

Kazimierz NAZARCZUK*, Krzysztof MIANOWSKI*, Marek WOJTYRA*

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

INSTYTUT TECHNIKI LOTNICZEJ I MECHANIKI STOSOWANEJ

Manipulator wielokorbowy robota POLYCRANK

Streszczenie

W pracy przedstawiono koncepcję manipulatora o nieograniczonych zakresach ruchów obrotowych w przegubach. Istotną nowością tej koncepcji są człony w kształcie ukośnych korb o lekkiej konstrukcji powłokowej, połączone ze sobą za pomocą pojedynczych łożysk krzyżowo-rolkowych oraz ułożone wewnątrz tych korb równoległowodowo ukośne służące do transmisji napędu. Trzy pierwsze człony tworzą płaski łańcuch kinematyczny o pionowych osiach obrotu, napędzany przez silniki bezpośredniego napędu DD (Direct Drive) zamontowane współosiowo w podstawie. Dwa pierwsze człony są ukośnymi korbami, a trzeci ma kształt kolumny. Trzy następne człony tworzą płaski łańcuch kinematyczny o poziomych osiach obrotu, którego ostatni człon jest pierwszym elementem kiści. Jest on wraz z kiścią napędzany przez silniki AC z przekładniami związanymi z członem trzecim. Opisano główne problemy konstrukcyjne i technologiczne oraz wyniki wstępnych badań prototypu o sześciu stopniach swobody.

Abstract

Design of direct drive manipulator POLYCRANK without joint limits is presented in the paper. The main links of the arm are in the form of light hollow cranks and are connected to each other by cross-roller bearings. Three first DOF with vertical axes are driven by electric direct drive motors mounted coaxial in the base. The first link is driven directly, the second and third are driven remotely by using special parallelogram mechanisms with unlimited range of transmitted rotation. The other DOF's are driven in a similar way by light motors with gears mounted on the third link. High speed of cyclic gross motion in the convex workspace and good isotropic properties are the main advantages of this manipulator. Due to application parallelograms in the special kinematic scheme of the arm and proper mass distribution, kinematic and dynamic decoupling of some DOF was achieved. Dynamic coupling of two first DOF is profitable to realisation of typical high speed motions. One of the main problem of this project was concerne with high mechanical performance of the parallelograms adequately to the DD motors and to obtain the required performance of the arm, i.e. stiffness, lost motion, frequency and damping of natural vibrations. Experimental design, initial tests of the prototype and some remarks concerning dynamic performance are described in the paper.

Wstęp

W dotychczasowym rozwoju robotów dominowały przede wszystkim problemy sterowania i w tej dziedzinie dokonał się wyraźny postęp, natomiast rozwój w dziedzinie konstrukcji mechanicznych był mniej widoczny. Opracowane na początku manipulatory o strukturze otwartych łańcuchów kinematycznych zostały uznane za standardy, które nadal obowiązują. Za szczególnie ważne uważa się te własności manipulatora, które zapew-

niają łatwość sterowania, jak wysoka częstotliwość drgań własnych konstrukcji, mała histereza mechaniczna i małe sprzężenia dynamiczne między poszczególnymi stopniami swobody. W ostatnich latach pojawiły się manipulatory równoległe o bardzo wysokich częstotliwościach drgań własnych zapewniające szerokie pasmo przenoszenia i dużą dokładność, ich wadą jest mała przestrzeń robocza w porównaniu z wymiarami manipulatora. Nowe perspektywy stworzyło także zastosowanie w robotach elektrycznego napędu bezpośredniego, który umożliwił bardzo dokładne sterowanie momentami napędowymi w przegubach. Brak luzów i małe tarcie w manipulatorach z takim napędem pozwala wykorzystywać do sterowania zdeterminowane modele dynamiczne. Jednostki napędu bezpośredniego są jednak bardzo ciężkie, a poza tym między poszczególnymi stopniami swobody występują z reguły 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. Zasady takiego postępowania zmierzającego do zapewnienia diagonalnej i niezależnej od konfiguracji macierzy bezwładności ramienia o dwóch lub trzech stopniach swobody zostały przedstawione m.in. w pracach [2, 7]. Doświadczalne konstrukcje robotów budowanych według tych zasad nie znalazły jednak szerszego zastosowania, gdyż eliminacja sprzężeń dynamicznych wymaga zwykle stosowania przeciwciężarów zwiększających bezwładność manipulatora. Obecnie praktyczne zastosowanie silników DD ogranicza się do dwóch pierwszych stopni swobody robotów typu SCARA. Typowym przykładem jest robot Adept One z dwoma silnikami DD umieszczonymi współosiowo na podstawie. Pierwszy człon tego manipulatora jest napędzany bezpośrednio, a drugi zadalnie za pośrednictwem mechanizmu równoległowodowego z taśmą stalową. Takie rozwiązanie zapewniło prosty (mimo pewnych sprzężeń) model dynamiczny, który jest wykorzystywany w sterowaniu. Dzięki temu ADEPT ONE był uważany dotychczas za najszybszy i jeden z najbardziej dokładnych robotów.

Ważnym problemem współczesnej robotyki jest sterowanie siłą wywieraną przez końcówkę roboczą na otoczenie. Według niektórych opinii warunkiem wstępnym wdrożenia układów ste-

* Dr inż. Kazimierz NAZARCZUK

studia wyższe ukończył na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa w Politechnice Warszawskiej w 1962 r. uzyskując tytuł magistra inżyniera lotnictwa. Początkowo pracował w Lotniczych Zakładach Remontowych, a od 1963 r. w Zakładzie Teorii Maszyn i Mechanizmów na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa w Politechnice Warszawskiej. Doktorat dotyczący sztucznych napędów mięśniowych w manipulatorach obronił w 1971 r. na wydziale macierzystym. Od wielu lat zajmuje się konstrukcją manipulatorów. Jest autorem koncepcji robota RNT o szeregowo-równoległej strukturze ramienia oraz pomysłu zastosowania równoległowodów ukośnych w układach napędowych manipulatorów bez ograniczeń konfiguracji.

* Dr inż. Krzysztof MIANOWSKI

studia wyższe ukończył z wyróżnieniem na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa w Politechnice Warszawskiej w 1982 r. uzyskując tytuł magistra inżyniera podstawowych problemów techniki specjalności Mechanika Stosowana,

automatyka i robotyka. Doktorat dotyczący „Analizy i syntezy oraz badań doświadczalnych wybranych napędów równoległych ramion manipulatorów” obronił w roku 1990 na wydziale macierzystym. Od ukończenia studiów, aktualnie na stanowisku adiunkta, pracuje w Zakładzie Teorii Maszyn i Robotów w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej w Politechnice Warszawskiej. Interesuje się manipulatorami i robotami równoległymi, jest współautorem koncepcji robota RNT o szeregowo-równoległej strukturze ramienia. W ostatnich latach zajmuje się konstrukcją równoległowodów ukośnych i ich zastosowaniem w manipulatorach robotów. Jest członkiem Zarządu POLSPAR.

* Mgr inż. Marek WOJTYRA

studia wyższe ukończył z wyróżnieniem na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa w Politechnice Warszawskiej w 1992 r. uzyskując tytuł magistra inżyniera specjalności automatyka i robotyka. Od ukończenia studiów pracuje w Zakładzie Teorii Maszyn i Robotów w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej w Politechnice Warszawskiej.

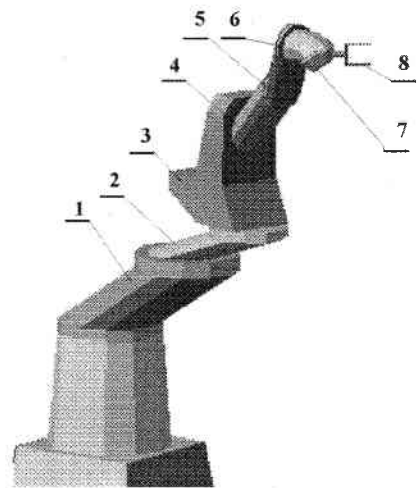
rowania siłą jest zapewnienie dokładnego sterowania momentami napędowymi w przegubach manipulatora [4]. Stało się to jednym z powodów zainteresowania elektrycznym napędem bezpośrednim. Duży ciężar silników DD spowodował, że wdrożenie w robotach napędu dosłownie bezpośredniego okazało się nieracjonalne. W pracach rozwojowych z tego zakresu można dostrzec dwie skrajne tendencje. Jedną z nich jest rezygnacja z silników DD i stosowanie wysokomomentowych silników z przekładniami o małym przełożeniu i czujnikami do pomiaru momentu montowanych na każdym członie manipulatora [4]. Druga polega na umieszczeniu wszystkich silników DD na podstawie i transmisji napędu do kolejnych członów np. przez układy cięgien i wielokrążków [20].

W pracy [13] zaproponowano koncepcję pośrednią, w której tylko trzy pierwsze stopnie swobody manipulatora są napędzane przez silniki DD, przy czym dwa z nich są umieszczone współosiowo na podstawie. Trzy ostatnie stopnie swobody należą do kiści napędzane są przez silniki z przekładniami montowane na jednym z ruchomych członów manipulatora. Istotną nowością tej propozycji jest zdalny napęd drugiego członu za pomocą równoległowodów ukośnych umieszczonego wewnątrz członu pierwszego mającego postać korbki. Rozwiązanie to umożliwia doprowadzenie do drugiego członu elastycznych przewodów, które podczas ruchów obrotowych o nieograniczonym zakresie, wykonywanych przez pierwszy człon, nie ulegają skręcaniu. Znane rozwiązania konstrukcyjne równoległowodów ukośnych opisane w literaturze anglojęzycznej np. „Parallel plate driver” lub „Parallel-link coupling” [3] nie zapewniają odpowiednich właściwości mechanicznych pozwalających na ich stosowanie w robotach z elektrycznym napędem bezpośrednim. Przeprowadzone przez autorów studia projektowe poparte badaniami doświadczalnymi [10] doprowadziły do opracowania konstrukcji równoległowodów o wysokiej i praktycznie niezależnej od kąta obrotu sztywności i małej histerezie. Stało się to punktem wyjścia do podjęcia prac nad szybkim robotem bez ograniczeń konfiguracji z ramieniem odsprężonym dynamicznie napędzanym za pomocą silników DD. Opracowano koncepcję manipulatora o prostym schemacie kinematycznym i jednolitej, oryginalnej konstrukcji, nazwanego wielokorbowym (POLYCRANK) [11, 16, 17]. Szczególną cechą tego manipulatora są praktycznie nieograniczone zakresy ruchów obrotowych wszystkich stopni swobody, tylko trzeci człon ma zakres ruchu mierzonego względem podstawy ograniczony do kilku obrotów. Manipulatory o nieograniczonych zakresach ruchów obrotowych w przegubach mają znacznie lepsze własności manipulacyjne [12] i szereg innych zalet, np. zwiększenie prędkości ruchu nie wymaga stosowania zabezpieczeń i uwzględniania stref hamowania w pobliżu granic przestrzeni roboczej. Dotychczas nieograniczone zakresy ruchów obrotowych spotykało się przede wszystkim w niektórych rozwiązaniach kiści robotów przemysłowych. Przykładem robota o sześciu stopniach swobody i nieograniczonych zakresach ruchów obrotowych we wszystkich przegubach jest TELBOT [19], w którym wszystkie silniki napędowe są umieszczone na podstawie, a transmisja napędu odbywa się za pośrednictwem wałków i przekładni zębatych stożkowych. Manipulator ten nie ma żadnych ograniczeń konfiguracji, jednak z uwagi na małą sztywność konstrukcji i skomplikowany układ przeniesienia napędu zawierający kilkadziesiąt przekładni zębatych nie może być wykorzystywany do realizacji szybkich i dokładnych ruchów. Natomiast manipulator POLYCRANK dzięki oryginalnej konstrukcji i zastosowaniu do napędu pierwszych trzech stopni swobody silników DD może wykonywać szybkie ruchy po praktycznie dowolnych torach mieszczących się w przestrzeni roboczej, która ma kształt pelnego walca.

Koncepcja manipulatora wielokorbowego

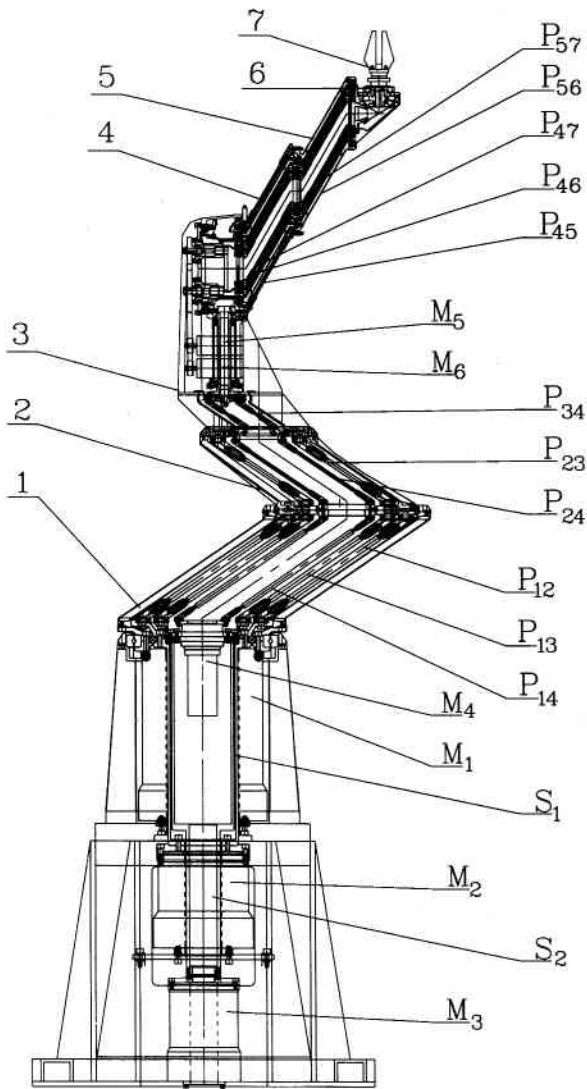
W pracy [5] przedstawiono ideę redundantnego robota o nieograniczonych zakresach ruchów obrotowych w trzech pierwszych przegubach o osiach pionowych. Zwrócono uwagę na jego przydatność przy realizacji szybkich ruchów cyklicznych występujących np. przy obsłudze przenośników taśmowych. Pomyślnie mieli jednak poważne wątpliwości dotyczące technicznych możliwości realizacji tej idei ze względu na problemy z doprowadzaniem energii i sygnałów sterujących do silników napędowych umieszczonych na kolejnych członach wykonujących nieograniczone ruchy obrotowe. Problemy tego typu rozwiązano w manipulatorze POLYCRANK przez wprowadzenie zdalnego napędu trzech pierwszych stopni swobody z zastosowaniem odpowiednich układów równoległowodów ukośnych.

Sylwetkę i schemat ideowy tego manipulatora pokazano na rys.1. Główne człony ramienia 1, 2 oraz 4, 5 mające postać lekkich ukośnych korb o konstrukcji powłokowej są łączone za pomocą pojedynczych łożysk krzyżowo-rolkowych. Wewnątrz korb ulokowane są równoległowodów ukośne służące do transmisji napędu. Pierwsze trzy człony ruchome tworzące płaski łańcuch kinematyczny o osiach pionowych są napędzane przez silniki napędu bezpośredniego zamocowane współosiowo w podstawie. Następne trzy stopnie swobody o osiach poziomych oraz dwa ostatnie należące do kiści sferycznej są napędzane przez lekkie silniki z przekładniami usytuowane na członie trzecim. Konieczność doprowadzenia kabli do tych silników powoduje, że ruch trzeciego członu względem podstawy jest ograniczony do kilku obrotów. Wszystkie pozostałe człony manipulatora mają nieograniczone zakresy ruchów obrotowych. Ten redundantny manipulator ma prosty i dość szczególny schemat kinematyczny. Przez zastosowanie równoległowodów ukośnych wyelimin-



Rys. 1. Schemat ideowy manipulatora wielokorbowego

nowano w nim sprzężenia kinematyczne między niektórymi stopniami swobody, np. po unieruchomieniu silnika 3 nie występują sprzężenia kinematyczne między kłosem a ramieniem, tzn. ruchy ramienia nie wywołują żadnych zmian orientacji członów 6, 7 i 8. Dzięki temu że osie pionowe przegubów 1, 2 i 3 są do siebie równoległe oraz poziome osie przegubów 4, 5 i 6 są również do siebie równoległe, a osie przegubów 6, 7 i 8 przecinają się w środku kiści sferycznej, po wyeliminowaniu wybranych dwóch stopni swobody otrzymuje się przeważnie manipulator o sześciu stopniach swobody, dla którego istnieje analityczne rozwiązanie odwrotnego zadania kinematyki. Jednak ostatnie



Rys. 2. Projekt wstępny manipulatora POLYCRANK

dwa stopnie swobody nie mogą być równocześnie wyeliminowane bez utraty zdolności sterowania orientacją chwytaka, jak również 4 i 5 stopień swobody nie mogą być równocześnie wyeliminowane, gdyż uniemożliwiłoby to pionowy ruch końcówki ramienia.

Za najbardziej interesujący uznano manipulator o siedmiu stopniach swobody, w którym dwa sąsiednie człony tj. 4 i 5 o tej samej długości, napędzane przez jeden silnik wyposażony w przekładnię z rewersem tworzą prostowód zapewniający pionowy ruch końcówki ramienia. Sprężenie dynamiczne zrealizowanego w ten sposób czwartego stopnia swobody z trzema pierwszymi stopniami jest bardzo małe. Przez odpowiednie rozmieszczenie masy na członie trzecim można łatwo zapewnić jego odsprężenie dynamiczne od dwóch pierwszych stopni swobody. Po unieruchomieniu wirnika jednego z silników napędzających człony 1 lub 2 otrzymuje się manipulator o sześciu stopniach swobody z ramieniem odsprężonym dynamicznie, co znacznie ułatwia sterowanie. Umieszczając odpowiedni przeciwcieżar na członie 2 można również odsprząć dynamicznie dwa pierwsze stopnie swobody jednak kosztem znacznego zwiększenia ich bezwładności. Jako podstawową przyjęto prostszą wersję manipulatora, w której zrezygnowano z jednego stopnia swobo-

dy kiści i odsprężenia dwóch pierwszych stopni swobody za pomocą przeciwcieżaru. Do sterowania orientacją chwytaka wykorzystuje się tu trzeci stopień swobody ramienia, natomiast przy realizacji pewnych zadań, w których trzeci człon nie jest wykorzystywany do zmian orientacji chwytaka, trzy pierwsze stopnie swobody mogą być traktowane jako płaski redundantny manipulator o bardzo dobrych izotropowych własnościach rozważany w pracach [5, 6]. Projekt wstępny manipulatora POLYCRANK przedstawiono na rys. 2. W podstawie manipulatora ulokowano cztery ciężkie silniki, trzy napędu bezpośredniego DYNASERV oraz silnik z reduktorem firmy YASKAWA napędzający czwarty stopień swobody. Na rysunku oznaczono: ruchome człony manipulatora cyframi 1÷7, silniki napędowe symbolami $M_j \rightarrow M_6$, wały przekazujące napęd z silników DYNASERV symbolami S_1 i S_2 , równoległowodów symbolami P_{ij} , gdzie: i -numer członu, w którym znajduje się dany równoległowod, j -numer członu do którego równoległowod ten przekazuje napęd. Silniki DYNASERV oznaczone M_1, M_2 i M_3 są zamocowane do podstawy, natomiast silnik YASKAWA oznaczony M_4 jest sztywno związany z wałem S_2 , który wraz z szeregowo połączonymi równoległowodami P_{13} i P_{23} przekazuje napęd z silnika M_3 na człon 3, mający postać obrotowej kolumny. Pierwszy i drugi człon ramienia mają nieograniczone zakresy ruchów obrotowych, a ruch trzeciego członu jest ograniczony do kilku obrotów ze względu na skręcanie się doprowadzonych do niego przewodów. Układ transmisji napędu czwartego stopnia swobody jest bardziej skomplikowany. Do silnika M_4 z przekładnią o przełożeniu 1:5 podłączony jest układ trzech szeregowo połączonych równoległowodów P_{14}, P_{24} i P_{34} przekazujących napęd na mechanizm rewersyjny z przekładniami zębatymi stożkowymi umieszczonymi w członie 3. Mechanizm ten napędza człon 4 w jednym kierunku, natomiast człon 5 za pośrednictwem równoległowodów zewnętrznego P_{45} z tą samą prędkością obrotową w przeciwnym kierunku. Dzięki temu końcówka ramienia może wykonywać ruchy pionowe o zakresie równym sumie długości członów 4 i 5. Istnieje tu możliwość skompensowania sił ciężkości członów 4÷7 za pomocą sprężyn działających na specjalny mechanizm mimośrodowy związany z równoległowodem napędzającym człon 5. Kiść o dwóch stopniach swobody umocowana na końcu członu 5 jest napędzana przez silniki M_5 i M_6 ulokowane wraz z przekładniami na członie 3. Stąd napęd za pośrednictwem równoległowodów ukośnych ulokowanych wewnątrz członów 4 i 5 jest przekazywany do mechanizmu kiści zawierającego tylko jedną przekładnię stożkową. Przewiduje się, że doświadczenie zdobyte przy projektowaniu i eksploatacji tak skomplikowanego układu napędowego może stanowić podstawę do dalszych prac nad inną wersją manipulatora wielokorbowego, w którym wszystkie silniki napędowe byłyby ulokowane na podstawie, dzięki czemu zakresy ruchów obrotowych wszystkich członów byłyby zupełnie nieograniczone. Manipulator taki mógłby wykonywać obszerne ruchy cykliczne po dowolnych torach w jego przestrzeni roboczej mającej kształt pełnego walca. W manipulatorze POLYCRANK o konstrukcji przedstawionej na rys. 2 liczba cykli podczas takich obszernych ruchów jest ograniczona do kilku ze względu na skręcanie kabli. Może on jednak wykonywać szybkie ruchy cykliczne po torach zamkniętych mieszczących się w obszarze wypukłym o objętości wynoszącej ok. 70% jego przestrzeni roboczej. Warto podkreślić, że dla typowych manipulatorów taki obszar o zbliżonych wymiarach można uzyskać tylko przy znacznie dłuższych ramionach, gdyż jest on wtedy małym fragmentem przestrzeni roboczej mającej kształt torusa. W typowych manipulatorach ruchy cykliczne po torach zamkniętych są uzyskiwane przez składanie ruchów wahadłowych w poszczególne przebiegi. Istotnym ograniczeniem są wtedy siły bezwładności, wymagające odpowiednio dużych sił napędowych. Takie same ruchy cykliczne mogą być realizowane przez

manipulator POLYCRANK przy znacznie mniejszych wymiarach członów ruchomych, a więc o znacznie mniejszej bezwładności i wyższych częstotliwościach drgań własnych oraz przy znacznie mniejszej mocy silników napędowych. Należy tu podkreślić, że w trakcie obszernych ruchów cyklicznych silniki pierwszy i drugi nie zmieniają kierunków prędkości obrotowych, dzięki czemu momenty wywołane przez siły bezwładności są stosunkowo małe, a momenty tarcia są praktycznie stałe. Mimo sprzężeń dynamicznych w dwóch pierwszych stopniach swobody model dynamiczny manipulatora jest stosunkowo prosty i może być wykorzystywany w sterowaniu.

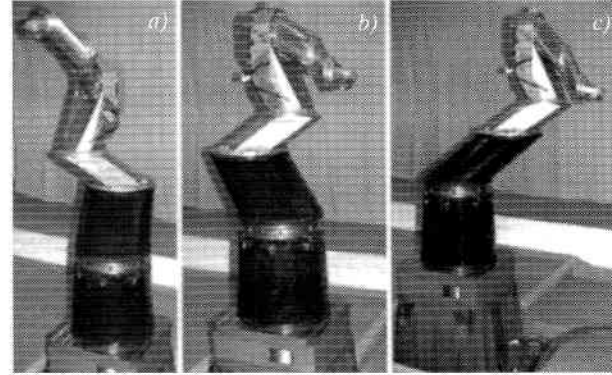
Prototyp manipulatora POLYCRANK

Projekt prototypu opracowano zgodnie z koncepcją przedstawioną na rys. 2. Większość projektu konstrukcyjnego opracowano z wykorzystaniem programu Auto-CAD. Rozwój koncepcji znacznie ułatwiła wizualizacja i animacje ruchów manipulatora realizowane w systemie UNIGRAPHICS. Jednym z głównych problemów projektu było opracowanie lekkich i sztywnych członów o kształcie powłok eliptycznych zakończonych odpowiednio sztywnymi kołnierzami z gniazdami łożysk oraz zintegrowanych z nimi równoległowodów, umieszczonych zarówno wewnątrz jak i na zewnątrz korb. Wykonano i wstępnie przebadano kilka wersji równoległowodów różniących się łożyskami głównymi, łożyskami łączników i sposobem regulacji oraz kilka różnych wersji rozwiązań konstrukcyjnych członów wykonanych z różnych materiałów. Odpowiednio lekkie i sztywne ukośne korby udało się wykonać jako spawane z blachy stalowej oraz spawane lub nitowane z duralu PA7. Korby kompozytowe okazały się mało sztywne i przy działaniu długotrwałych obciążeń ulegały pętlaniu. Badania doświadczalne wykazały dobre tłumienie drgań w członach wykonanych z kompozytu i nitowanych z duralu PA7. Istotnym problemem konstrukcyjnym w projekcie manipulatora wielokorbowego był dobór łożysk. Za najlepsze, zarówno w połączeniach między kolejnymi korbami jak i jako główne w równoległowodach, uznano bardzo lekkie pojedyncze łożyska krzyżowo-rolkowe. Dla ścisłego dopasowania powłok ukośnych korb do równoległowodów korzystne okazało się umieszczenie łożysk łączących poszczególne człony i łożysk równoległowodowych współosiowo w jednej płaszczyźnie. Typowym rozwiązaniem konstrukcyjnym zaprojektowanym i wykonanym wg tych reguł jest przedstawiony na rys. 3 zespół członów 4 i 5 (wg numeracji z rys. 2). Człony te opracowano i wykonano jako lekkie i sztywne nitowane konstrukcje powłokowe. Widoczny na zewnątrz człon 4 równoległowod służy do trans-

misji napędu dla członu 5. W projekcie manipulatora przewidziano rozwiązania konstrukcyjne zapewniające możliwość regulacji podczas montażu i nie wymagające wysokiej klasy dokładności wykonania. Podstawowe elementy konstrukcyjne zostały wykonane przez typowe, średniej klasy warsztaty mechaniczne. W równoległowodach napędu trzeciego członu łączniki przystosowano do poprowadzenia przewodów elektrycznych do silników zamontowanych na tym członie. W tym celu w elementach łączników wykonano odpowiednie kanały. Podczas pracy przewody zamocowane do obu tarcz kolejnych równoległowodów nie ulegają skręcaniu a jedynie przeginananiu i obtaczaniu wewnątrz kanałów w łącznikach, następnie połączone w wiązkę są wyprowadzone przez rurowy wał do pojemnika w specjalnym fundamencie i zwinięte w odpowiedni sposób w pętlę zamocowaną do podstawy. Ograniczony ze względu na skręcanie tej wiązki kąt obrotu trzeciego członu jest mierzony przez potencjometr 10-obrotowy.

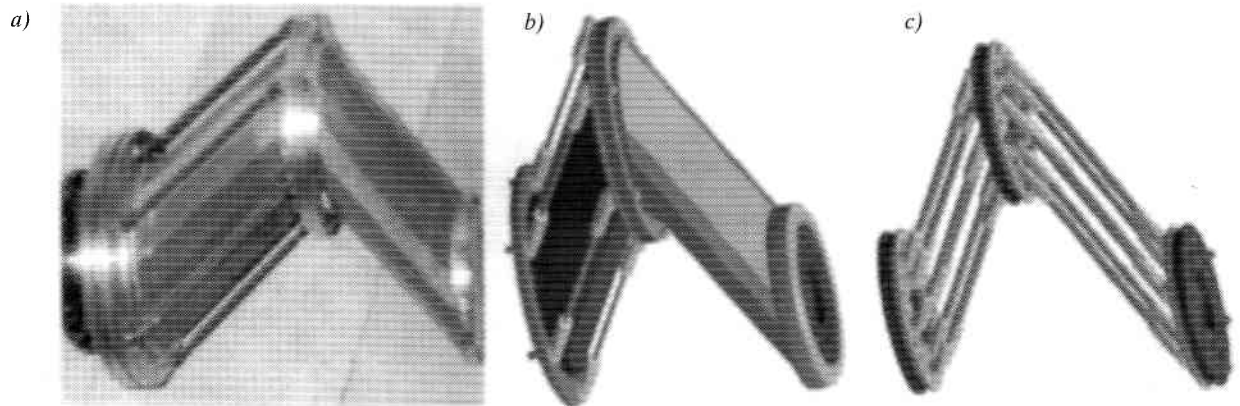
Na rys. 4 przedstawiono widok ogólny prototypu manipulatora na stanowisku w laboratorium Instytutu Automatyki i Informatyki Opcowanej Politechniki Warszawskiej. Na górnej powierzchni poziomej członu 3 zamocowane są trzy ortogonalnie względem siebie zorientowane akcelerometry piezoelektryczne do badania drgań. Mają one zakres pomiarowy 5g (ok. 50 m/s²).

Badano drgania konstrukcji w różnych konfiguracjach manipulatora pokazanych na rys. 4. Stwierdzono, że drgania własne



Rys. 4. Widok ogólny prototypu manipulatora w różnych konfiguracjach

wywołane uderzeniem gumowego młotka w człon 3 z różnych stron są silnie tłumione i praktycznie zanikają po czasie ok. 0,1+0,15 s. Uzyskane przebiegi czasowe poddawano analizie



Rys. 3. Przykład ilustrujący dopasowanie ukośnych korb do równoległowodów: a) człony 5 i 4 z równoległowodem zewnętrznym, b) projekt w systemie UNIGRAPHICS, c) równoległowod wewnętrzny

częstotliwościowej dokonując szybkiej transformaty Fouriera za pomocą programu DADISP. W widmie amplitudowym dominują składowe o częstotliwości ok. 60 Hz i 80 Hz. Przy niektórych konfiguracjach manipulatora zaobserwowano drgania własne o częstotliwości ok. 26 Hz. Dokonywano również rejestracji przyspieszeń i analizy drgań konstrukcji manipulatora w trakcie ruchów testowych o różnych przebiegach prędkości zadanej. Pojawianie się drgań o najniższej częstotliwości drgań własnych konstrukcji wynoszącej ok. 26 Hz stwierdzono tylko podczas ruchów o prostokątnym profilu prędkości zadanej. Przy realizacji ruchów o typowych gładkich profilach prędkości praktycznie nie zaobserwowano drgań rezonansowych konstrukcji.

Badania wstępne powtarzalności pozycjonowania prowadzono dla ruchów testowych o trapezowym profilu prędkości zadanej. Pomiary wykonano za pomocą czujnika zegarowego o działce elementarnej 0,01 mm. Uzyskano powtarzalność pozycjonowania ok. $\pm 0,15$ mm, przy czym podczas testów występowało przeregulowanie ok. 0,2 mm.

W trakcie badań prototypu prędkości silników DD ograniczono do 1 obr./s, przy czym starano się nie przekraczać 0,6 obr./s. Zdecydowano, że nominalne prędkości wynoszące 2 obr./s można będzie osiągać po dalszych badaniach obejmujących m.in. próby wytrzymałościowe. W badaniach wykorzystywano układ sterowania opisany w [8] oraz system MRROC++ [21].

Uwagi końcowe

Wyniki prac projektowych i doświadczalnych pokazały, że opracowana przez autorów koncepcja manipulatora wielokorbowego jest atrakcyjna. Rozwiązanie to umożliwia równoczesne spełnienie wielu wymagań praktycznie nieosiągalnych w dotychczasowych konstrukcjach manipulatorów. Łańcuch kinematyczny składający się z ukośnych korb połączonych przegubami podczas realizacji danego zadania może przyjmować kilka różnych konfiguracji, co m.in. ułatwia omijanie przeszkód. Wypukła przestrzeń robocza i nieograniczone zakresy ruchów w przegubach pozwalają na realizację szybkich ruchów po praktycznie dowolnych torach. Dotyczy to w szczególności obszernych ruchów cyklicznych po torach zamkniętych. Zastosowanie równoległowodów zapewnia eliminację niektórych sprzężeń kinematycznych. Przyjęty w manipulatorze POLYCRANK schemat kinematyczny oraz odpowiedni rozkład mas umożliwił odsprężenie dynamiczne trzeciego i czwartego stopnia swobody od pozostałych. Natomiast analiza dynamiczna, której wyniki przedstawiono w [11, 16] wykazała, że eliminacja sprzężeń dynamicznych między pierwszymi dwoma stopniami swobody manipulatora wielokorbowego jest niecelowa, gdyż wiąże się ze zwiększeniem bezwładności ramienia i pogorszeniem jego izotropowości dynamicznej.

Dotychczasowe badania prototypu manipulatora wielokorbowego umożliwiły wstępną ocenę zarówno jego koncepcji jak i opracowanych rozwiązań konstrukcyjnych. Plaski łańcuch kinematyczny obejmujący pierwsze trzy stopnie swobody napędzane przez umieszczone współosiowo w podstawie silniki DYNASERV może być traktowany jako moduł konstrukcyjny o szerszym zastosowaniu. Użyte tu równoległowodowe ukośne własnej konstrukcji charakteryzują się bardzo dobrymi własnościami mechanicznymi pozwalającymi na znacznie szersze niż dotychczas wykorzystanie silników napędu bezpośredniego. Zdaniem autorów mogą one znaleźć również inne zastosowania. Pozytywnie należy ocenić także oryginalny mechanizm prostowodu zastosowany w układzie napędowym czwartego stopnia swobody. Celowe jest wyposażenie manipulatora w kiść sferyczną, napędzaną jeszcze jednym silnikiem ulokowanym na członie 3. Zastosowane przekładnie zębate znajdujące się w tym członie są ciężkie i nie odpowiadają w pełni ogólnym założeniom manipulatora wielokorbowego, celowe jest więc opraco-

wanie nowego rozwiązania konstrukcyjnego całego tego zespołu. Również doprowadzenie kabli do silników zamontowanych na trzecim członie wykonującym według założeń kilka obrotów sprawiło dużo trudności, warto więc rozważyć możliwość zapewnienia zdalnego napędu wszystkich stopni swobody manipulatora przez silniki ulokowane na podstawie.

LITERATURA

- [1] H. ASADA, J.J. SLOTINE: Robot Analysis and Control. John Wiley & Sons, 1985.
- [2] H. ASADA, K. YOUCEF-TOUMI: Direct Drive Robots. Theory and Practice, The MIT Press, 1987.
- [3] N.P. CHIRONIS: Mechanisms, Linkages and Mechanical Controls. McGraw-Hill Book Company, 1965.
- [4] R. HOLMBERG, S. DICKERT, O.KHATIB: A New Actuation System for High-Performance Torque-Controlled Manipulators. Proc. Ro.Man.Sy 9, Springer-Verlag, 1993.
- [5] G. JOHANSSON, S. GRAHN: A New Robot Concept for High Speed Handling. Proc. 27th ISIR, Milano 1996.
- [6] M. KIRCANSKI: Kinematic Isotropy and Optimal Kinematic Design of Planar Manipulators and a 3-DOF Spatial Manipulator. J. Robotics Research, Vol. 15, No 1, 1996.
- [7] A.I. KORENDYASEV, B.L. SALAMANDRA, L.I. TYVES: Mechanics of Robots with Dynamically Decoupled Motions. Proc. Ro. Man, Sy'86, Hermes 1990.
- [8] U. KR GLEWSKA, K. SACHA: Versatile Control System for a Very Fast Robot. Proc. IV Int. Symp. MMAR'97, Wyd. Polit. Szczecińskiej, Szczecin 1997.
- [9] K. MIANOWSKI: Dextrous Fully Parallel Manipulator with Six Degrees of Freedom. Proc. Ro. Man. Sy 12, Springer-Verlag 1998.
- [10] K. MIANOWSKI, K. NAZARCZUK: Badania wstępne równoległowodów o nieograniczonym zakresie ruchu obrotowego. Mat. XIV Konf. TMM, Gdańsk 1994.
- [11] K. MIANOWSKI, K. NAZARCZUK: Manipulator wielokorbowy bez ograniczeń konfiguracji. Mat. VI Kraj. Konf. Robotyki, wyd. polit. Wrocławskiej, Wrocław 1998.
- [12] K. NAZARCZUK: 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.
- [13] K. NAZARCZUK: Design of the Fast Manipulator with Eliminated Joint Limits and reduced Dynamic Interactions. Proc. Ro.Man.Sy 10, Springer-Verlag 1995.
- [14] K. NAZARCZUK, K. MIANOWSKI: Manipulator, pat. nr P305.007, Warszawa 1994.
- [15] K. NAZARCZUK, K. MIANOWSKI: Fast manipulator with invariant inertia and eliminated joint limits. Proc. 27th ISIR, Milano 1996.
- [16] K. NAZARCZUK, K. MIANOWSKI: POLYCRANK - Fast Robot Without Joint Limits. Proc. Ro. Man. Sy 12, Springer-Verlag 1998.
- [17] K. NAZARCZUK, K. MIANOWSKI, M. WOJTYRA: Szybki robot o nowej konstrukcji bez ograniczeń konfiguracji. Mat. konf. AUTOMATON'98, PIAP Warszawa 1998.
- [18] P. M. TAYLOR, J. C. KIEFFER, A. J. WILKINSON, J. M. GILBERT, Q. GUO, J. GRINDLEY, R. OLDAKER: The Design and Control of a Novel Robot Structure with Differential Drive Units. Proc. Ro. Man. Sy 10, Springer-Verlag 1995.
- [19] W. WALISHMILLER, H.Y. LEE, N. BAINS, B. MAJARAIS, D.A. SCOTT: Application of the TELBOT Robot in Hazardous Environment. Proc. 27th ISIR, Milano 1996.
- [20] K. YOKOI, K. KOMORIYA, K. TANIE: Development of a Coupled Tendon Drive Manipulator With Seven Degrees-of-Freedom. Proc. Ro. Man.Sy 9, Springer-Verlag 1993.
- [21] C. ZIELIŃSKI: Objected-Oriented Programming of Multi-Robot Systems, Proc. IV Int. Symp. MMAR'97, Wyd. Polit. Szczecińskiej, Szczecin 1997.