

MODELE MANIPULATORÓW DO CELÓW DYDAKTYCZNYCH ITLiMS PW

Nowoczesny proces edukacyjny w zakresie robotyki w wyższych szkołach i uniwersytetach technicznych powinien wykorzystywać nie tylko roboty przemysłowe, które są drogie, duże i ciężkie a ich układy sterowania tak zwane przemysłowe są zabezpieczane przed ingerencją użytkownika, lecz również proste i tanie modele budowane własnoręcznie przez studentów z tanich i ogólnie dostępnych na rynku elementów z układami sterowania bazującymi na technice komputerowej PC pozwalającymi na tworzenie własnych programów z łatwą możliwością ich modyfikacji. W tym artykule autor przedstawia doświadczenia własne w zakresie prostych i tanich rozwiązań manipulatorów robotów wykonanych przez studentów w ramach prac przejściowych i dyplomowych, które są wykorzystywane w procesie dydaktycznym. Jako materiały konstrukcyjne zastosowano tworzywa sztuczne i materiały kompozytowe, natomiast w układach sterowania wykorzystano tanie kontrolery PIC oraz typowe komputery PC.

IAAM-WUT MODELS OF ROBOT-MANIPULATORS FOR THE DIDACTIC PURPOSES

Modern educational process in technical/technological medium/high schools in the area of robotics can use not only typical industrial robot-manipulators, which are rather expensive, bulky and heavy, but some simple, cheap models made handly by the students. There can be made of very chip mechanical/electronic components available in the market. As a control system typical PC computer with typical servoamplifiers can be applied.

1. WSTĘP

Typowe roboty przemysłowe oferowane przez wytwórców są drogie, duże i ciężkie i wymagają odpowiednich warunków pracy, często trudnych do zapewnienia w warunkach uczelni. W celu wykorzystania do celów dydaktycznych stwarzają one duży problem, gdyż najczęściej ich układy sterowania, tzw. przemysłowe stanowią systemy zamknięte, co uniemożliwia implementację programów sterowania opartych na własnych algorytmach opracowywanych do celów badawczych. W procesie nauczania laboratoryjne badania doświadczalne planowane do celów poznawczych jak i dydaktycznych wymagają stosowania otwartych układów sterowania o zmiennej strukturze sterowników z możliwością implementacji własnych algorytmów sterowania. Niezależnie od tego wskazane jest, aby możliwym był łatwy sposób zmiany właściwości systemu sterowania jak i w

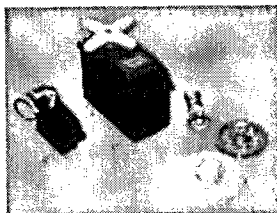
założonych zakresach właściwości obiektu. W takiej sytuacji typowy robot przemysłowy należałoby wyposażyć do celów dydaktycznych w dodatkowy specjalny układ sterowania zapewniający wyżej sformułowane założenia. Jeżeli w procesie dydaktycznym założymy dodatkowo, że kształcimy inżyniera-konstruktora, który w niedalekiej przyszłości ma tworzyć nowe, przyszłościowe rozwiązania manipulatorów i robotów, to w takim modelu kształcenia laboratoria: robotyki, sterowania oraz programowania robotów powinny być wyposażone w aparaturę specjalną pozwalającą na tworzenie i badania nowych nietypowych struktur kinematycznych manipulatorów wyposażanych w układy sterowania pozwalające na spełnienie nowych, często nietypowych wymagań zakładanych przez konstruktora. Próby wykorzystywanie w tym celu typowym robotów przemysłowych z ich układami sterowania miałyby się w takim wypadku z celem. Można również wykorzystać modelowanie komputerowe i cały proces prowadzić w laboratoriach komputerowych, jednak wyniki badań uzyskiwane wyłącznie na drodze numerycznej, pozbawione możliwości weryfikacji doświadczalnej nie zapewniają pełnej możliwości obiektywnego osądu badanych zjawisk. Współczesny proces dydaktyczny wymaga stworzenia możliwości budowy własnego modelu obiektu w celu weryfikacji wiedzy teoretycznej z wykorzystaniem nawet bardzo prostych, efektywnych modeli rzeczywistych w praktycznym zastosowaniu. Ten cel można zrealizować z wykorzystaniem tanich, prostych modeli budowanych z tworzyw sztucznych lub materiałów kompozytowych oraz tanich układów napędowych i sterujących dostępnych aktualnie na rynku. Celem pracy studentów może być tworzenie własnych projektów, tj. opracowanie struktury kinematycznej, wykonanie modelu manipulatora, opracowanie modelu kinematyki/dynamiki, dobór układów napędowych i sterujących, tworzenie własnych programów sterujących, przećwiczenie efektywności układów sterowania o różnych właściwościach itp. Takie podejście pozwala uzyskać dodatkowe korzyści; student jako projektant-wynalazca badając rzeczywiste właściwości zaprojektowanego przez siebie układu ma możliwość samodzielnie wnioskować i syntetyzować wyniki, co tworzy nowe perspektywy jego rozwoju w ogóle. Rozwiązania pokazane w tym opracowaniu zostały zaprojektowane, skonstruowane i wykonane w Zakładzie Teorii Maszyn i Robotów Instytutu Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej w Politechnice Warszawskiej w większości przez studentów w ramach prac przejściowych i dyplomowych. Niektóre rozwiązania są wykorzystywane w procesie dydaktycznym.

2. MODELE MANIPULATORÓW ROBOTÓW WYKONANE Z ELEMENTÓW DOSTĘPNYCH NA RYNKU

Aktualnie rynek tanich elementów podstawowych, jak modelarskie układy servo, silniczki, koła zębate, główki ciągieł/popychaczy itp. ale również kontrolery PIC, układy pomiarowe i sensoryczne jest bardzo bogaty. Modelarz, inżynier-konstruktor może wykorzystać tanie elementy podstawowe do tworzenia własnych modeli mechanizmów manipulatorów robotów. Na Rys. 1. pokazano typowy modelarski układ servo firmy HI-TEC, koła zębate z tworzyw sztucznych, główkę ciągieła-popychacza i miniaturowy przełącznik. W układach servo są stosowane z reguły silniczki prądu stałego z przekładnikami oraz potencjometrami do pomiaru położenia, przy czym stosuje się silniczki z magnesa-

mi trwałymi, z wirnikami bezrdzeniowymi, bezszczotkowe, uszczelniane, reluktancyjne, skokowe, skokowe hybrydowe itp.

Do zastosowań robotycznych, korzystnym jest wykorzystanie silników wysokoobrotowych z przekładniami, przy czym wirniki mogą wirować z prędkościami do 20000obr/min rozwijając relatywnie małe momenty odpowiednio dopasowywane przez zastosowanie przekładni. W układzie servo pokazanym na zdj. 1. przekładnia zębata szeregową o przełożeniu 200:1 jest zabudowana bezpośrednio za silnikiem w tej samej obudowie, natomiast na wale wyjściowym z jednej strony wewnątrz obudowy znajduje się potencjometr pomiarowy, zaś drugi koniec wału jest wyposażony w specjalny krzyżak do sprzężenia z układem napędzanym. Zapewnia to kompaktową, zwartą konstrukcję o wysokich właściwościach funkcjonalnych i relatywnie małej masie własnej. Takie servo można wykorzystać bezpośrednio w konstrukcji prostego manipulatora. W takiej jednostce potencjometr pomiarowy można na drodze niewielkiej przeróbki zastąpić enkoderem lub obrotowym impulsatorem elektronicznym, zintegrowanym z silnikiem/przekładnią mechaniczną. Układy zasilania/sterowania elektronicznego silników bazują na mostkach elektronicznych z wykorzystaniem technologii MOS-FET a sterowanie odbywa się przez modulację szerokości fali prostokątnej podawanej na wejściu. W wypadku zastosowania silników szczotkowych servo takie jest bardzo tanie.



Rys. 1. Tania elektryczna jednostka napędowa typu servo, kółka zębate, elementy przegubów, przełącznik

Serwojednostka pokazana na Rys. 1 jest typowym rozwiązaniem dostępnym na rynku do celów modelarskich, najczęściej jest wykorzystywana w małych modelach lotniczych. Może być ona stosowana do sterowania modelem przez zmianę położenia kątownego sterów wysokości i kierunku. Do pomiaru położenia wału wyjściowego jest zastosowany zintegrowany z konstrukcją potencjometr, który w wewnętrznej położeniowej pętli sprzężenia zwrotnego układu zasilającego sterującego, w zakresie nominalnego obciążenia zewnętrznego zapewnia stosunkowo wysoką jakość sterowania. Ze względu na małe opory własne (małą histerezę), stosunkowo niewielki nominalny zakres obciążalności oraz impulsowy sposób zasilania silnika (PWM) w położeniowej pętli sprzężenia zwrotnego zastosowano tutaj regulator typu P.

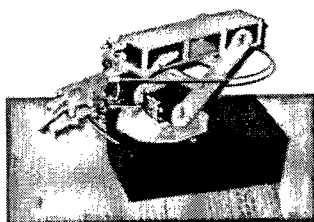
Należy podkreślić, że aktualnie w różnych rozwiązaniach rzeczywistych do sterowania silników prądu stałego małych i średnich mocy najczęściej stosuje się właśnie układy sterujące typu PWM. Technika sterowania wykorzystująca układy mostkowe z tranzystorami typu MOSFET o bardzo małych rezystancjach w kierunku przewodzenia zapewnia dobre właściwości dynamiczne oraz wysoką sprawność, podczas gdy w ostatnim czasie bardzo dobrze opanowano technologię produkcji takich układów, są one ogólnie dostęp-

ne na rynku i stosunkowo tanie. Do celów modelarskich dostępne są też bardzo tanie sterowniki prędkości, których koszt jest porównywalny z kosztem małego silnika.

Również aktualny stan rozwoju mikrokontrolerów typu PIC powoduje, że stały się one bardzo popularne w zastosowaniu do sterowania różnymi obiektami. Ich relatywnie wysoka prędkość działania, niski koszt, małe zużycie mocy spowodowały, że stały się „inteligentnymi chipami” wykorzystywanymi jako programowalne kontrolery silników prądu stałego. Nowoczesne sterowniki prędkości silników prądu stałego wykorzystują technikę modulacji szerokości impulsów fali prostokątnej zasilającej silnik - Pulse Width Modulation (PWM), co zapewnia bardzo wysokie właściwości funkcjonalne serwo mechanizmów wykonawczych. Stosując urządzenia przełączające w postaci układów tranzystorów mocy o podwyższonych własnościach typu MOSFET, napięcie zasilające silnik jest w odpowiedni sposób z wysoką stałą częstotliwością na przemian załączane i wyłączane. Induktancja i rezystancja własna silnika spełnia rolę filtra dolno-przepustowego i powoduje, że silnik jest zasilany pewną chwilową wartością napięcia skutecznego uśrednionego w czasie.

Z wykorzystaniem elementów podstawowych pokazanych na Rys.1. bazując na projektach zamieszczonych w [15], skonstruowano i wykonano szereg modeli dydaktycznych.

Na Rys. 2. pokazano prosty i łatwy w wykonaniu model manipulatora z ramieniem o schemacie kinematycznym typu *PUMA*. Ma on sumaryczną liczbę stopni swobody 5. Pierwszy stopień swobody jest obrotem względem pionowej osi kolumny. Trzy następne stopnie swobody są obrotami (zgięciami) kolejnych członów względem równoległych osi poziomych. Na końcu zamontowany jest chwytak ze szczękami zamykanymi przez mechanizm równoległowodowy w ten sposób, że szczęki podczas ruchu zamykania/otwierania zachowują stałą orientację względną. Są one wyposażone w elastyczne wykładki z gumy o wysokim współczynniku tarcia. Poszczególne stopnie swobody (pięć) są napędzane z zastosowaniem miniaturowych serwojednostek pokazanych na Rys.1, przy czym w opracowanym rozwiązaniu napędy zintegrowano z ażurową konstrukcją członów.



Rys. 2. Model prostego manipulatora wykonany z materiałów kompozytowych.

Człony manipulatora wykonano z lekkich płytek kompozytowych związanych w ażurową konstrukcję słupkami z tworzywa sztucznego. Manipulator jest prosty w konstrukcji i bardzo lekki.

3. STEROWNIKI BAZUJĄCE NA KONTROLERACH PIC

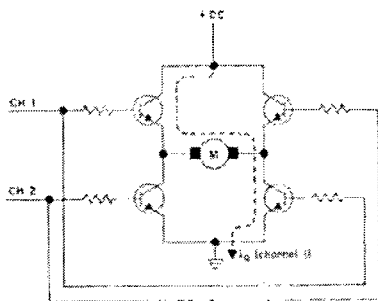
Jako układ sterowania wykorzystano sterownik bazujący na kontrolerze PIC. Na Rys. 3b. pokazano schemat układu szesnastokanałowego sterownika. Jego zadaniem jest wykonywanie krok po kroku kolejnych instrukcji według opracowanego przez użytkownika programu zawartego w pamięci komputera. Wykonywanie kolejnych instrukcji powoduje zmiany w stanie mikrocontrolera, które mogą być wywołane zmianami wartości komórek pamięci, zmianami zawartości rejestrów wewnętrznych lub zmianami napięcia na linii połączenia z portem. Wykonywanie instrukcji zachodzi w wyznaczonym tempie i jest zsynchronizowane z częstotliwością zegara. Zegar wewnętrzny jest napędzany przez obwód zewnętrzny, który zawiera elektroniczny rezonator krystaliczny. Dla układu MC68HC11A0 wyjście zegara 8.000 MHz połączonego z linią XTAL i EXTAL jest dzielone przez 4 wytwarzając częstotliwość zegarową 2MHz.

Te same elementy składowe można wykorzystać w konstrukcji robotów mobilnych. Do napędu układu jezdnego serwojednostki napędowe z Rys. 1. należy jednak zmodyfikować w ten sposób, że zostaje usunięty potencjometr a poziom napięcia silnika wystero wywany sygnałem sterownika odpowiada prędkości zadanej silnika. Na Rys. 4. pokazano przykład robota mobilnego z manipulatorem z Rys. 2. i układem sterującym z Rys. 3. Rozwiązanie to zaprojektowali studenci kierunku *Automatyka i Robotyka* na Wydziale MEiL w Politechnice Warszawskiej w ramach prac Koła Naukowego Robotyki na podstawie informacji uzyskanych w [15].

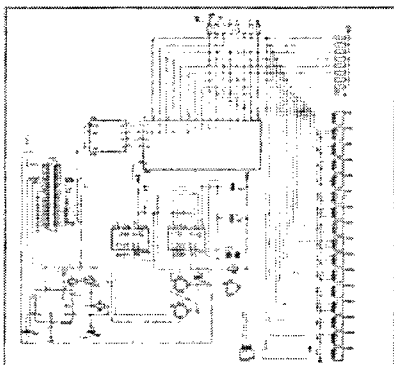
Model stanowi platforma mobilna napędzana dwoma silnikami z przekładniami sterowanymi prędkościowo. Przez zmianę różnicy faz między prawym i lewym kołem, trajektoria robota ulega odpowiedniemu zakrzywieniu na ścieżce ruchu. Programowanie robota polega na zdefiniowaniu zbioru instrukcji z wykorzystaniem bardzo prostego języka programowania i może odbywać się na drodze uczenia z aktualną kontrolą realizacji kolejnych instrukcji lub off line przez zapisanie zbioru instrukcji do pliku i następnie sekwencyjne ich wywoływanie.

Język programowania został opracowany specjalnie do potrzeb sterowania modelami robotów z serwojednostkami jak na Rys. 1. i zapewnia sterowanie współrzędnymi przegubowymi robota w trybie od punktu do punktu – Point To Point (PTP). W szczególności jest zadawana pozycja końcowa wektora współrzędnych i prędkość przejścia do następnej pozycji w danym kroku instrukcji. Początek i koniec ruchu, czasy oczekiwania na następną instrukcję, sekwencje wielokrotne zbioru instrukcji programu oraz zakończenie programu wymagają instrukcji specjalnych.

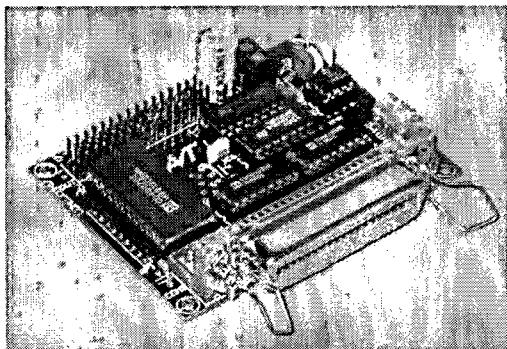
Może on być adoptowany stosownie do potrzeb użytkownika, na przykład możliwe jest uzupełnienie systemu sterującego o model kinematyki robota i jego programowanie np. we współrzędnych kartezjańskich.



a)



b)



c)

Rys. 3. Kontroler bazujący na sterowniku PIC do sterowania modeli robotów z użyciem komputera PC:

➤ a) tranzystorowy mostek elektroniczny do sterowania silnikami,

b) schemat elektroniczny kontrolera PIC,

c) jednostka sterująca

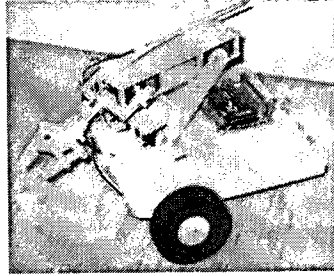


Fig. 4. Model dydaktyczny robota mobilnego

4. MANIPULATOR RÓWNOLEGŁY POLMAN-6.

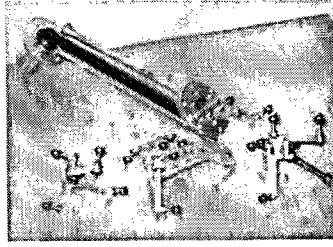
Metody projektowania, konstruowania i budowy tanich modeli do celów dydaktycznych przedstawione w dwóch poprzednich rozdziałach wykorzystano praktycznie w bardziej zaawansowanych rozwiązaniach związanych z inwencją twórczą w zakresie manipulatorów równoległych. Gotowe elementy o niskiej cenie handlowej można wykorzystać przy wykonywaniu prototypów nowych rozwiązań manipulatorów takich robotów. Warto zaznaczyć, że typowe manipulatory równoległe o strukturze bazującej na tzw. *Platformie Stewarta* (Stewart Platform Mechanism – SPM) nadają się do unoszenia relatywnie dużych ciężarów, charakteryzują się wysoką sztywnością na dowolnych kierunkach w przestrzeni i wysoką precyzją realizacji trajektorii, do wad tych manipulatorów należy zaliczyć małe zakresy ruchów przemieszczeń w stosunku do wymiarów przestrzeni zajmowanej przez manipulator oraz przede wszystkim małe zakresy ruchów kątowych platformy ruchomej. Istotnym czynnikiem konstrukcji manipulatorów równoległych jest modułowość. Możliwość prowadzenia badań doświadczalnych na obiektach sterowanych wykonanych z tanich, ogólnie dostępnych elementów może przyczynić się do lepszego zrozumienia ich działania oraz poszerzenia wiedzy w tej nowej, intensywnie uprawianej w ostatnich latach dziedzinie robotyki, przy czym badania na modelach wirtualnych tak chętnie ostatnio wykorzystywanych w projektowaniu nie zawsze są w tym zakresie wystarczające, szczególnie gdy celem jest wyjaśnienie trudnych zagadnień charakterystycznych dla skomplikowanych konstrukcji, jakimi na pewno są manipulatory równoległe. Podczas, gdy w manipulatorach z układami nośnymi (ramionami) o strukturze tzw. otwartych łańcuchów kinematycznych ustaliły się standardy kilku najczęściej wykorzystywanych schematów kinematycznych, których właściwości dobrze poznano i możliwy obszar potencjalnego rozwoju wydaje się ograniczony, to manipulatory równoległe oferują bardzo szerokie spektrum nowych rozwiązań o potencjalnie bardzo dobrych i wartych poznania właściwościach, które mogą okazać się korzystne w dalszym rozwoju nowoczesnej produkcji.

Warto wyjaśnić, że w niektórych wypadkach możliwe jest kształtowanie podstawowych charakterystyk manipulatorów równoległych w sposób najodpowiedniejszy dla przewidywanych zastosowań już na etapie projektowania, na przykład możliwe jest uzyskanie dobrej manipulacyjności czy tzw. zręczności na najodpowiedniejszym pożądanym poziomie, jak też uniwersalności (wszechstronności) związanej z izotropowością charakterystyk kinematycznych i dynamicznych manipulatora, jeśli inżynier-konstruktor jest

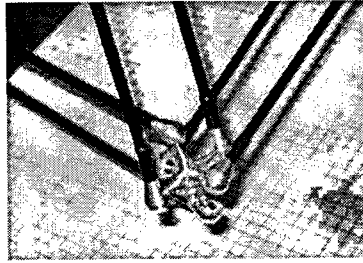
skłonny odpowiednio wykorzystać nowoczesne idee i metody dotyczące modelowania, analizy i syntezy nowoprojektowanej konstrukcji. Otwartość konstruktora na wykorzystanie nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych, np. materiałów kompozytowych, wymagających co prawda specjalnego podejścia w projektowaniu i określaniu warunków technologicznych ich procesu wytwarzania, jednak może to zaowocować uzyskaniem dobrych, lepszych niż przy wykorzystaniu materiałów klasycznych, właściwości konstrukcji. Na przykład odpowiednio wysoki poziom tłumienia konstrukcyjnego, pożądaný w wysokoobciążonych konstrukcjach szybkobieżnych jest bardzo trudny do uzyskania przy wykorzystaniu klasycznych materiałów konstrukcyjnych, podczas gdy poziom tego tłumienia w materiałach kompozytowych może być o jeden, dwa rzędy wielkości większy i możliwe jest tzw. strojenie konstrukcji w tym zakresie na etapie montażu konstrukcji.

Układ mechaniczny typowego manipulatora równoległego ma bardzo ważną właściwość: platforma ruchoma jest połączona z platformą podstawy lub układami napędowymi/transmisyjnymi za pomocą łączników (tłoczysk siłowników) obciążonych w głównej mierze siłami wzdłużnymi rozciągającymi/sciskającymi bez udziału sił/momentów gnących czy momentów skręcających. Przy zachowaniu wysokiej sztywności mechanizmu, wysokoobciążone główne elementy konstrukcyjne poddane jedynie rozciąganiu/sciskaniu mogą zostać zwymiarowane w ten sposób, że będą stosunkowo lekkie. W takiej konstrukcji obiekt uchwycony przez chwytak związany z platformą ruchomą jest manipulowany z wykorzystaniem energii pochodzącej bezpośrednio z układów napędowych, przy czym wartości sprawności przy przekazywaniu energii od silników do obiektu jak też od obiektu do silników w trakcie hamowania obiektu na trajektorii są bardzo wysokie, co w manipulatorach o strukturze szeregowej napędzanych silnikami z przekładniami o dużych wartościach współczynników przełożenia nie jest możliwe. Cecha ta zapewnia również bardzo wysokie właściwości w zakresie jakości realizacji trajektorii roboczych.

Aby łatwo sterować manipulatorem równoległym, korzystnym jest aby jego układ kinematyczny posiadał rozsprzężony model kinematyki, co oznacza, że rozwiązanie zadania prostego na położenia i orientację kątową nie są od siebie zależne i mogą być rozwiązywane niezależnie a co najwyżej w określonej kolejności; najpierw zadanie na położenia bez udziału współrzędnych orientacji a następnie z wykorzystaniem tego



a)



b)

Rys. 5. Podstawowe elementy składowe manipulatora POLMAN:

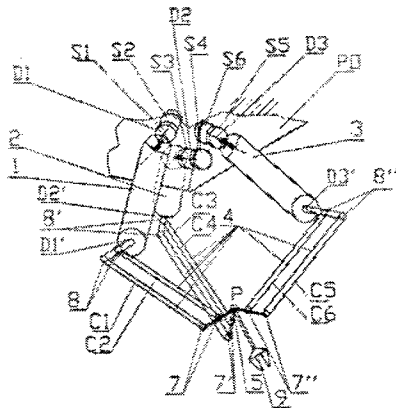
- a) równoległowod układu napędowo-transmisyjnego i różne kształty platformy ruchomej,
 b) platforma ruchoma z łącznikami

wyniku zadanie na orientację kątową platformy ruchomej. W manipulatorach o strukturze szeregowej, np. w robocie Irb-6 do rozsprzęgania kinematyki wykorzystuje się mechanizmy równoległowodowe. Są one najczęściej wykorzystywane w charakterze układów transmisyjnych. W konstrukcji manipulatorów równoległych możliwe jest również zastosowanie takich mechanizmów. Na rys. 6 pokazano schemat kinematyczny manipulatora POLMAN-6, w którym w szczególności zastosowano mechanizm równoległowodowy typu *parallel plate driver* wg. Chironisa [3].

Mechanizm manipulatora POLMAN-6 składa się z trzech korb 1, 2 i 3 zamocowanych bezpośrednio do wałów silników S1, S3 i S5, na końcu każdej korby są zamocowane tarcze D1', D2' i D3' z tzw. mostkami, do których zamocowano przegubowo (z zastosowaniem przegubów kulistych) po dwa łączniki C1-C2, C3-C4 i C5-C6, których drugie końce są również przegubowo związane z platformą ruchomą 5. Z każdą korbą jest związany mechanizm równoległowodowy (zapewniający przeniesienie napędu o współczynniku przełożenia 1:1) przenoszący napęd z silników S2, S4 i S6 na tarcze D1', D2' i D3' wywołujący przez wzajemne ruchy par łączników C1-C2, C3-C4 i C5-C6, zmianę orientacji kątowej platformy ruchomej 5. W prezentowanym rozwiązaniu uzyskano jeszcze inną ciekawą cechę: każda z korb 1,2,3 może realizować ruch obrotowy względem osi swoich silników napędowych bez ograniczeń konfiguracji, co może znaleźć praktyczne zastosowanie przy rozwiązywaniu zagadnień sterowania. Manipulator POLMAN ma sześć stopni swobody: trzy ruchy zmiany położenia w przestrzeni oraz trzy ruchy zmiany orientacji.

Dla zapewnienia dobrych tzw. izotropowych właściwości kinematycznych przeguby na platformie ruchomej rozmieszczono na sąsiednich krawędziach naroża sześciangu,

jak pokazano na Rys. 5 zaś wymiary korb i łączników oraz rozmieszczenie silników na podstawie dobrano tak, że w położeniu środkowym przestrzeni roboczej łączniki C1-C2, C3-C4 i C5-C6 są do siebie wzajemnie prostopadłe w przestrzeni, zaś korby w tym położeniu są prostopadłe do kierunku łączników. W tym położeniu możliwe ruchy składowe punktu P wywołane inkrementalnymi ruchami kątowymi każdego z silników S1, S3 lub S5 są realizowane na kierunkach wzajemnie prostopadłych, również ruchy składowe zmiany orientacji platformy 5 wywołane inkrementalnymi ruchami kątowymi każdego z silników S2, S4 lub S6 są obrotami platformy względem osi wzajemnie prostopadłych, związanych z platformą. Można powiedzieć, że manipulator ma właściwości kinematyczne zbliżone do robota kartezjańskiego z końcówką sferyczną.



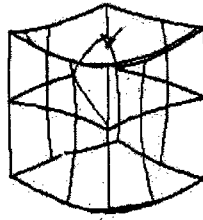
Rys. 6. Schemat kinematyczny manipulatora POLMAN-6

Należy zaznaczyć, że konstrukcja manipulatora składa się z trzech identycznych modułów o bardzo prostej budowie. Oryginalna konstrukcja oraz szczególny dobór schematu kinematycznego i parametrów geometrycznych powoduje, że właściwości kinematyczne manipulatora są zbliżone do właściwości manipulatora kartezjańskiego. Zakres przestrzeni roboczej pokazano na Rys. 7a). Jest to obszar przestrzeni zawarty pomiędzy sześcioma powierzchniami sferycznymi o promieniach równych długościom łączników i o środkach w punktach końcowych poszczególnych korb w ich skrajnych położeniach. Wyniki wstępnej analizy elipsoid manipulacyjności kinematycznej, które ilustruje rys. 7b) potwierdzają wysokie właściwości kinematyczne rozwiązania.

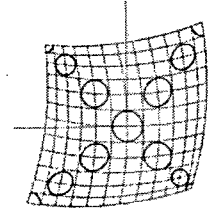
W rozwiązaniu skorzystano z doświadczeń twórcy robota DELTA [1] oraz robota opisanego w [6]

Zaprojektowane rozwiązanie charakteryzuje się bardzo prostym modelem kinematyki zarówno odwrotnej jak i prostej. Mimo prostej konstrukcji rozwiązanie nadaje się do prac w dydaktyce i poszerza obszar poznawczy w zakresie rozwiązań praktycznych.

Natomiast należy tutaj dodatkowo wyjaśnić, że w konstrukcjach typowych układów elektromechanicznych napędowych manipulatorów (np. z przekładniami o dużym współczynniku przełożenia kinematycznego i układami transmisyjnymi) istnieją pewne



a)



b)

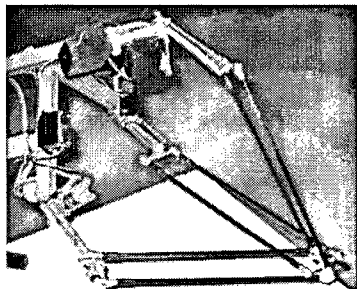
Rys. 7. a) Zakres przestrzeni roboczej manipulatora POLMAN-6
b) elipsoidy manipulacyjności kinematycznej na tle środkowego przekroju przestrzeni roboczej

problemy natury mechanicznej, bardzo trudne do rozpoznania i ewentualnej kompensacji, szczególnie, gdy manipulator ma realizować krótkie cykle pracy z dużą prędkością a więc z dużymi przyspieszeniami (wymuszeniami). Są to podatność mechaniczna, luzy mechaniczne, opory ruchu (tarcie), histereza mechaniczna wywołana wzajemnym wpływem tarcia i podatności (LM - Lost Motion), zmienność bieżącej wartości momentów (sił) generowanych przez silniki napędowe ze zmianą współrzędnej (Torque Ripple), elastyczność kontaktowa (właściwości reologiczne) czy zużycie. Dla rozwiązania tych problemów (a właściwie ich uniknięcia) w miejsce silników z przekładniami można przewidzieć wysokomomentowe silniki elektryczne np. napędu bezpośredniego Direct Drive i człony manipulatora można montować bezpośrednio do elementów napędowych (wałów, lub wózków) takich silników. W takich rozwiązaniach może z kolei pojawić się problem drgań konstrukcji, gdy jest ona wykonana z klasycznych materiałów polikrystalicznych o małym tłumieniu materiałowym, która jest poddawana skokowym wymuszeniom o wysokiej energii. Dla uzyskania właściwości konstrukcji korzystnych dla uzyskiwania dużych prędkości ruchu i dużej precyzji, korzystnym jest zastosowanie materiałów kompozytowych, np. w konstrukcji manipulatora równoległego łączników w postaci prętów wykonanych z włókna węglowego spajanego żywicą epoksydową. Materiał taki charakteryzuje się bardzo wysokim poziomem współczynnika tłumienia konstrukcyjnego i przy dużej sztywności i małej masie wysokim poziomem najniższej częstotliwości drgań własnych. Konstrukcja wykonana z takiego materiału jest znacznie bardziej odporna na możliwość wymuszenia drgań, można stosować większe poziomy przyspieszeń i prędkości maksymalnych, układ skuteczniej tłumia drgania powstałe w wyniku procesów przejściowych.

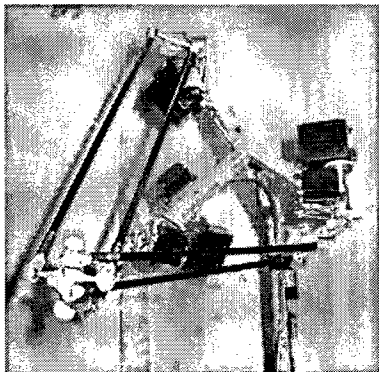
W wykonaniu modelowym manipulatora POLMAN-6 pokazanym na Rys. 8 zastosowano lekkie i sztywne rurki metalowo-kompozytowe z duraluminium pokrytego warstwą włókna węglowego. Przy wysokiej wytrzymałości charakteryzują się one dobrymi właściwościami tłumiącymi drgań. W konstrukcji manipulatora nie ma luzów, jest ona bar-

czo lekka i sztywna, do napędu zastosowano tanie jednostki napędowe modelarskie sterowane z zastosowaniem sterowników typu PIC i typowego komputera PC. Jako chwytak zastosowano ssawkę podciśnieniową współpracującą z typowym odkurzaczem domowym.

Opisany manipulator równoległy o sześciu stopniach swobody charakteryzuje się rozsprzężonym modelem kinematyki (pozycji/orientacji) i dobrymi tzw. izotropowymi



a)



b)

Rys. 8. Manipulator rwnoległy POLMAN-6:

a) widok z boku, b) widok z przodu

właścwościami kinematycznymi. Badania wstępne modelu-prototypu pokazały, że nadaje się on do prac laboratoryjnych z zakresu projektowania, konstruowania, naki sterowania i planowania zadań.

5. WNIOSKI

W artykule zaprezentowano kilka nowych koncepcji manipulatorów, których konstrukcje modelowe są możliwe do wykonania w skromnych warunkach laboratoryjnych czy pracowniach średnich szkół technicznych lub uczelni wyższych. Modele

te można wykorzystać w procesie dydaktycznym do kształcenia w zakresie projektowania konstrukcji, zasad pracy układów sterowania, programowania itp. Zaprezentowane rozwiązania były inspirowane pracami innych ośrodków [15] lub powstały jako wynik osiągnięć własnych autora we współpracy ze studentami z Koła Naukowego Robotyki na Wydziale MEiL Politechniki Warszawskiej. Warto podkreślić, że uzyskane rozwiązanie manipulatora równoległego POLMAN-6 może znaleźć zastosowanie praktyczne w produkcji przemysłowej na przykład jako robot o napędzie bezpośrednim (DIRECT DRIVE) do szybkiej manipulacji niewielkimi obiektami lub montażu. Rozwiązanie to jest tanie, proste i łatwe w obsłudze. Nadaje się również do wykorzystania w konstrukcji maszyn do tzw. szybkiego prototypowania.

Podziękowania:

Praca powstała w ramach prac własnych finansowanych ze środków JM Rektora PW w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej na Wydziale MEiL w Politechnice Warszawskiej w 2005 roku.

Materiały źródłowe:

- [1] Clavel R.: DELTA, a fast robot with parallel geometry, Proc. of the 18th Int. Symposium on Industrial robots, IFR Publications, 1988, pp. 91-100,
- [2] Clavel R.: Conception d'un robot parallele rapide a 4 degres de liberte, These No 925, (1991), Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne 1991,
- [3] Chironis N. P.: Mechanisms, Linkages and Mechanical Control, McGraw-Hill Book Company, 1965,
- [4] Fitzgerald J.M.: Evaluating the Stewart Platform for Manufacturing, Robotics Today, Vol. 6, No. 1, 1993,
- [5] Innocenti C., Parenti-Castelli V.: Direct Position Analysis of the Stewart Platform Mechanism, Mech. Mach. Theory, Vol. 25, No. 6, pp. 611-621, 1990,
- [6] Jacket P., Danescu G., Carvalho J., Dahan M.: A spatial Fully-Parallel Manipulator, Int. Conf. RoManSy'92, Udine, Italy, sign of a Very Fast 6-DOF Parallel Robot, proc. ISIR'92, Barcelona.
- [7] Matone R., Roth B.: Designing manipulators for both kinematic and dynamic isotropic properties, Proc. RoManSy'96,
- [8] Mianowski K.: 3-D Lever Mechanism of a robot of 6 Degrees of freedom, app. to the proc. of Fifth World Conf. on Robotics Research, Cambridge, Mass. 1994,

- [9] Mianowski K.: A 3-D Lever Parallel Mechanism of a Robot with 6 Degrees of Freedom, proc. of 6-th Int. Symp. Measurement and Control in Robotics, Brussels 1996, pp. 104-109,
- [10] Mianowski K.: Parallel manipulator with six degrees of freedom, Proc. V KKR, Wrocław 1996, (in polish),
- [11] Pierrot F., Dauchez P., Fournier A.: HEXA: a Fast six-DOF fully-Parallel Robot, IEEE Proc. 1991, Vol. 1, pp. 1158-1163,
- [12] Pollard W.L.V.: Positioning-Controlling Apparatus, US Patent No. 2,286,571,
- [13] Stewart D.: A Platform with Six Degrees of Freedom, Proc. Instn. Mech. Engrs. 1965-66, pp. 371-378,
- [14] Uchijama., Pierrot F., Dauchez P., Unno K., Toyama O.: A New De
- [15] www.lynxmotion.com- www page of robot kits,