

dr inż. Kazimierz Nazarczuk,
dr inż. Krzysztof Mianowski,
mgr inż. Marek Wojtyra
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej
Politechniki Warszawskiej

Szybki robot o nowej konstrukcji bez ograniczeń konfiguracji

Praca dotyczy nowego typu manipulatora bez ograniczeń zakresów ruchów w przegubach. Główne człony ramienia mające postać lekkich korb o konstrukcji powłokowej są łączone za pomocą pojedynczych łożysk krzyżoworolkowych. Trzy pierwsze stopnie swobody o osiach pionowych są napędzane przez silniki elektryczne bezpośredniego napędu zamontowane wspólnie na nieruchomej podstawie. Pierwszy człon jest napędzany bezpośrednio, a drugi i trzeci za pośrednictwem specjalnych równoległowodów ukośnych. Pozostałe stopnie swobody są napędzane w podobny sposób przez lekkie silniki z przekładniami zamontowane na trzecim członie. Przedstawiono założenia konstrukcyjne oraz wstępne wyniki badań doświadczalnych niektórych zespołów prototypu.

Fast robot without joint limits - a novelty in design

A novel type of modular manipulator without joint limits is presented in the paper. The main links of the arm in the form of light hollow cranks are connected one to the other by cross-roller bearings. Three first DOF's with vertical axes are driven by electric Direct Drive motors mounted coaxial on the base. The first link is driven directly, the second and third are driven remotely with using special parallelogram mechanisms. The other DOF's are driven in similar way by light motors with gears mounted on the third link. Computer and experimental aided design and initial tests of the prototype are described in the paper.

1 WSTĘP

W ostatnich latach prowadzi się prace badawcze dotyczące nowych aplikacji robotów. Wiele prac dotyczy robotyzacji montażu i paletyzacji, podejmowane są również próby wykorzystania robotów do laserowego gięcia, cięcia i spawania. Operacje te wymagają zapewnienia bardzo dużej dokładności realizacji trajektorii przy dużych prędkościach. Wymagana jest dokładność robota rzędu 0.01 mm przy prędkości elementu roboczego ok. 10 m/s, co jest możliwe do uzyskania tylko przy zastosowaniu najnowszych rozwiązań elektrycznego napędu bezpośredniego [1]. Zastosowanie w robocie elektrycznego napędu bezpośredniego tworzy nowe perspektywy ale i nowe problemy konstrukcyjne. Napęd taki zapewnia brak luzów i małe tarcie, co umożliwia wykorzystanie w układach sterowania dokładnych modeli dynamicznych. Równocześnie jednak między poszczególnymi stopniami

swobody manipulatora występują znacznie większe sprzężenia dynamiczne niż w przypadku tradycyjnego napędu wykorzystującego reduktory o dużym przełożeniu. Podejmowane są próby zmniejszania tych sprzężeń przez odpowiedni rozkład mas oraz zdalny napęd z wykorzystaniem równoległowodów. Typowym przykładem jest robot Adept One typu SCARA [1] z dwoma silnikami napędu bezpośredniego umieszczonymi na podstawie, przy czym pierwszy człon manipulatora jest napędzany bezpośrednio a drugi za pomocą taśmy stalowej spełniającej rolę równoległowodu. Takie rozwiązanie jak i również typowe równoległowody płaskie stosowane np. w robotach typu ASEA mają ograniczony zakres przenoszonych przemieszczeń kątowych do ok. 300°.

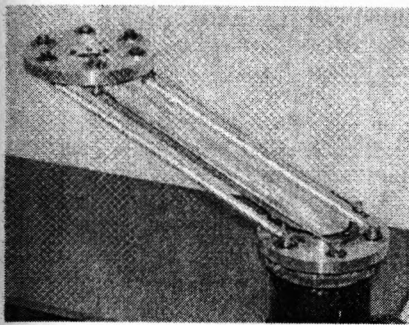
Zapewnienie nieograniczonych zakresów ruchów obrotowych w przegubach manipulatora pozwała na znaczne polepszenie własności manipulacyjnych i istotne rozszerzenie zakresu zastosowań [3, 5]. Dotychczas nieograniczone zakresy ruchów obrotowych spotyka się przede wszystkim w niektórych rozwiązaniach kiści robotów przemysłowych np. firmy Cincinnati-Milacron. Przykładem robota o sześciu stopniach swobody i nieograniczonych zakresach ruchów obrotowych we wszystkich przegubach jest TELBOT [10], w którym silniki napędowe są umieszczone na podstawie, a transmisja napędu odbywa się za pośrednictwem wałków i przekładni zębatach stożkowych. Manipulator ten nie ma żadnych ograniczeń konfiguracji, ale nie może wykonywać szybkich i dokładnych ruchów z uwagi na znaczne sprzężenia dynamiczne, małą sztywność konstrukcji oraz skomplikowany układ przenoszenia napędu zawierający 20 przekładni zębatach stożkowych.

W niniejszej pracy przedstawiono próbę opracowania i uruchomienia manipulatora bez ograniczeń konfiguracji, osiągającego w przegubach prędkości obrotowe powyżej 1 obr/s. w którym do przenoszenia napędu są wykorzystywane równoległowody ukośne. Mechanizmy tego typu są znane w literaturze anglojęzycznej jako *Parallel plate driver* lub *Parallel-link coupling* [2], a ich zastosowanie w manipulatorach było rozważane [6, 9]. Jednak dotychczasowe rozwiązania konstrukcyjne równoległowodów ukośnych nie zapewniały odpowiednich właściwości mechanicznych pozwalających na ich stosowanie w robotach z elektrycznym napędem bezpośrednim.

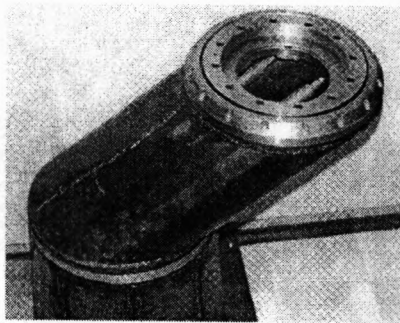
Prowadzone przez autorów wcześniejsze studia projektowe połączone z badaniami doświadczalnymi [4, 6, 8] doprowadziły do opracowania konstrukcji równoległowodu o wysokiej i praktycznie niezależnej od kąta obrotu sztywności i małej histerezie. Równocześnie powstała nowa koncepcja manipulatora bez ograniczeń konfiguracji o budowie modułowej przedstawiona w punkcie 2. Aktualny stan prac nad prototypem takiego manipulatora oraz wyniki wstępnych badań doświadczalnych podstawowych jego zespołów zostały przedstawione w punkcie 3.

2 PODSTAWOWE ELEMENTY KONSTRUKCYJNE I OGÓLNA KONCEPCJA MANIPULATORA

Równoległowod ukośny w wersji doświadczalnej jest przedstawiony na rys. 1a. Różni się on od typowych równoległowodów płaskich stosowanych np. w robotach IRb tym, że człony wejściowy i wyjściowy mające tu postać tarcz są usytuowane w dwóch różnych płaszczyznach prostopadłych do ich osi obrotu. Napęd jest przekazywany za pośrednictwem łączników, które podczas ruchu omijają się, dzięki czemu zapewniony jest zakres pełnego kąta obrotu. Z uproszczonej analizy kinetostatycznej wynika, że aby uniknąć konfiguracji osobliwych oraz zapewnić stałą, niezależną od kąta obrotu sztywność mechanizmu, wy-



a)



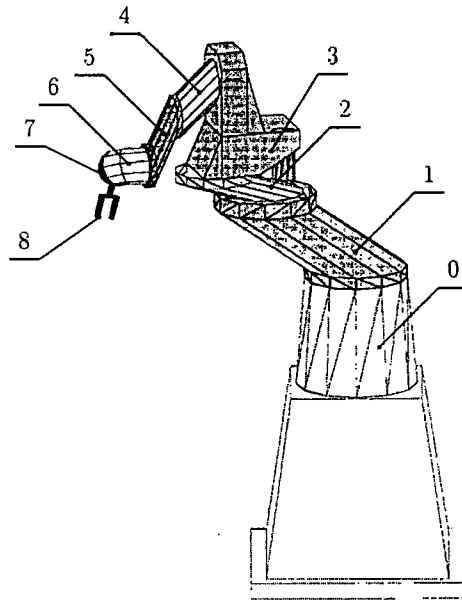
b)

Rys. 1. Przykładowe rozwiązania konstrukcyjne równoległowodów ukośnych: a) wersja doświadczalna umieszczona na zewnątrz ukośnej korby, b) wersja prototypowa z równoległowodem umieszczonym wewnątrz czlonu manipulatora o konstrukcji powłokowej.

starczy para identycznych łączników przesuniętych o 90° . Może być również stosowana dowolna większa liczba łączników równomiernie rozłożonych na obwodzie.

Doświadczalnie stwierdzono, że przy stosowaniu dwóch lub trzech łączników trudno jest zapewnić stałą, niezależną od kąta obrotu liniową sztywność mechanizmu. Wynika to stąd, że o własnościach mechanizmu decydują nieliniowości łożysk i zależność sił w łącznikach od kąta obrotu. Zmiany sztywności mechanizmu można zmniejszyć przez wprowadzenie naciągu wstępnego w łącznikach, jednak wówczas rośnie histereza wywołana tarcieniem w łożyskach głównych czlonu wejściowego i wyjściowego. Wydaje się, że radykalnym rozwiązaniem jest zastosowanie sześciu łączników, z których trzy identyczne mają przeciwny naciąg wstępny niż trzy pozostałe również identyczne, przy czym oba rodzaje łączników są rozłożone równomiernie na obwodzie na przemian. W takim rozwiązaniu siły wynikające z naciągów wstępnych w łącznikach oddziałując przez ich przeguby na tarcze, wzajemnie się kompensują i nie oddziałują na łożyska główne. W opracowanej wersji zapewniono możliwość regulacji naciągu łączników i eksperymentalnie wypróbowano procedurę optymalnego ich doboru w celu minimalizacji histerezy mechanicznej. Wymagania dotyczące sztywności zapewniono przez zastosowanie odpowiednich łożysk. Rozwiązanie takie wypróbowano z wynikiem pozytywnym.

Przykład typowego rozwiązania konstrukcyjnego układu napędowego dwóch pierwszych stopni swobody manipulatora o osiach pionowych z zastosowaniem opisanego powyżej równoległowodów przedstawiono na rys. 1b. Pierwszy czlon manipulatora ma tu postać korby o konstrukcji powłokowej, wewnątrz której usytuowany jest równoległowod ukośny napędu drugiego stopnia swobody. Kanał wewnątrz równoległowodów może być wykorzystany do prowadzenia różnych przewodów. Powłoka jest z obydwu stron zakończona kołnierzami służącymi do mocowania pojedynczych łożysk krzyżowo-rolkowych stanowiących przeguby między sąsiednimi członami. Stwierdzono, że taka powłoka mająca kształt dopasowany do równoległowodów jest bardzo lekka i ma dużą sztywność na skręcanie i zginanie. Dostrzeżono również możliwość zastosowania większej liczby równoległowodów ukośnych usytuowanych koncentrycznie na zewnątrz jak i wewnątrz powłoki i wykorzystywanych do napędu kolejnych stopni swobody. Stało się to punktem wyjścia do opracowania nowej koncepcji tzw. wielokorbowego manipulatora bez ograniczeń konfiguracji.

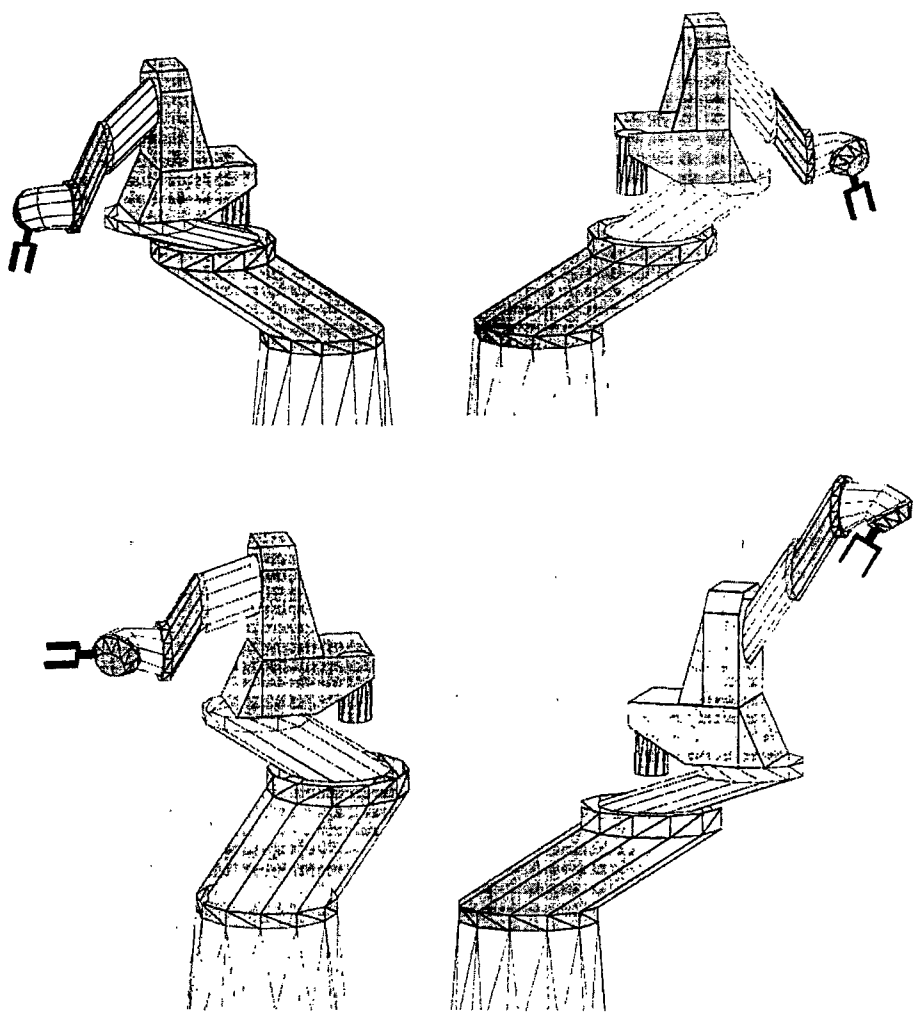


Rys. 2. Schemat ideowy manipulatora wielokorbowego o ośmiu stopniach swobody bez ograniczeń konfiguracji.

Sylwetkę i schemat ideowy takiego manipulatora o strukturze szeregowej ilustruje rys. 2. Główne człony ramienia mające postać lekkich korb o konstrukcji powłokowej są łączone za pomocą pojedynczych łożysk krzyżowo-rolkowych. Trzy pierwsze stopnie swobody o osiach pionowych są napędzane przez silniki elektryczne bezpośredniego napędu zamontowane wspólnie w nieruchomej podstawie. Pierwszy człon jest napędzany bezpośrednio, a drugi i trzeci za pośrednictwem równoległowodów ukośnych. Kolejne trzy stopnie swobody o osiach poziomych oraz dwa ostatnie należące do kiści sferycznej są napędzane w podobny sposób przez lekkie silniki z przekładniami zamontowane na trzecim członie. Zakres ruchu wykonywanego przez ten człon jest ograniczony do kilku obrotów ze względu na skręcanie kabli doprowadzonych do silników. We wszystkich pozostałych przegubach ruchy obrotowe są nieograniczone.

Ten redundantny manipulator ma prosty i dość szczególny schemat kinematyczny. Dzięki zastosowaniu równoległowodów nie występują tu niektóre sprzężenia kinematyczne. Po wyeliminowaniu dwóch stopni swobody na przykład przez zablokowanie wybranych przegubów lub usunięcie pewnych członów otrzymuje się zwykle manipulator nieredundantny, dla którego istnieje analityczne rozwiązanie odwrotnego zadania kinematyki.

Szczególnie interesujący jest manipulator o siedmiu stopniach swobody, w którym dwa sąsiednie człony tzn. 4 i 5 o tej samej długości, napędzane przez jeden silnik wyposażony w przekładnię z „rewersem” tworzą prostowód, który zapewnia pionowy ruch końcówki ramienia. Sprzężenie dynamiczne zrealizowanego w ten sposób czwartego stopnia swobody z



Rys. 3. Typowe konfiguracje manipulatora wielokorbowego o siedmiu stopniach swobody

trzema pierwszymi stopniami swobody jest bardzo małe. Przez odpowiednie rozmieszczenie silników napędowych na członie trzecim można również łatwo zapewnić jego odsprężenie dynamiczne od dwóch pierwszych stopni swobody. Po zahamowaniu (zablokowaniu) jednego z silników napędzających człony 1 lub 2 otrzymuje się manipulator o sześciu stopniach swobody z ramieniem odsprężonym dynamicznie, co znacznie ułatwia sterowanie szybkimi ruchami. Natomiast po zahamowaniu silnika 3 wyeliminowane są sprzężenia kinematyczne między kciścią a ramieniem, tzn. ruchy ramienia nie wywołują żadnych zmian orientacji członów 6, 7 i 8. Możliwy jest również wariant, w którym zahamowany jest silnik 7, a do sterowania orientacją wykorzystuje się m. in. silnik 3.

Manipulator wielokorbowy o siedmiu stopniach swobody ma przestrzeń roboczą w kształcie pełnego walca oraz bardzo dobre, zbliżone do izotropowych własności kinematyczne i dynamiczne w obszarze obejmującym ok. 70% tej przestrzeni. Na rys. 3 przedstawione są typowe konfiguracje takiego manipulatora

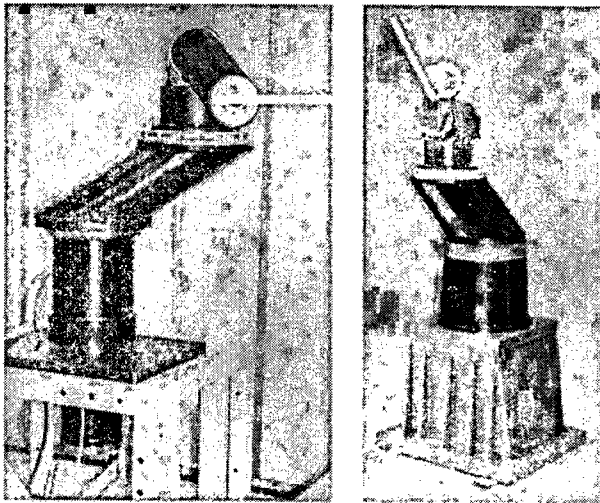
3 PROTOTYPOWE ROZWIĄZANIA NIEKTÓRYCH ZESPOŁÓW MANIPULATORA

Zrealizowano wstępną wersję doświadczalną trzech stopni swobody ramienia manipulatora z silnikami napędu bezpośredniego DYNASERV produkcji japońskiej. Jest ona przedstawiona na rys. 4. Dwa pierwsze stopnie swobody o osiach pionowych są napędzane przez silniki zamontowane wspólnie na nieruchomej podstawie. Pierwszy człon manipulatora pokazany wcześniej na rys. 1b jest związany bezpośrednio z wirnikiem silnika. Drugi człon ramienia w postaci niskiej pionowej kolumnki jest związany z tarczą wyjściową równoległowodu. Trzeci człon swobody o poziomej osi obrotu jest napędzany bezpośrednio przez silnik DYNASERV osadzony na drugim członie ramienia. Ma on kształt podobny do członu pierwszego. Równoległowod usytuowany wewnątrz trzeciego członu zapewnia stałą orientację beleczki umieszczonej na jego końcu względem członu drugiego. Badania wstępne wykazały prawidłowe działanie zrealizowanych zespołów manipulatora. Podjęto prace projektowe nad docelową wersją manipulatora o siedmiu stopniach swobody. Na rys. 5 przedstawiony jest zespół członów 4 i 5 (wg numeracji podanej na rys. 2), w którym równoległowod do napędu członu 5 umieszczono na zewnątrz członu 4. Równoległowod do napędu kciści umieszczono wewnątrz członów 4 i 5. Zespół ten jest obecnie badany z wykorzystaniem trzech współśrodkowo usytuowanych silników DYNASERV. Prowadzone są również prace nad konstrukcją członu trzeciego mającego postać skrzynki z układami napędowymi dalszych stopni swobody.

4 UWAGI KOŃCOWE

Dotychczasowe wyniki prac projektowych i doświadczalnych pokazały, że opracowana przez autorów oryginalna koncepcja manipulatora wielokorbowego z wykorzystaniem członów o konstrukcji powłokowej oraz równoległowodów ukośnych jest bardzo atrakcyjna. Rozwiązanie to pozwala na równoczesne zapewnienie wielu wymagań praktycznie nieosiągalnych w dotychczasowych konstrukcjach. Dotyczy to przede wszystkim nieograniczonych zakresów ruchów obrotowych w przegubach, małej bezwładności elementów ruchomych przy dużej sztywności oraz szerszego wykorzystania możliwości elektrycznego napędu bezpośredniego.

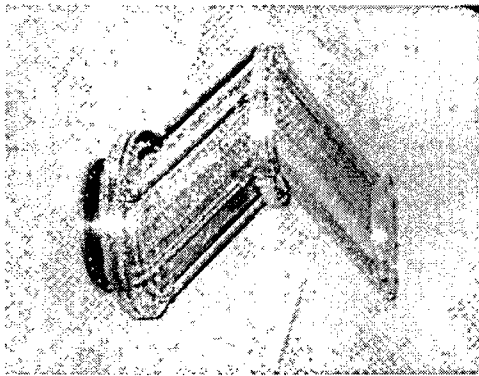
Praca jest finansowana przez Komitet Badań Naukowych w ramach projektu badawczego Nr PB 1005/T11/95/09



a)

b)

Rys. 4. Wstępna wersja ramienia o trzech stopniach swobody: a) ramię w trakcie montażu, widoczne silniki DYNASERV, b) ramię przygotowane do badań



Rys. 5. Zespół dwóch sąsiednich członów ramienia z równoległowodem umieszczonym na zewnątrz powłoki

LITERATURA

- [1] Asada H., Youcef-Tuomi K.: *Direct Drive Robots. Theory and Practice*, The MIT Press, 1987,
- [2] Chironis N.P.: *Mechanisms, Linkages, and Mechanical Controls*, McGraw-Hill Book Company 1965,
- [3] Johansson G., Grahn S.: *A New Robot Concept for High Speed Handling*, Proc. 27th ISIR, Milano 1996,
- [4] Mianowski K., Nazarczuk K.: *Badania wstępne równoległowodów o nieograniczonym zakresie ruchu obrotowego*, mat. XIV Konf. TMM, Gdańsk 1994,
- [5] Nazarczuk K.: *Improvement of a robot performance due to elimination of both dynamic interactions and joint limits in the manipulator arm*, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 3, 31, 1993,
- [6] Nazarczuk K.: *Design of the Fast Manipulator with Eliminated Joint Limits and reduced Dynamic Interactions*, Proc. Ro. Man. Sy 10, Springer-Verlag 1995,
- [7] Nazarczuk K., Mianowski K.: *Manipulator, pat. nr P305.007*, Warszawa 1994,
- [8] Nazarczuk K., Mianowski K.: *Fast manipulator with invariant inertia and eliminated joint limits*, Proc. 27th ISIR, Milano 1996.
- [9] Taylor P. M., Kieffer J. C., Wilkinson A. J., Gilbert J. M., Guo Q., Grindley J., Oldaker R.: *The Design and Control of a Novel Robot Structure with Differential Drive Units*, Proc. Ro. Man. Sy 10, Springer-Verlag 1995,
- [10] Walshmiller W., Lee H. Y., Bains N., Majarais B., Scott D. A.: *Application of the TELBOT Robot in Hazardous Environment*, Proc. 27th ISIR, Milano 1996.