

Ogólny model dynamiczny, opisany równaniami Newtona - Eulera podano w pracy /27/. Rozwiązanie równań dla przyspieszeń złącz /przegubów/ podane jest dla przypadków: mechanizmu łańcuchów otwartych, dla pojedynczych pętli, dla mechanizmów łańcuchów zamkniętych oraz uogólnionego przypadku mechanizmów pętli podwójnych łańcuchów zamkniętych. Algorytm rozwiązywania prostych i odwrotnych problemów dynamicznych podano w pracy /28/ i sprawdzono na dwóch przykładach manipulatorów o 6-ciu stopniach swobody. Nieco inny opis kinematyki i dynamiki manipulatorów, bazujący na tzw. równaniach Kane'a przedstawiono w pracach /29/ i /30/. W pracy /31/ porównano zalety dwóch różnych postaci opisu dynamiki w zależności od zestawu parametrów użytych do opisu.

Istnieje zainteresowanie metodami eliminującymi całkowanie numeryczne przy rozwiązywaniu równań. Jedną z

możliwości w tej dziedzinie wiąże się z wykorzystaniem kinetostatyki mechanizmu w zadaniu określania sił i momentów napędu poszczególnych członów, co przedstawiono w pracy /32/.

We wszystkich wspomnianych wyżej metodach i opartych na nich pracach przyjmowano założenie o sztywności członów. Jednakże, we współczesnych robotach, ze wzrostem prędkości członów okazuje się konieczne w niektórych przypadkach uwzględnienie efektu podatności. Rozważania teoretyczne dotyczące części manipulacyjnych o złożonej strukturze, składającej się zarówno z elementów sztywnych jak i podatnych przedstawiono w pracy /33/. Układ równań opisujących ruch części manipulacyjnej ma formę równań różniczkowych zwyczajnych oraz r.r. cząstkowych oraz równań cząstkowych całkowo-różniczkowych. Zastosowano metodę dyskretyzacji współrzędnych elastycznych przez rozwinięcie w szereg /metoda Ritza - Kantorowitcha/. Do rozwiązania problemu zastosowana jest klasyczna metoda elementów skończonych. Rozważania zilustrowano przykładem abstrakcyjnym: pręta aluminiowego o długości 1 m, masie 0,7 kg z zamocowanym na końcu ciężarem o masie 10 kg. Eksperymentalna weryfikacja potwierdziła adekwatność modelu teoretycznego w szerokim przedziale częstotliwości. Na metodzie elementów skończonych oparto również modelowanie dynamiki części manipulacyjnej z członami podatnymi w pracy /34/. W pracy /35/ pokazano sposób analizy odkształceń statycznych oraz uproszczony sposób analizy drgań końcówki robota o członach podatnych. W pracy /36/ zwrócon

szczególne uwagi na właściwości obliczeniowe proponowanych metod modelowania robota z członami podatnymi.

Rozpowszechnione roboty przemysłowe mają strukturę kinematyczną szeregową, nie mniej jednak rozważa się na modelach także zalety i możliwości struktury równoległej /37/. Wymieniane już prace dotyczą zazwyczaj robotów o nie więcej niż 6 stopniach swobody; znane są jednak modele matematyczne obiektów o znacznie większej liczbie stopni swobody. Np. w pracy /38/ opisano robota z mechanicznym ramieniem o 6-ciu stopniach swobody wyposażonego w "dłoń" o 13 stopniach swobody: 3 palce po 4 stopnie swobody + 1 stopień dla całej dłoni. Inna szczególna praca /39/ prezentuje próbę zastosowania techniki grafów więzów do zobrazowania struktury dynamicznej części manipulacyjnej.

3.2. Modelowanie i symulacja konkretnych obiektów dla lepszego poznania ich właściwości kinematycznych i dynamicznych.

W tej grupie wymienione zostaną prace, w których model powstał z myślą o potrzebach odwzorowania konkretnego obiektu, bądź badania symulacyjne miały na celu poznanie właściwości takiego obiektu. W sensie merytorycznym ta grupa prac jest ściśle związana z poprzednio omówioną.

W pracy /39/ zaprezentowano model dynamiczny dla obiektu typu otwarty łańcuch kinematyczny. Przedstawiony mo-

del uproszczony pomija siły Coriolisa i siły odśrodkowe; może być użyty do syntezy trajektorii optymalnej. Badania symulacyjne przeprowadzono dla dwóch robotów: UMS-1 i UMS-2. Wyniki pozwoliły stwierdzić, że użycie modelu uproszczonego zamiast modelu pełnego jest zasadne, znacznie ogranicza czas obliczeń i prowadzi do wyznaczenia tych samych wartości optymalnych, co model pełny. Badaniom robota UMS-2 poświęcona jest też praca /40/ gdzie użyto modelu wrażliwości, pozwalającego na zmiany masy i momentów bezwładności poszczególnych członów. Przedstawiono wyniki badań wrażliwości modelu na zmiany parametrów dynamicznych związanych z końcówką manipulatora /efektorem/. Z kolei manipulator antropomorficzny UMS-1, w którym uwzględniono podatność członów, jest przedmiotem badań w pracy /41/. W pracy /42/ przedstawiono model robota, umożliwiający optymalizację dowolnej konstrukcji względem kryterium prędkości lub czasu przejścia żądanej trajektorii oraz kryterium zużycia energii, albo kryterium łączącego oba wymienione. Dla konkretnej konstrukcji przedstawiono wyniki symulacji w postaci przebiegów czasowych współrzędnych określających m.in. położenie oraz stan napędów.

Praca /43/ poświęcona jest uściśleniu znanego z innych, opracowań modelu kinematycznego robota PUMA-600. Na bazie tego modelu rozwiązywano proste i odwrotne zagadnienie kinematyczne oraz tzw. proste i odwrotne zagadnienie kinematyczne różniczkowe /odpowiednie rachunki na prędkościach/. Dla robota NORDSON o 6-ciu stopniach swobody

w pracy /44/ podano cztery metody obliczania przyspieszeń dla przegubów. Wzięto pod uwagę czas obliczeń i ilość wykonywanych operacji tj. mnożeń i dodawań. Przez całkowanie metodą Runge - Kutta piątego rzędu otrzymuje się prędkości a przez ponowne całkowanie położenia.

Kilka prac autorów polskich w tej dziedzinie przedstawiono w materiałach z konferencji /15/, /16/, /17/ a mianowicie m.in.: model dynamiczny robota RIMP 402/W5-0 w pracy /45/, model dla manipulatora RPA-30 w pracy /46/, analizę kinematyczną robota RIMP-1000 w pracy /47/ i /48/, badanie interakcji dynamicznych dla robota IRb-6 /i IRb-60/ w pracy /49/. Wymienić tu należy także obszerną pracę /50/, której zamierzony zakres rozciąga się na wszystkie omawiane tu grupy tematyczne.

3.3. Modele napędu dla robotów.

Tę grupę prac wyodrębniono dla pokazania przykładów, że istnieją modele dla wszystkich praktycznie rodzajów napędów stosowanych w robotach, przy tym na ogół dla potrzeb robotyki zapożycza się doświadczenia z modelowaniem i symulacji napędów elektrycznych, hydraulicznych i pneumatycznych powstałe w innych dziedzinach.

Bardzo prosty, ale wystarczająco dokładny model najczęściej spotykanego w napędach elektrycznych silnika prądu stałego z magnesem trwałym przedstawiono m.in. w pracach /1/ i /50/. Model napędu elektrohydraulicz-

nego służący optymalizacji względem zużycia energii /dla realizacji założonej trajektorii ruchu/ na przykładzie robota USM-3B pokazano w pracy /51/, podobny model podano też w pracy /1/. Rozważania dotyczące napędów elektropneumatycznych i pneumatycznych dla robotów częściej spotyka się w piśmiennictwie, co zapewne spowodowane jest istotnością dynamicznych efektów w ruchu nieustalonym i relatywnie bardziej złożonym opisem. Różne możliwości uproszczenia tego złożonego opisu, dla napędu z siłownikiem pneumatycznym zasilanym z układu sterowanego elektrozaworem przedstawiono w pracy /52/. W pracy /53/ zaprezentowano model napędu pneumatycznego wraz z pełnym układem zasilania. Przedmiotem pracy /54/ są właściwości dynamiczne napędu pneumatycznego robota PR-02, ten sam model został użyty do optymalizacji wielokryterialnej amortyzatora dobiegu /55/.

3.4. Zagadnienia teoretyczne i ogólne związane z syntezą układu sterowania.

Na problem sterowania w rozumieniu przyjętym w tej pracy składa się sformułowanie użytecznych modeli dynamiki części manipulacyjnej, zaprojektowanie regulatora i określenia prawa sterowania i strategii sterowania aby otrzymać pożądaną odpowiedź i właściwości. Celem sterowania jest doprowadzenie do wykonania ruchu wzdłuż określonej trajektorii poprzez generowanie sygnałów, korygujących odpowiednie momenty lub siły napędowe,

tak aby minimalizować błąd położenia w stosunku do zadanej trajektorii. Dla realizacji tego celu w typowych współczesnych układach sterowania robotów używa się klasycznych serworegulatorów. Jednakże dynamika ruchu robota złożonego ma charakter nieliniowy i może być opisana tylko zbiorem równań różniczkowych zwyczajnych silnie sprzężonych. Na nieliniowość mają też wpływ inercja obciążenia, sprzężenia pomiędzy członami i uwzględnienie sił grawitacji. Nadto parametry dynamiczne zmieniają się ze zmianą pozycji części manipulacyjnej, a charakter tych zmian jest określony związkami typu trygonometrycznego. Dlatego też użycie klasycznych serworegulatorów nie zapewnia korzystnych rezultatów, m.in. ogranicza prędkość i może być źródłem drgań. Stąd powszechne zainteresowanie nowymi metodami i technikami w dziedzinie układów regulacji.

Wielu autorów, zajmujących się tą tematyką stara się wprowadzić jakąś systematykę w dziedzinie struktur sterowania /2/, /18/, /56/, /57/; brak jednakże wyraźnego junctim między tymi propozycjami.

Z punktu widzenia struktury możliwy jest podział na układy, w których następuje odprzęgnięcie poszczególnych stopni swobody, co umożliwia kształtowanie właściwości pętli regulacji jak dla układów jednowymiarowych oraz na układy wielowymiarowe, uwzględniające interakcje pomiędzy poszczególnymi stopniami swobody.

Inny podział wynika z metody generowania ruchu. Przy odtwarzaniu zapamiętanej przez "uczenie" trajektorii

wystarczają często klasyczne serwomechanizmy położeniowe, obsługujące niezależnie poszczególne stopnie swobody - błędy odtwarzania są tym większe im szybciej przebiega ruch. Przy wykonywaniu polecenia precyzującego go położenie końcówki manipulatora /sterowanie PTP/ stosuje się skoordynowane sterowanie poszczególnymi stopniami swobody, co wymaga korzystania z modelu kinematycznego i wiąże się z trudnościami rozwiązywania odwrotnego problemu kinematycznego. Natomiast najtrudniejszy do sterowania jest przypadek poruszania się po trajektorii przy spełnieniu ograniczeń co do prędkości ruchu. Wymagane jest wówczas dokładne koordynowanie poszczególnych stopni swobody, ew. odsprzęganie. W przypadku wolnych robotów można wykorzystywać model kinematyczny, w przypadku szybkich - dynamiczny.

W pracach /58/, /59/ przedstawiono obszernie teoretyczne aspekty problemu sterowania części manipulacyjnej z wykorzystaniem modelu kinematycznego i modelu dynamicznego.

Wspólny dla wielu autorów jest pogląd o dużym znaczeniu i możliwościach sterowania adaptacyjnego, zwłaszcza z tzw. modelem odniesienia /MRAC/. Umożliwia ono osiągnięcie dobrej jakości sterowania w szerokim zakresie możliwych ruchów i dużych zmianach ciężarów użytecznych, jest przy tym stosunkowo łatwe do zastosowania /60/.

W pracy /61/ zaproponowano algorytm sterowania adaptacyjnego z modelem odniesienia. Algorytm jest realizo-

wany przez mikroprocesor, co stwarza, w związku z dyskretyzacją obliczeń, problemy ze stabilnością. Prowadzone są rozważania nad maksymalnym dopuszczalnym krokiem symulacji nie powodującym niestabilności. Badania symulacyjne dotyczą robota UCLA: porównano błąd śledzenia trajektorii dla adaptacyjnego i nieadaptacyjnego układu sterowania, jak również wpływ kroku symulacji na błąd. Kompensację nieliniowej dynamiki przez użycie modelu odniesienia w układzie adaptacyjnym zaproponowano również w pracy /62/. Badania symulacyjne wykonano dla robota o 3 stopniach swobody. Z kolei w pracy /63/ zaproponowano użycie do sterowania adaptacyjnego uogólnionego samosterującego się regulatora najmniejszych kwadratów. Propozycję pewnego układu sterowania adaptacyjnego przedstawiono też w pracy /64/. W toku symulacji, dla robota PUMA o 3 stopniach swobody porównano błąd /kątowy/ trajektorii w warunkach z obciążeniem i bez obciążenia dla poszczególnych stopni swobody.

Algorytmy obliczeniowe użyte przy sterowaniu zależą od postaci zadań jakie stawia się przed robotem. Przykładowo w pracy /65/ pokazano algorytm interpolacji łuków okręgów i linii przecinających się dwóch cylindrycznych powierzchni. Algorytm służy do sterowania robota spawalniczego. Czas liczenia jest relatywnie bardzo krótki ponieważ nie ma konieczności wykonywania obliczeń trygonometrycznych. Implementacja jest przewidziana na procesor 16-bitowy. W pracy /66/ przedstawiono model

i propozycję sterowania o wysokiej dokładności, co narzuciło konieczność uwzględnienia podatności członów. W pracy /67/ omówiono wspólne sterowanie dla dwóch manipulatorów różniących się konfiguracją i liczbą stopni swobody, a działających we wspólnej przestrzeni roboczej.

Jedną ze specyficznych metod na drodze do określenia szybkich i wydajnych algorytmów sterowania, są algorytmy sterowania poślizgowego. Jest to rodzaj sterowania impulsowego, opartego na teorii układów o zmiennej strukturze /68/. Zainteresowanie tą, skądinąd nie nową, metodą ujawniło się w ostatnim czasie, a otrzymywane rezultaty są obiecujące. Obszerne wyniki symulacji sterowania robota o 3 stopniach swobody tą metodą pokazano w pracy /69/, na sterowaniu poślizgowym bazuje również podejście przyjęte w pracy /70/.

Omawiana w tym punkcie grupa prac dot. modeli dla syntezy i optymalizacji układu sterowania - jest najliczniejsza w analizowanym materiale. W /8/ + /13/ znaleźć można kilkadziesiąt dalszych prac z tego zakresu, w których algorytmy sterowania dobiera się do konkretnych zadań, porównuje się efektywność różnych algorytmów itd. - z oczywistych względów w tym przeglądzie ograniczono się do prac przykładowych.

3.5. Modelowanie i symulacja dla potrzeb optymalizacji i syntezy układu sterowania dla konkretnych obiektów.

Analogicznie do rozdziału 3.2. tu podano kilka przykładów prac, związanych merytorycznie z poprzednią grupą, a powstałych w związku z rozwiązywaniem problemów sterowania w konkretnych obiektach.

Układ sterowania adaptacyjnego z modelem odniesienia dla robota PUMA-600 przedstawiono w pracy /71/. Wyniki symulacji podano dla czterosekundowego cyklu ruchu, w postaci przebiegów czasowych wielkości błędu pozycji, momentu i zmiennego wzmocnienia regulatora w warunkach działania robota bez obciążenia, z obciążeniem 2,5 kg i obciążeniem 5 kg. Zaproponowaną metodę sterowania porównano w aspekcie prędkości obliczeń z pięcioma innymi, znanymi w literaturze przedmiotu.

Inny robot o 6-ciu stopniach swobody, a mianowicie UMS-3B jest przedmiotem pracy /72/. Zaproponowano procedurę syntezy systemu sterowania; otrzymane prawo sterowania jest stosunkowo proste i łatwe do aplikacji. W wynikach symulacji podano rezultaty śledzenia trajektorii zadanej w zależności od opcji co do struktury układu sterowania, przyjętych wzmocnień i in. W tym samym zespole opracowano model i przedstawiono metodę syntezy dynamiki dla robota UMS-2 /73/. Strukturę sterowania, opracowaną dla robota RIMP-900, przedstawiono w pracy /74/. Układ sterowania wykorzystuje pełną informację o wielkości sprzężeń dynamicznych, wiążących

ze sobą poszczególne stopnie swobody; jedną z jego wad jest wrażliwość sterowania na błędy modelu. W pracy /75/ podano algorytm sterowania optymalnego w sensie minimalno-czasowym dla pewnego nienazwanego robota o 6-ciu stopniach swobody. Przedmiotem zainteresowania w tej pracy są m.in. zagadnienia szybkości działania robota wobec ograniczeń wynikających z dynamiki części manipulacyjnej, możliwości układów napędowych i właściwości sterowania.

3.6. Uniwersalne pakiety oprogramowania-symulatory i systemy służące do programowania off-line.

Kolejne duże grupy prac wiążą się z konsekwentnym wykorzystaniem modeli w większych systemach, służących złożonym celom. Wydaje się, że właściwa nazwa dla takich systemów to "symulatory robota". Definicję tak rozumianego symulatora podano w pracy /76/: "jest to system oprogramowania dla projektowania, analizy dynamiki, syntezy i weryfikacji algorytmów sterowania określonej mechanicznej konfiguracji". Oczywiście taki system oprogramowania jest syntezą wielu wcześniejszych doświadczeń z dziedziny modelowania kinematyki, dynamiki i układów sterowania, co właśnie znajduje wyraz w omawianej pracy. Opis złożonego systemu modelowania kinematycznych i dynamicznych właściwości robota, wraz ze szczegółową analizą podprogramów wchodzących w skład tego systemu, zamieszczono w pracy /77/. Pełny symulator robota, pozwalający dodatkowo na analizowanie podat-

ności członów i możliwości kompensacji tej podatności zaproponowano w pracy /78/.

Oprócz uniwersalnych systemów do symulacji proponuje się też systemy zorientowane na określone zastosowania; np. w pracy /79/ zaproponowano system do wspomagania projektowania sterowania robotów, pozwalający na optymalizację systemu sterowania.

Również systemy, służące oprogramowaniu off-line muszą zawierać jako element składowy mniej lub bardziej złożony symulator. Przykładem praca /80/, gdzie symulator obejmuje tylko model kinematyczny. System został implementowany na APPLE II i działa w PASCAL-u pod CS UCSD. W pracy /81/ podano cechy użytkowe systemu ARLA /bez opisu budowy jego "wnętrza"/. System implementowany jest na komputerach IBM PC i DEC/VAX.

3.7. Modelowanie i symulacja działania robota lub wielu robotów na stanowisku pracy.

W ostatnich latach rozwinęła się najbardziej zaawansowana forma wykorzystania symulatorów: systemy, obejmujące modelem oprócz robota i przenoszonych przez niego narzędzi i przedmiotów także elementy przestrzeni roboczej, w tym również elementy ruchome /np. linia produkcyjna/.

Taki system, służący do weryfikacji krytycznych parametrów jak zasięg i możliwość kolizji, przedstawiono

w pracy /82/. System posługuje się trójwymiarową grafiką, rysunki mogą być obracane. Daz przyjęte i zweryfikowane dane, opisujące obiekt mogą być użyte dla określenia cyklu roboczego i do budowy programów off-line. Podobne cechy, dla manipulatorów o 3-ciu stopniach swobody mają systemy opisane w pracach /83/ i /84/. Studium, przedstawione w pracy /85/ dotyczy zagadnienia budowy symulatora ruchów dla robotów współpracujących ze sobą. Symulator pokazuje działanie robotów w kolejnych odcinkach czasu. Także współpracy dwóch robotów na stanowisku ze wspólnym sterowaniem poświęcona jest praca /86/. System oparty jest na modelu kinematycznym robota.

3.7.1. Możliwości grafiki komputerowej w zadaniu wizualizacji działania robota na stanowisku.

Symulatory robota, systemy do programowania off-line oraz systemy modelowania i symulacji są wyposażone zazwyczaj w grafikę, umożliwiającą wizualizację położenia robota w kolejnych chwilach czasu. Dla zobrazowania aktualnych możliwości systemów graficznych w DODATKU zamieszczono ilustracje, zaczerpnięte z prac /78/, /80/, /82/, /83/, /84/ a będące fotografiami ekranu monitora lub obrazami z monitora przeniesionymi przez drukarki graficzne.

4. OGOLNA CHARAKTERYSTYKA OMAWIANYCH PRAC =====

We WPROWADZENIU próbowano określić, jak będzie się rozumiąło w tej pracy "komputerowe wspomaganie projektowania" - sprowadzało się to do uczynienia przedmiotem zainteresowania modeli kinematyki i dynamiki części manipulacyjnej robota wraz z układami sterowania jak również tych systemów oprogramowania, gdzie takie modele są używane jako elementy składowe. Oznacza to m.in. pominięcie wielu wysoko zmatematyzowanych dziedzin robotyki, w których użycie komputera do obliczeń jest czymś oczywistym. Tytułem przykładu wymienić można modelowanie i symulacje układów sensorycznych oraz różne zagadnienia związane z teleoperatorami.

Podstawowym rysem, widocznym w przeglądzie prac, jest wzrost roli i znaczenia eksperymentów symulacyjnych. Ma to między innymi wyraz ilościowy: o ile w połowie lat 70-tych ukazywało się na świecie rocznie kilka - kilkanaście prac z tej dziedziny, a w końcu dekady odpowiednia liczba wynosiła 20-40 prac, to obecnie liczba ta uległa podwojeniu /bierze się tu pod uwagę prace w obiegu międzynarodowym/. Również rozkład "geograficzny" jest znamieny: najwięcej prac pochodzi z Japonii a dalej USA i rozwiniętych krajów Zachodu. Zakres zastosowań modeli jest bardzo szeroki: wybór, opracowanie i korekta struktury kinematycznej, badanie właściwości dynamicznych, synteza i optymalizacja układów regulacji, dobór napędów, systemy służące do oprogramowania off-line, badania

możliwości wykonania ruchu, detekcji kolizji na stanowisku roboczym, wizualizacji działania robota oraz kilku robotów współdziałających - to tylko główne dziedziny. Warto też odnotować, że wielu autorów uważa, iż w szerokiej klasie zagadnień wystarcza do ich rozstrzygnięcia sam eksperyment symulacyjny, tj. nie poparty równoległymi badaniami obiektu rzeczywistego - oczywiście pod warunkiem oparcia modelu o dobrą znajomość obiektu i odpowiednie doświadczenie autora w dziedzinie modelowania i symulacji. Innym interesującym rysem modelowania i symulacji w robotyce jest występująca niekiedy tożsamość narzędzia symulacji i modelowanego obiektu: użyty do obliczeń mikrokomputer jest zbudowany z takich samych mikroprocesorów co układ sterowania w robocie. Ma to konsekwencje w postaci możliwości prowadzenia symulacji on-line.

Kolejna cecha omawianych prac warta uwypuklenia to wzrost znaczenia rozbudowanych modeli, czyli symulatorów robota. Trzeba jednak przypomnieć, że takie rozbudowane symulatory powstają tam, gdzie są wystarczająco rozległe doświadczenia i dorobek w tej dziedzinie.

Stosunkowo trudno jest określić wymagania sprzętowe, związane z zadaniem modelowania i symulacji: zazwyczaj autorzy używają takiego sprzętu, jaki mają do dyspozycji; najczęściej są to różne odmiany komputerów DEC/VAX. Jednak w związku z szybkim rozwojem wydajnych obliczeniowo algorytmów są podstawy by przypuszczać, że sprzęt klasy IBM XT lub AT byłby wystarczający.

5. PODSUMOWANIE

=====

Dla umożliwienia użytkownikowi tej pracy wyrobienia sobie przy czytaniu własnego poglądu, najistotniejsze jej tezy podano już we WPROWADZENIU: przy opracowywaniu nowej konstrukcji robota model kinematyki i dynamiki musi powstać, jego powstanie powinno poprzedzić powstanie obiektu, korzyści z modelu można i należy czerpać we wszystkich fazach opracowywania robota, aż do aplikacji włącznie. Aby z tych stwierdzeń można wysunąć propozycję odnośnie ukierunkowania tej tematyki w Instytucie uzupełnimy je następującymi uwagami:

- bardzo ograniczone, albo wręcz żadne, są możliwości zakupu gotowych pakietów oprogramowania, i to nie z powodu niedostępności odpowiednich propozycji na rynku, tylko ze względów merytorycznych. Tworzenie i wstępna eksploatacja modelu jest fazą, w której zarówno modelujący jak i współpracujący z nim konstruktor poznają właściwości dynamiczne obiektu, co jest im niezbędne przy dalszej eksploatacji modelu. Model powinien powstawać w warunkach stałego "sprzężenia" z jego użytkownikiem - przyjęcie tej zasady przynosi korzyści w każdej dziedzinie, w której stosuje się modelowanie i symulację, nie jest to specyfika robotyki.

- z tych samych względów należy dążyć do tego, aby większość działań w dziedzinie modelowania była podejmowana w Instytucie, a nie zlecana na zewnątrz

- ze względu na bardzo szybki rozwój omawianej dziedziny konieczne jest zapewnienie sobie dostępu do bieżącej li-

teratury przedmiotu. Nie można akceptować sytuacji, w której zapoznanie się z materiałami z JSIR-u, ICAR-u, czy kongresu ITAC zależy od dobrej woli prywatnych posiadaczy, a wiele opracowań dociera w praktyce z 2-3 letnim opóźnieniem.

6. BIBLIOGRAFIA

=====

- ^x/1/ Vukobratović M., Potkonjak V.: "Dynamics of Manipulation Robots. Theory and Application". Springer-Verlag 1982
- ^x/2/ Vukobratović M., Stokić D.: "Control of Manipulation Robots. Theory and Application". Springer-Verlag 1982
- /3/ Paul R.P.: "Robot manipulators: Mathematics, Programming and Control". MIT Press, 1981
- ^x/4/ Guzowski M.: "Modelowanie komputerowe robotów przemysłowych". II seminarium IMP z zakresu Robotów Przemysłowych. W-wa 25-26.10.1983 s. 45-47
- ^x/5/ Inoue T., Paniguchi S., Goto A.: "High Performance Spray Painting Robot". The 15th Symposium on Industrial Robots. 11-13 September 1985, Tokyo, Japan SS.231-238
- ^x/6/ Mergler H.W.: "A Focused Bibliography on Robotics". IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. IE-30, nr 3, August 1983, s.s. 178-243.
- ^x/7/ Computer and Control Abstracts. Science Abstracts Series C. 1982, 1983, 1984
- /8/ The 15th Symposium on Industrial Robots. 11-13 September 1985. Tokyo, Japan.

UWAGA:

Znakiem x zaznaczono prace, będące w posiadaniu autora opracowania

- Industrial
- /9/ The 14th Symposium on ~~International~~ Robots and 7th International Conference on Industrial Robot Technology. October 2-4, 1984, Gothenburg, Sweden.
- /10/ Fifth CISM-JFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. RO.MAN.SY'84. Preprints. June 26-29, 1984, Udine, Italy. ZGPN 1984
- ^x/11/ Fourth CISM-JFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. RO.MAN.SY'81. September 8-12, 1981. Zaborów, Poland. PWN W-wa 1983
- /12/ International Conference on Advanced Robotics. 1985 JCRR. September 9-10, 1985, Tokyo, Japan
- ^x/13/ Advanced Software in Robotics. Proceedings of an International Meeting in Liege, Belgium, May 4-6, 1983. Ed. by Lanthine A., Gevadin M., Elsevier 1984
- ^x/14/ 3 rd Seminar on Industrial Robots. Győr, 6-8 June, 1984, Hungary.
- /15/ Referaty II Seminarium IMP z zakresu Robotów Przemysłowych. W-wa 25-26 październik 1983
- /16/ Referaty III Seminarium IMP z zakresu Robotów Przemysłowych. W-wa 15-16 październik 1985
- ^x/17/ I Krajowa konferencja robotyki. Tom 2 - Mechanika i sterowanie robotów. Wrocław 18-20 września 1985, Wyd.Pol.Wrocł., Wrocław 1985.

- ^x/18/ Lee G.C.S.: "Robot Arm Kinematics, Dynamics and Control" IEEE Computer Magazine, Dec. 1982 ss. 62-80
- /19/ Denavit J., Hartenberg R.S.: "A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices" Trans. of ASME Journal of Applied Mechanics, June 1955 ss. 215 - 221.
- ^x/20/ Gutkowski J.: "Modele dynamiczne manipulatorów oparte o kinetostatykę mechanizmów". II Seminarium z zakresu Robotów Przemysłowych. W-wa 25-26.10.1983 ss. 48-50.
- ^x/21/ De Maria G., Sciavicco L., Siciliano B.: "A General Solution Algorithm to Coordinate Transformation for Robotic Manipulators". International Conference on Advanced Robotics. September 9,10.1985, Tokyo, Japan, ss. 251-258.
- ^x/22/ De Maria G., Marino R.: "A Discrete Algorithm for Solving the Inverse Kinematic Problem of Robotic Manipulators". International Conference on Advanced Robotics. September 9.10.1985 r. Tokyo, Japan. ss. 275-282.
- ^x/23/ Schmidt V., Ameling W.: "A Special Purpose Module for Coordinate Transformation". The 15th Symposium on Industrial Robots. 11-13 September 1985, Tokyo, Japan. ss. 1075-1082.
- ^x/24/ Takano M., Yashima K., Toyama S.: "A new method of solution of synthesis of a robot and its application to computer simulation system". The 14th Symposium on Industrial Robots and 7th International Conference on Industrial Robot Technology. October 2+4, 1984, Gothenburg, Sweden, ss. 261-268.
- ^x/25/ Van Aken L., Van Brussel H.: "Software for solving the inverse kinematic problem for robot manipulators in real time". Advanced Software in Robotics. Proc. of an International Meeting in Liege, Belgium, May 4+6, 1983. ss. 159-174.
- ^x/26/ Sol E.J., Valdepaus F.E., Janssen J.D.: "Tools for modeling the kinematics of multi-body systems". Advanced Software in Robotics. Proc. of an International Meeting in Liege, Belgium, May 4+6, 1983, ss. 15-23.

- X/27/ Grin D.E., Mc Ghee R.B.: "Dynamic Computer Simulation of Robotic Mechanisms". Fourth CISM-JFToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. RO.MAN.SY'81. September 8-12, 1981. Zaborów, Poland, ss. 286-296.
- X/28/ Cetković V., Vukobratović M.: "Computer-Oriented Algorithms for Modeling Active Spatial Mechanisms for Robotic Applications". IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics vol. SMC-12, nr 6, November/December 1982, ss. 838-847.
- X/29/ Huston R.L., Kelly F.A.: "The Development of Equations of Motion of Single - Arm Robots". IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol. SMC-12, nr 3, May/June 1982, ss. 259-266.
- X/30/ Kane T.R., Faessler H.: "Dynamics of Robots and Manipulators Involving Closed Loops". Fifth CISM-JFToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. RO.MAN.SY'84. June 26-29, 1984. Udine, Italy, ss. 75-83.
- X/31/ Khalil W., Gautier M.: "On the derivation of the dynamics models of robots". International Conference on Advanced Robotics. September 9, 10, 1985, Tokyo, Japan, ss. 243-250.
- X/32/ Gutkowski J.: "Modele dynamiczne manipulatorów oparte o kinetostatykę mechanizmów". II Seminarium z zakresu Robotów Przemysłowych, W-wa 25-26.10.1983, ss. 43-50.
- X/33/ Truckenbrodt A.: "Modelling and Control of Flexible Manipulator Structures". Fourth CISM-JFToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. RO.MAN.SY'81. September 8-12, 1981, Zaborów, Poland, ss. 90-101.
- X/34/ Geradin M., Robert G., Bernardin C.: "Dynamic Modelling of Manipulators with Flexible Members". Advanced Software in Robotics. Proc. of an International Meeting in Liege, Belgium, May 4-6, 1983, ss. 27-39.
- X/35/ Fręczek J.: "Analiza dynamiki robota z członami podatnymi". I Krajowa konferencja robotyki. Wrocław, 18-20 września 1985. Tom 2, ss. 3-5.

- ^x/36/ Vukobratović M., Potkonjak V.: "Čislennyj metod modelirovanija dinamiki manipulatora s uprugimi svojstvami". Tehničeskaja Kibernetika 1981, nr 5, ss. 131-141.
- ^x/37/ Powell I.L.: "The Kinematic Analysis and Simulation of the Parallel Topology Manipulator". The Marconi Review, vol. XLV, nr 226, ss. 121-138.
- ^x/38/ Rovetta A., Frosi G.: "Application for Handling of a Robot with Redundant Degrees of Freedom with Self-Regulating Hand and a Vision-Sonar System". The 15th Symposium on Industrial Robots. 11-13 September 1985, Tokyo, Japan, ss. 121-128.
- ^x/39/ Vukobratović M., Kirčanski M.: "One Method for Simplified Manipulator Model Construction and its Application in Quasioptimal Trajectory Synthesis". Mechanism and Machine Theory. vol. 17 nr 6, 1982, ss. 369-378.
- ^x/40/ Vukobratović M., Kirčanski M.: "Computer Assisted Sensivity Model Generation in Manipulation Robots Dynamics". Mechanism and Machine Theory. vol. 19, nr 2, 1984, ss. 223-233.
- ^x/41/ Potkonjak V., Vukobratović M.: "Computer - Aided Design of Manipulation Robots via Multi - Parameter Optimization". Mechanism and Machine Theory. vol. 18, nr 6, 1983, ss. 431-438.
- ^x/42/ Vukobratović M., Potkonjak V., Hristić L.: "Contribution to the Computer - Aided Design of Industrial Manipulators". Fourth CISM-JFTOM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators RO.MAN.SY'81 September 8-12, 1981, Zabrze, Poland, ss. 170-181.
- ^x/43/ Bazerghi A., Goldenberg A.A., Apkarian J.: "An Exact Kinematic Model of PUMA-600 Manipulator". Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. SMC-14, nr 3, May/June 1984, ss. 483-487.

- ^x/44/ Walker M.W., Orin D.E.: "Efficient Dynamic Computer Simulation of Robotic Mechanisms". Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control, vol. 104, September 1982, ss. 205-211.
- ^x/45/ Granicki J.: "Analiza dynamiki ruchu robota przemysłowego" I Krajowa konferencja robotyki. Wrocław, 18-20 września 1985, Tom 2, ss. 15-22.
- ^x/46/ Knapczyk J., Morecki A., Hipp R.: "Analiza dokładności pozycjonowania i orientacji manipulatorów z sześcioma parami obrotowymi". I Krajowa konferencja robotyki. Wrocław, 18-20 września 1985, Tom 2, ss. 31-40.
- ^x/47/ Rogowski Z., Guzowski M.: "Rozwiązanie równań kinematyki robota RIMP-1000" I Krajowa konferencja robotyki. Wrocław, 18-20 września 1985, Tom 2, ss. 86-94.
- ^x/48/ Rogowski Z., Guzowski M., Królik K.: "Model kinematyczny robota przemysłowego RIMP-1000". III Seminarium IMP z zakresu Robotów Przemysłowych. W-wa 15-16 październik 1985.
- ^x/49/ Gosiewski A., Wieczorek W.: "Interakcje dynamiczne w robocie IRb". I Krajowa konferencja robotyki. Wrocław 18-20 września 1985, Tom 2, ss. 159-170
- /50/ Gosiewski A. i inni: "Zbadanie właściwości dynamicznych oraz projektu regulacji nadążnej dla robotów IRb-6 i IRb-60". Opracowanie Instytutu Automatyki PA, W-wa, grudzień 1984, Etap I.
- ^x/51/ Vukobratović M., Potkonjak V., Katič D.: "Computer-Aided Choice of Electro-Hydraulic Actuators for Manipulation Robots". The 14th Symposium on Industrial Robots and 7th International Conference on Industrial Robot Technology. October 2-4, 1984, Gothenburg, Sweden, ss. 711-721.
- ^x/52/ Desoyer H., Hopacek P., Troch I.: "Simulation of an Elektropneumatic Drive for Industrial Robots". Simulation in Engineering Sciences. 1983, ss. 417-421.

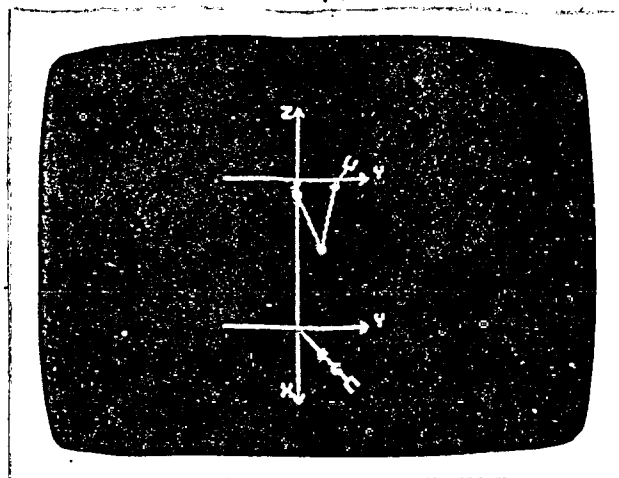
- X/53/ Csernyánszky J.: "A Simulation Model for Computer Aided Design of Pneumatic Linear Robot Drives" 3 rd Seminar on Industrial Robots. Győr, 6-8 June, 1984, Hungary, ss. 107-120.
- X/54/ Bachtin M., Jabłkowski J., Płaskowski W.: "Dynamika napędu pneumatycznego robota przemysłowego PR-02". Biuletyn MERA-PIAP nr 2/97, ss. 27-37.
- X/55/ Jabłkowski J., Bachtin M.: "Multicriterion Optimization of Dampers of Pneumatically Driven Robot". 3 rd Seminar on Industrial Robots. Győr, 6-8 June 1984, Hungary, ss. 87-95.
- X/56/ Strulak M., Malinowski K., Nowosad K.: "Metody projektowania regulatorów dla robotów przemysłowych". II Seminarium IAP z zakresu Robotów Przemysłowych. W-wa 25-26.10. 1983, ss. 63-68.
- X/57/ Kasiński A.: "Zagadnienia nieliniowej kompensacji zakłóceń działających na ramię robota w stanach dynamicznych". I Krajowa konferencja robotyki. Wrocław, 18-20 września 1985. Tom 2, ss. 195-202.
- X/58/ Krut'ko P.D., Popov E.P.: "Upravlenie dviženiem manipulacionnyh robotov na osnove kinematicheskikh algoritmov vtorogo porjádka". Techničeskaja Kibernetika 1981, nr 6, ss. 111-120.
- X/59/ Krut'ko P.D., Lakota N.A.: "Konstruirovanie algoritmov upravlenija dviženiem manipulacionnyh robotov na osnove rešenija obratnoj zadači dinamiki". Techničeskaja Kibernetika 1981, nr 1, ss. 52-58.
- X/60/ Malinowski K., Masłowski P.: "Adaptacyjne układy sterowania ruchem robotów". I Konferencja krajowa robotyki. Wrocław 18-20 wrzesień 1985, ss. 209-218.
- X/61/ Dubowsky S.: "On the Dynamics of Computer Controlled Robotic Manipulators". Fourth CISM-JFTOMI Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. RO.MAN.SY.'81. September 8-12 1981, Zaborów, Poland, ss. 65-76.

- ^{II}/62/ Kubo K., Ohame: "Adaptive Trajectory Control of Industrial Robots". The 15th International Symposium on Industrial Robots. 11-12 September 1985. Tokyo, Japan. ss. 681-688.
- ^X/63/ Liu M.H.: "An Adaptive Control Scheme for Robotic Manipulators". The 15th International Symposium on Industrial Robots. 11-13 September 1985. Tokyo, Japan. ss. 673-680.
- ^X/64/ Zhigang Q., Lin W., Dinghua Ch.: "A new Approach for Interpolating Curves for Trajectory Control of Arc Welding Robots". The 15th International Symposium on Industrial Robots. 11-13 September 1985. Tokyo, Japan, ss. 921-926.
- ^X/65/ Choi Y.K. i in.: "An Adaptive regulation scheme for manipulators". International Conference on Advanced Robotics. September 9,10, 1985. Tokyo, Japan ss. 259-266.
- ^X/66/ Arai T., Nakano E.: "Bilateral Control System for Manipulators with Completely Different Configurations". International Conference on Advanced Robotics. September 9,10. 1985. Tokyo, Japan. ss. 303-310.
- ^{II}/67/ Cepolina R.M., Accaccia G.M., Taddei M.C.: "Development and Experimentation of a High Accuracy Position Control for Service Manipulators". Fourth CISM - JFTOLM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. RO.MAN.SY'81. September 8-12, 1981. Zaborów, Poland. ss. 102-119.
- ^X/68/ Staszulonek A.: "Algorytm poślizgowego sterowania robotem przemysłowym". I Krajowa konferencja robotyki, Wrocław, 18-20 września 1985. ss. 225-232.
- ^X/69/ Harashima F. i in.: "Tracking Control of Robot Manipulator Using Sliding Mode". The 15th International Symposium on Industrial Robots. 11-13 September 1985. Tokyo, Japan, ss. 657-664.
- ^{II}/70/ Yosuge K., Furata K.: "Variable Structure Control of Robot Arm". The 15th International Symposium on Industrial Robot 11-13 September 1985, Tokyo, Japan, ss. 633-640.

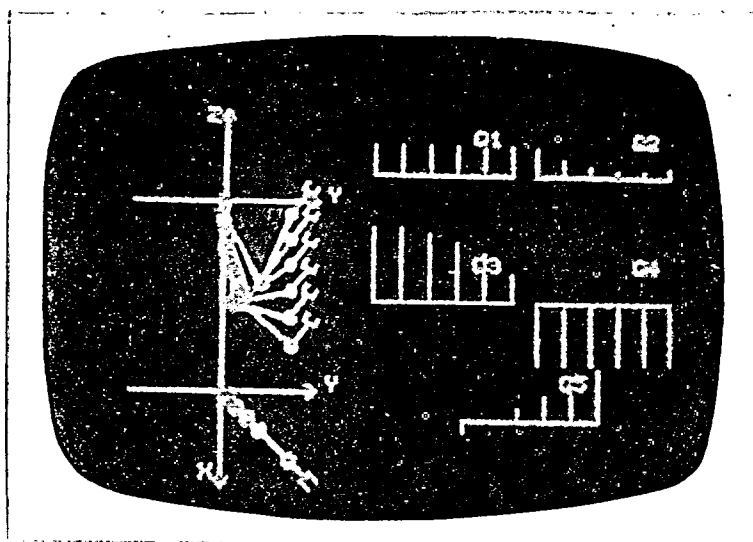
- ^x/71/ Strulak M., Malinowski K., Nowosad K.: "Algorytm sterowania robota RIMP-900". III Seminarium IMP z zakresu Robotów Przemysłowych. W-wa 15-16 październik 1985.
- ^x/72/ Vukobratovic M., Stokic D., Kircanski M.: "A procedure for interactive dynamic control synthesis of manipulators". Fourth CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. RO.MAN.SY'81. September 8-12, 1981, Zaborów, Poland. ss. 77-89.
- ^x/73/ Vukobratovic M., Hristic D., Stokic D.: "Dynamic control of industrial manipulators". The Industrial Robot, vol. 8 nr 2, June 1981.
- ^x/74/ Byung K.K., Kang G.S.: "An Adaptive Model Following Control of Industrial Manipulators". JEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. Vol. AES-19, nr 6, November 1983, ss. 805-813.
- ^x/75/ Dubovsky S., Shiller Z.: "Optimal dynamic trajectories for robotic manipulators". Fifth CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. RO.MAN.SY'84. June 26-29, 1984. Udine, Italy.
- ^x/76/ Vukobratovic M., Cvetkovic V.: "Manipulation robots: computer aided design and control synthesis". Mathematics and Computer in Simulation, nr 4, June, 1982. ss. 292-302.
- ^x/77/ Takano M., Yashima K., Yada S.: "Development of Computer Simulation System of Kinematics and Dynamics of Robot". Journal of the Faculty of Engineering. Vol. 36., nr 4, 1982, ss. 677-711.
- ^x/78/ Toyama S., Takano M.: "Development of Simulation System of Robot Motion". International Conference on Advanced Robotics. 1985.
- ^x/79/ Chang K., Isomura T., Funakubo H.: "The development of a system to assist in the design and control of robots". The 14th Symposium on Industrial Robots and 7th International Conference on Industrial Robot Technology. October 2-4, 1984, Gothenburg, Sweden, ss. 723-732.

- ^x/80/ Cheng Jun-shi, Xie Qing-xian: "Computer Simulation and 2 - Dimensional Display of Manipulator". The 15th International Symposium on Industrial Robots. 11-13 september 1985. Tokyo, Japan, ss. 751-758.
- ^x/81/ Brantmark H., Ramstrom K.G.: "Asea off-LINE Programming System a User Friendly Implement". The 15th International Symposium on Industrial Robots. 11-13 September 1985. Tokyo, Japan, ss. 741-749.
- ^x/82/ Soland E.J., Brock J.A.: "Progress in CAD - tools for robot based flexible automation systems". The 14th Symposium on Industrial Robots and 7th International Conference on Industrial Robot Technology. October 2-4, 1984. Gothenburg, Sweden. ss. 701-710.
- ^x/83/ Hasegawa T.: "Collision Avoidance Using Characterized Description of Free Space". International Conference on Advanced Robotics. 1985 ICAR. September 9,10, 1985, Tokyo, Japan, ss. 69-76.
- ^x/84/ Kawabe S. i in.: "Interactive Graphic Programming for Industrial Robots". The 15th International Symposium on Industrial Robots. 11-13 September 1985, Tokyo, Japan, ss. 699-706.
- ^x/85/ Kakazu Y. i in.: "A Study on Cooperative Robot Motion Simulator". The 15th International Symposium on Industrial Robots. 11-13 September 1985, Tokyo, Japan, ss. 691-698.
- ^x/86/ Dauchez P., Zapata R.: "Co-ordinated control of two cooperative manipulators: the use of a kinematic model". The 15th International Symposium on Industrial Robots. 11-13 September 1985. Tokyo, Japan, ss. 641-648.

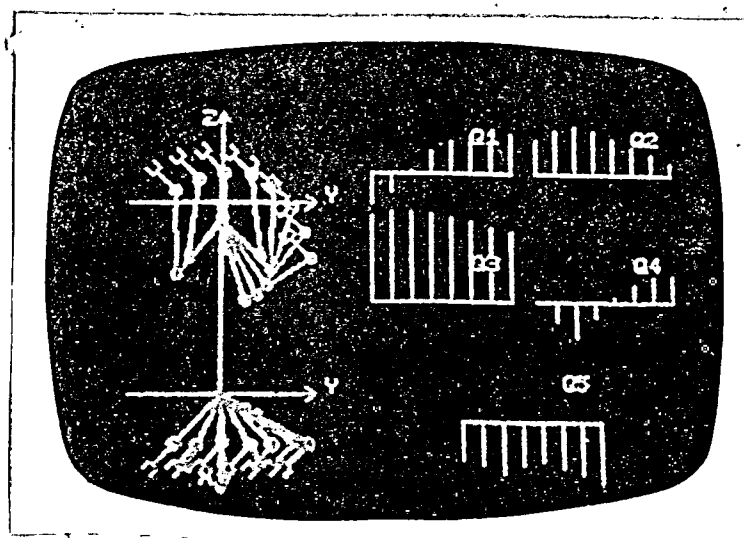
7. DODATEK



a/



b/



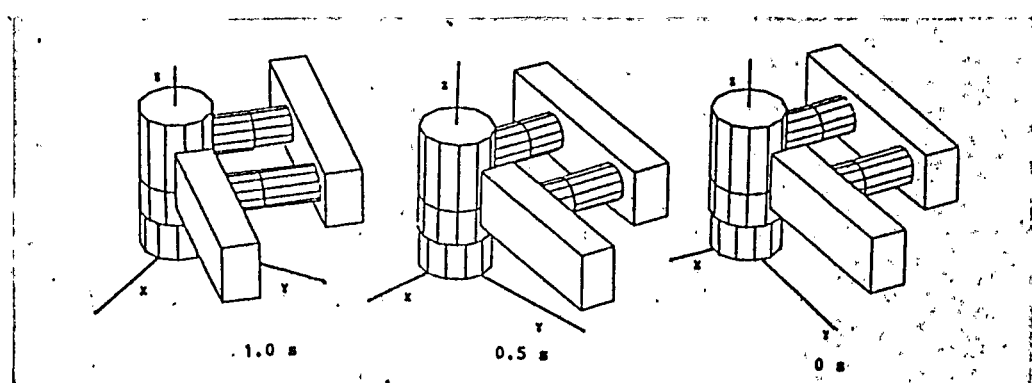
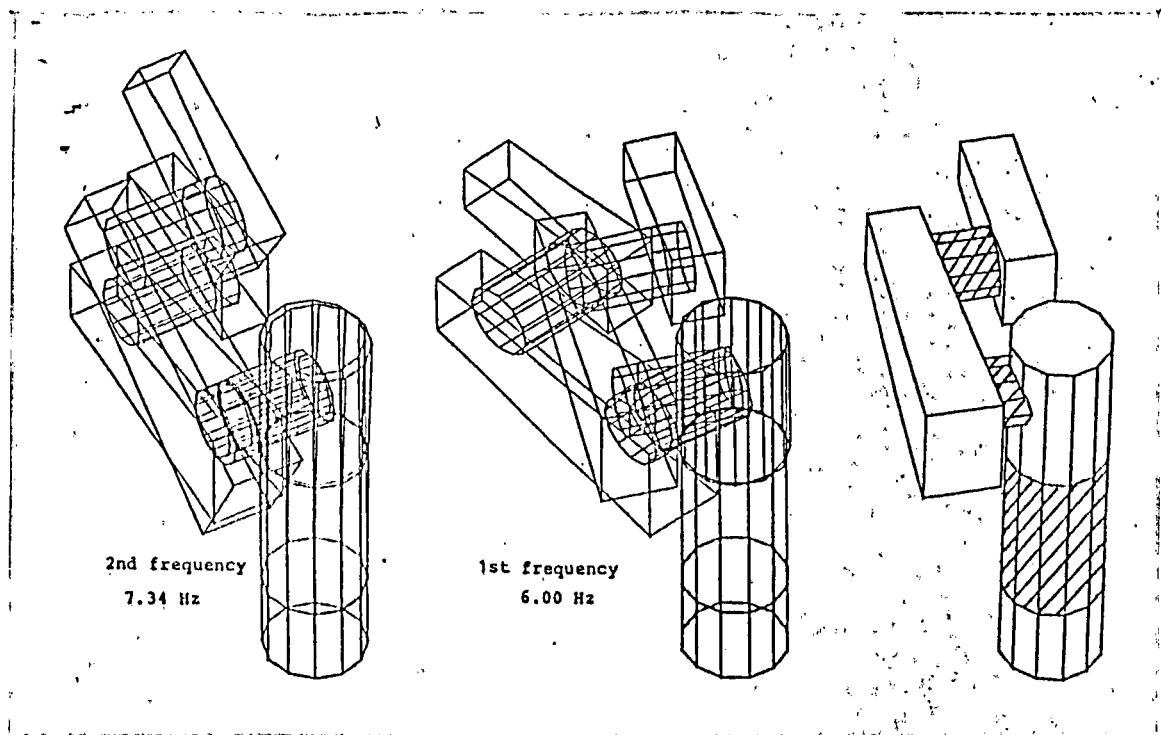
c/

a/ dwuwymiarowy obraz części manipulacyjnej w dwóch płaszczyznach

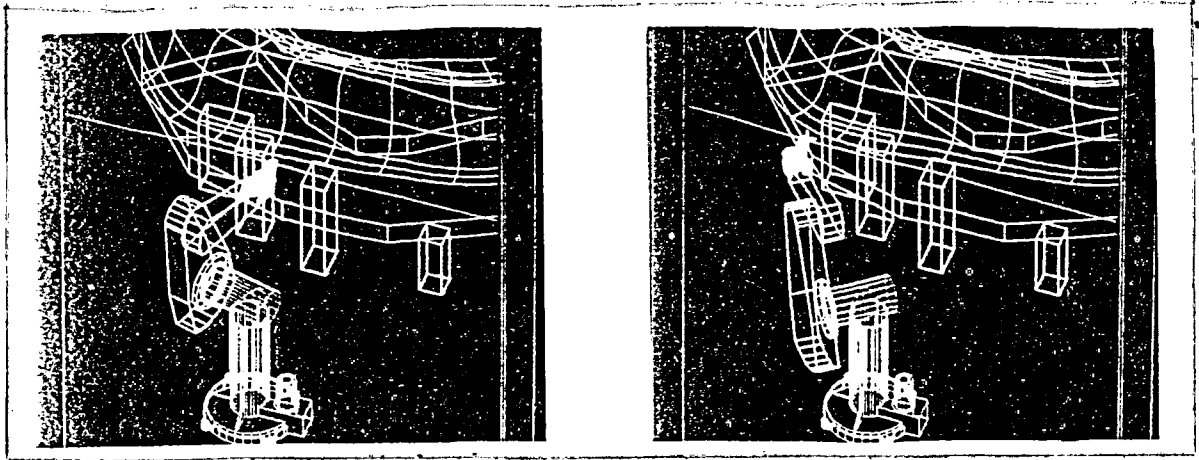
b/ przejście po prostej

c/ przejście po łuku

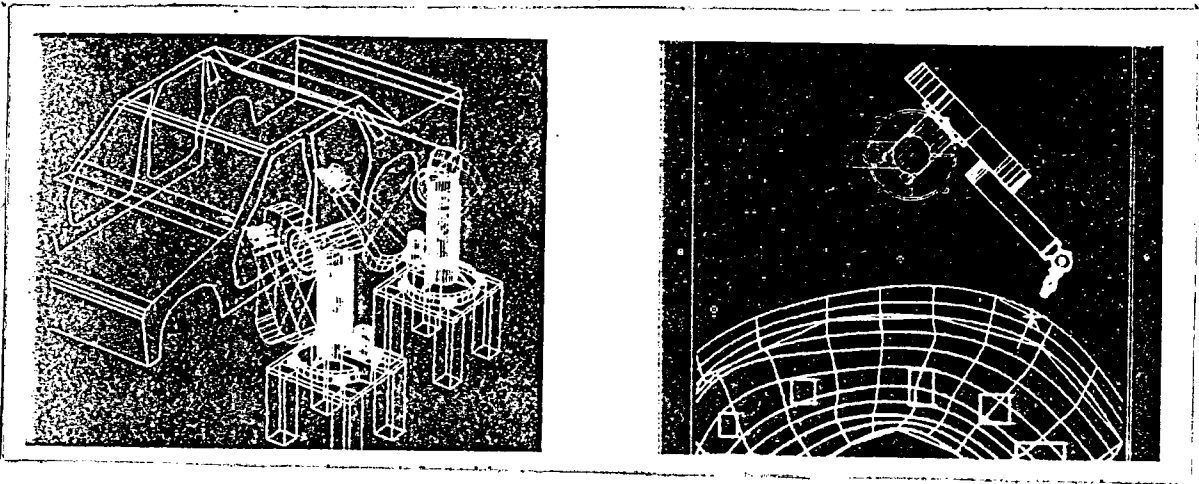
Zaczępnęto z pracy /80/.



Wizualizacja modelu robota z członami podatnymi.
Zaczerpnięto z pracy /78/.



a/



b/

c/

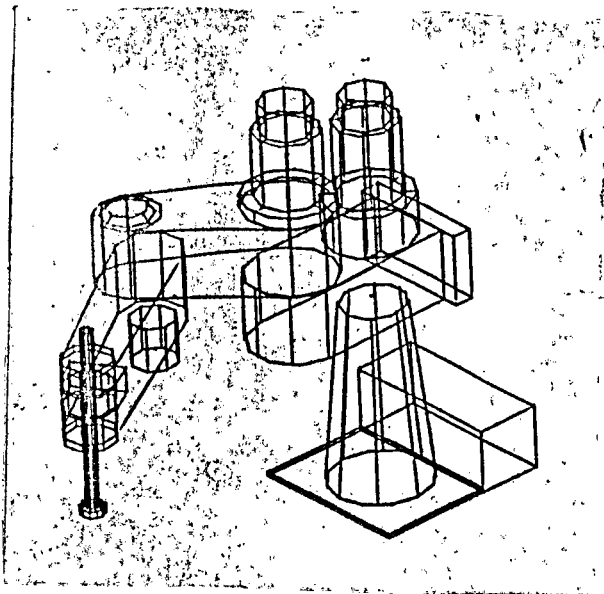
Przykład wizualizacji w systemie służącym detekcji kolizji.

a/ ruch wokół osi X we współrzędnych naturalnych

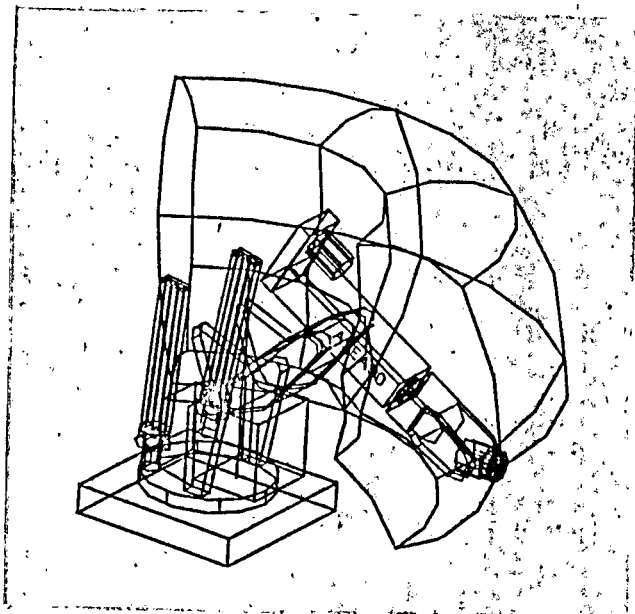
b/ współdziałanie dwóch robotów

c/ programowanie dla potrzeb zgrzewania punktowego

Zaczerpnięto z pracy /84/.

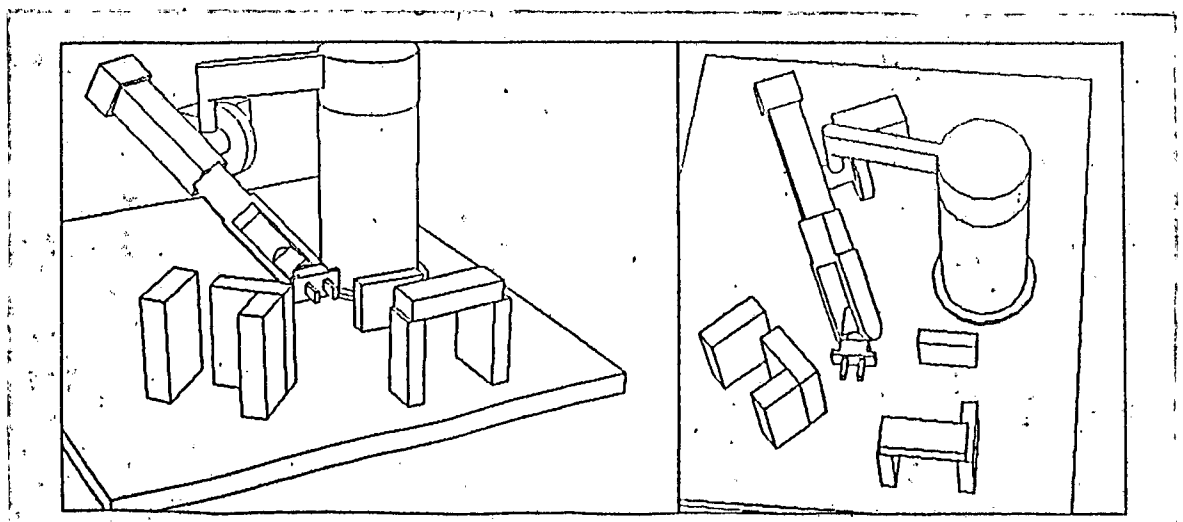
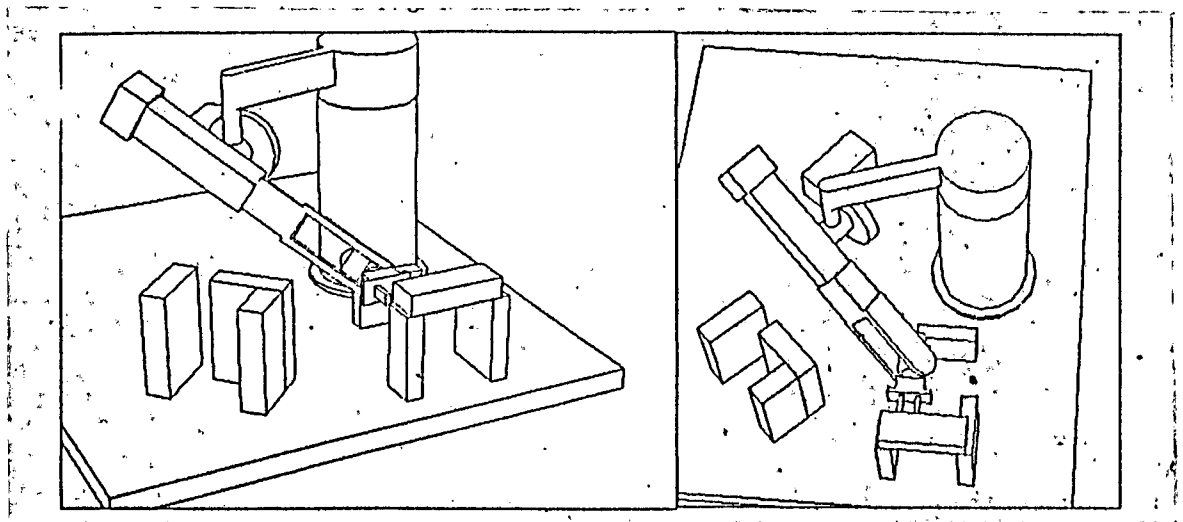
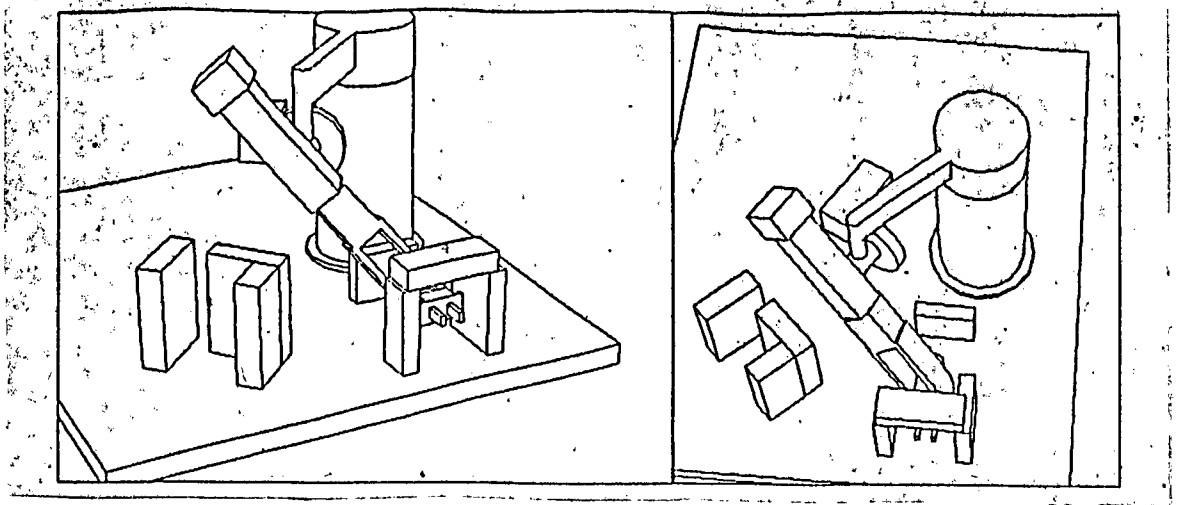


a/

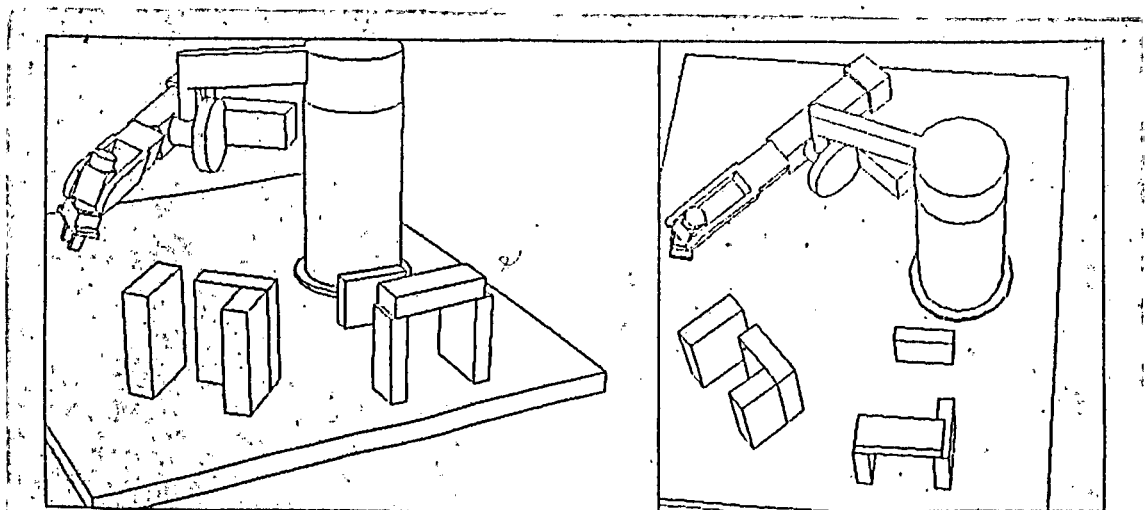
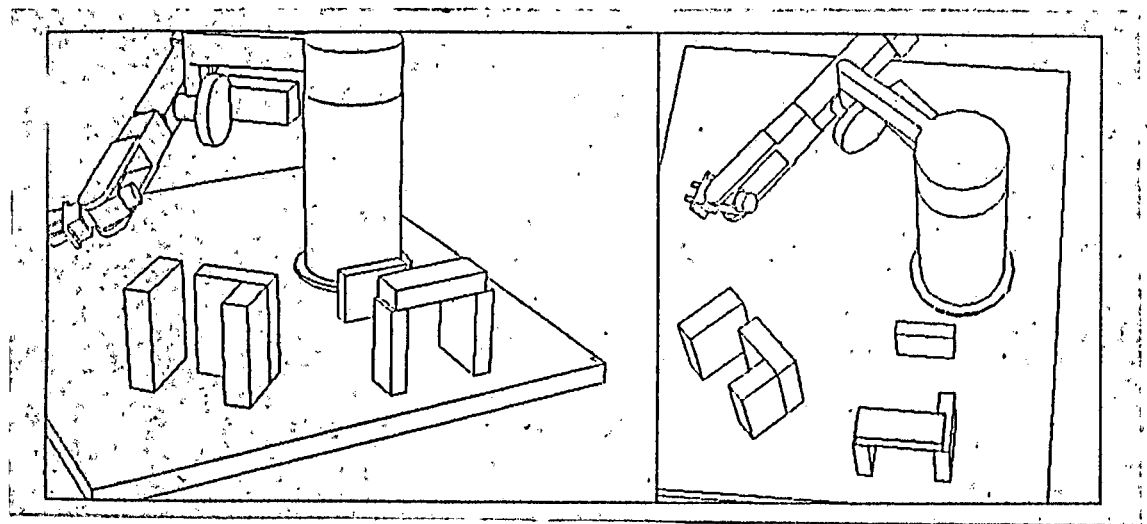
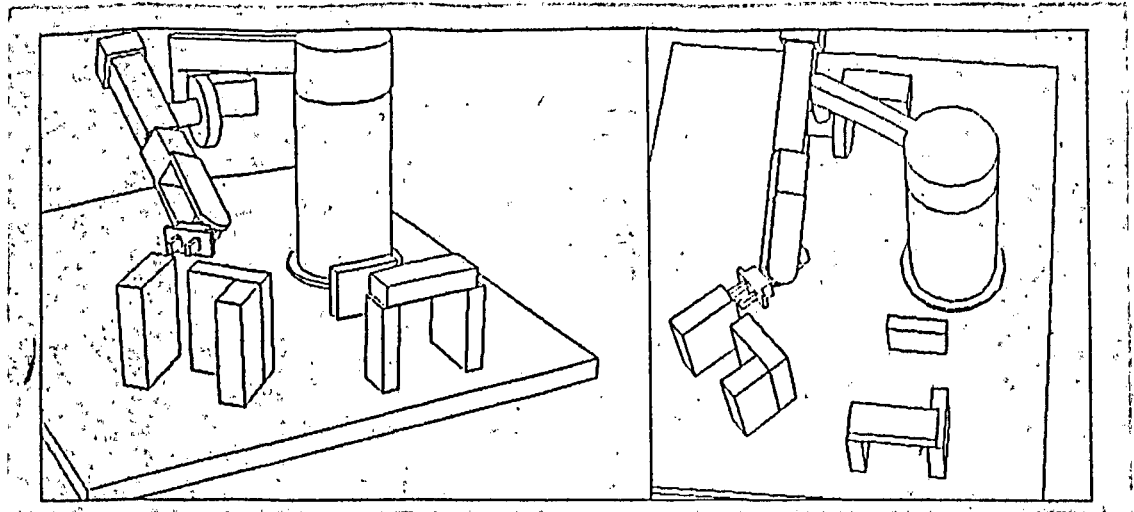


b/

a/ wizualizacja struktury części manipulacyjnej robota SACRA
b/ wizualizacja robota ASEA IRb-90 i części przestrzeni pracy
Zaczerpnięto z pracy /82/.



Wizualizacja detekcji kolizji dla robota ETA-2.
Zaczerpnięto z pracy /83/.



Wizualizacja detekcji kolizji dla robota ETA-2, c.d.
Zaczerpnięto z pracy /83/.