

Andrzej ZBROWSKI, Tomasz GIESKO, Piotr CZAJKA
Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom

PRECYZYJNY MANIPULATOR O KINEMATYCE RÓWNOLEGŁEJ

Słowa kluczowe

Precyzyjne mechanizmy pozycjonujące, model kinematyczny, kinematyka równoległa, tripod.

Streszczenie

W artykule zaprezentowano strukturę i parametry precyzyjnego manipulatora o kinematyce równoległej z nieliniową charakterystyką mechanizmów napędowych. W systemie pozycjonowania zastosowano miniaturowe mechanizmy krzywkowe. Opracowane oprogramowanie umożliwia ustawianie podstawowych parametrów pracy manipulatora oraz zadawanie położenia końcowego platformy. Przedstawiono wyniki testów eksperymentalnych. Wyróżniającymi cechami manipulatora są wysoka dokładność i powtarzalność pozycjonowania przy jego dużej nośności.

1. Przedstawienie problemu

Pierwsze heksapody stosowane były głównie jako ruchome platformy symulatorów lotniczych i helikopterowych (platforma Stewarta) [1]. Rozwój techniki komputerowej umożliwił zastosowanie ich w obrabiarkach jako pozycjonery elektrowrzecion [2–4]. Ostatnie lata to przede wszystkim próby wykorzystania kinematyki równoległej w konstrukcji układów manipulacyjnych. Najczęściej w tej grupie spotykane są rozwiązania mechanizmów o zmiennej długości członów napędowych. Układy takie stosowane są w małych manipulatorach

wykorzystywanych w badaniach laboratoryjnych, np. w optyce do pozycjonowania soczewek i zwierciadeł oraz jako manipulatory chirurgiczne. Duże konstrukcje tego typu znajdują zastosowanie jako pozycjonery anten satelitarnych i teleskopów [5, 6]. W takich manipulatorach stosowana jest kinematyka heksapodu lub tripodu. Istnieją także mikropozycjonery o submikronowej dokładności pozycjonowania, których zasada działania wykorzystuje idę mechanizmu z członami napędowymi o stałej długości. Mikroprzemieszczenia platformy są efektem działania piezoelektrycznych aktuatorów liniowych, poruszających człony napędowe, będące integralną częścią ciała sztywnego [7–9].

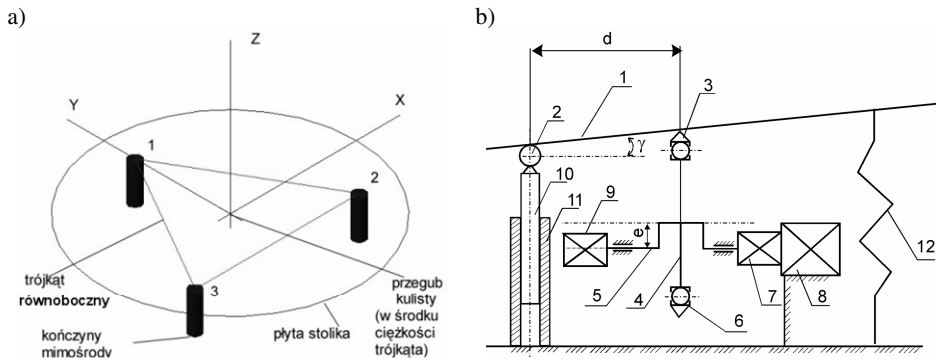
W Polsce prace nad zastosowaniem kinematyki równoległej w urządzeniach miniaturowych nie znalazły dotychczas egzemplifikacji w postaci prototypu.

Celem prac było opracowanie manipulatora o strukturalnie prostszym łańcuchu kinematycznym, charakterystycznym dla rozwiązań stosowanych w mechanice precyzyjnej. Uproszczenie łańcucha kinematycznego przyczynia się do zwiększenia dokładności pozycjonowania oraz zmniejszenia stosunku gabarytów i masy manipulatora do przestrzeni roboczej.

2. Struktura kinematyczna

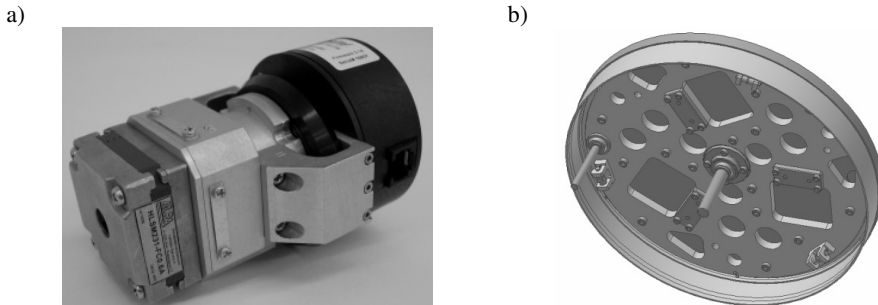
Opracowana struktura manipulatora jest układem modułowym typowym dla systemów o kinematyce równoległej. Efektor manipulatora posiada trzy stopnie swobody: przesuw w kierunku pionowym oraz obroty wokół dwóch wzajemnie prostopadłych osi, leżących w płaszczyźnie poziomej.

W konstrukcji zastosowano trzy jednakowe moduły kończyn czynnych rozmieszczonych pod płytą efektora w wierzchołkach trójkąta równobocznego (rys. 1a). Moduł kończyny (rys. 1b) składa się z silnika krokowego (8) napędzającego redukcyjną przekładnię falową (7). Na osi przekładni znajduje się wał (5) z tarczą mimośrodową (4), na której osadzone jest łożysko kulkowe (6). Na zewnętrznym pierścieniu łożyska zamocowany jest pierścień nożowy (3), umożliwiający jednoznaczne osadzenie płyty stolika na kończynie. Za mimośrodem, na wale zdawczym reduktora, znajduje się enkoder absolutny (9) do odczytu kąta obrotu wału zdawczego przekładni falowej. Układ, w którym płyta stolika oparta jest na przegubie kulistym oraz styka się w odległości d od osi przegubu z obracającym się mimośrodem, odpowiada strukturze wahaczowego mechanizmu mimośrodowego. W przedstawionym rozwiązaniu konstrukcja mechanizmu krzywkowego została zmodyfikowana tak, aby tarcie ślizgowe w parze mimośród–wahacz zostało zastąpione, korzystniejszym w tym przypadku, tarcie tocznym [10]. Uzyskanie prowadnicy tocznej zostało zrealizowane po wprowadzeniu pełnego obiegu kulek (wałeczków), zamkniętych dodatkowym zewnętrznym pierścieniem wokół krążka krzywki (rys. 1b). W praktyce przedstawione rozwiązanie zrealizowano poprzez osadzenie tocznego łożyska kulkowego na wale mimośrodowym.



Rys.1. Schemat mechanizmu mimośrodkowego zastosowanego do pozycjonowania płyty stolika:
 a) rozmieszczenie kończyn czynnych, b) struktura mechanizmu
 1 – płyta stolika, 2 – przegub kulisty, 3 – pierścienie na łożysku, 4 – łożysko kulkowe,
 5 – wał mimośrodkowy, 6 – kulka łożyskowa, 7 – przekładnia redukcyjna, 8 – silnik krokowy,
 9 – enkoder absolutny, 10 – trzpień ruchomy, 11 – tuleja prowadząca, 12 – sprężyna naciągowa boczna

Na kończynach (rys. 2a) spoczywa moduł efektora (rys. 2b), którego końcowym elementem jest blat stolika.

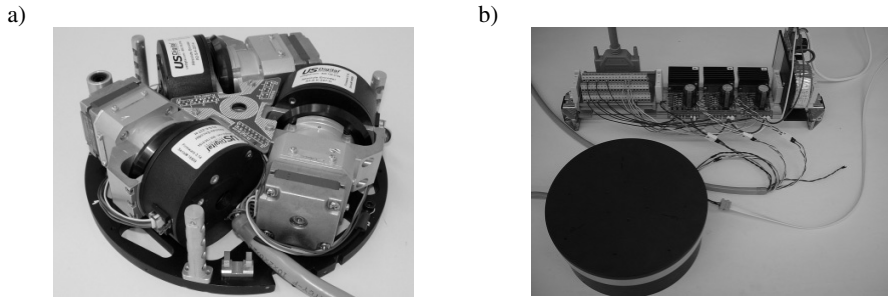


Rys. 2. Moduły manipulatora: a) moduł kończyny, b) moduł efektora

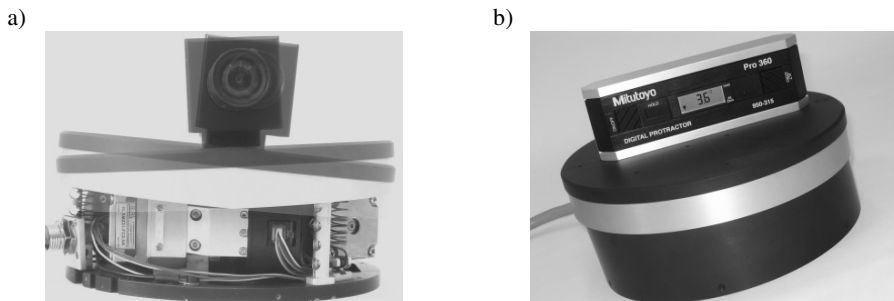
Kompletny układ napędowy składający się z kończyn zamocowanych na podstawie przedstawia rys. 3a.

Kompletny manipulator z widocznym rozdziałem na część mechaniczną i sterującą przedstawia rys. 3b. Elementy układu sterowania w postaci zestawu sterowników silników krokowych, terminalu karty silników krokowych oraz zasilacza zgrupowano w postaci jednego modułu na szynie montażowej.

Zakres roboczy manipulatora z zamocowaną kamerą oraz ustawioną poziomą ilustruje rys. 4.



Rys. 3. Manipulator: a) układ napędowy, b) manipulator z systemem sterowania



Rys. 4. Zakres roboczy manipulatora: a) pozycjonowanie kamery, b) pomiar poziomicą

3. Oprogramowanie

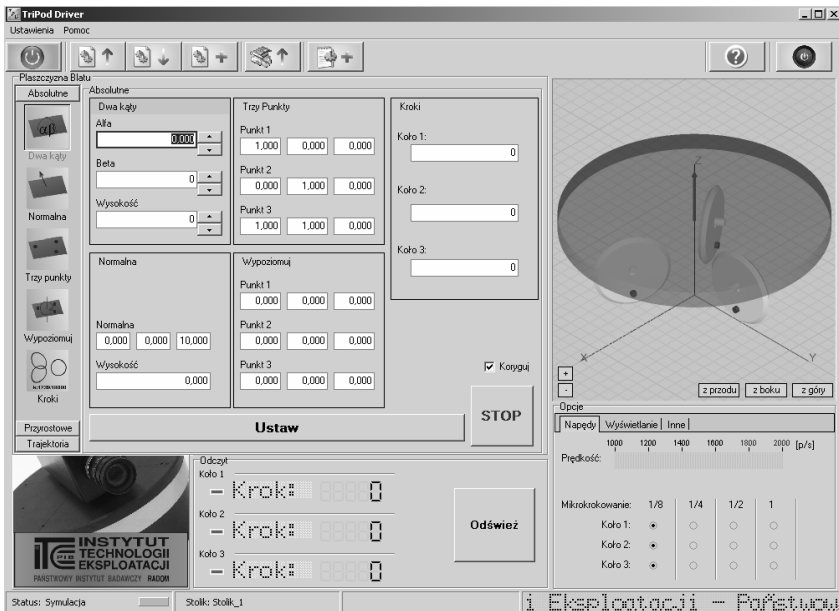
Oprogramowanie manipulatora umożliwia sterowanie efektorom w kinematyce odwrotnej. Kinematyka prosta jest wykorzystana do wizualizacji położenia wirtualnego efektora w osobnym oknie podglądu. Oprogramowanie sterujące pracuje z zastosowaniem opracowanego matematycznego modelu konstrukcji.

Pozycja efektora może być zadawana absolutnie lub przyrostowo. Możliwy jest także wybór konturu trajektorii dla wektora normalnego płaszczyzny efektora. We współrzędnych absolutnych możliwe jest zdefiniowanie płaszczyzny zadanej pięcioma sposobami:

- przez podanie kątów obrotu wokół osi X i Y oraz wzniesienia ponad punkt neutralny (α , β , h),
- przez podanie współrzędnych wektora normalnego płaszczyzny zadanej oraz wzniesienia ponad punkt neutralny,
- przez podanie współrzędnych trzech punktów, na których rozpięta jest płaszczyzna zadana,

- przez podanie trzech punktów leżących na płaszczyźnie, która ma być wypoziomowana,
- przez podanie trzech kątów maszynowych manipulatora (kątów obrotu krzywek).

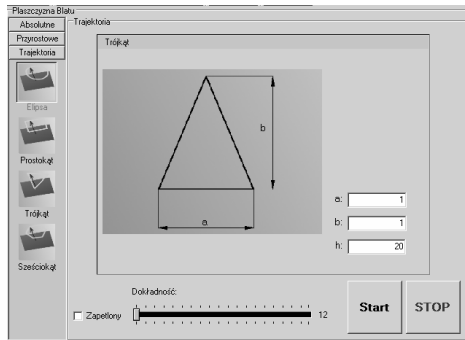
Oprogramowanie umożliwia płynną zmianę prędkości pozycjonowania oraz wybór pomiędzy czterema rodzajami krokowania (mikrostepping). Okno główne interfejsu operatora zawiera zakładki definiowania pozycji efektora we współrzędnych absolutnych (rys. 5).



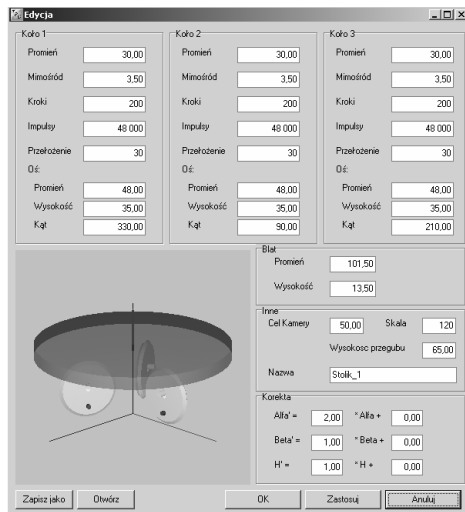
Rys. 5. Okno główne interfejsu operatora

Program sterujący umożliwia planowanie trajektorii (rys. 6). Trajektorią stanowi hodograf wektora normalnego do płaszczyzny efektora. Realizowana jest metodą PTP, tj. dla zadanego konturu generowany jest zbiór punktów podporowych, leżących na zadanym konturze. W danym kroku odtwarzania trajektorii manipulator realizuje ruch do bieżącego punktu podporowego. Po jego osiągnięciu wyzwala się kolejny krok trajektorii – położeniem zadanym staje się kolejny punkt podporowy. Pomiędzy punktami podporowymi trajektoria jest nieokreślona.

Oprogramowanie zapewnia parametryzację modelu matematycznego według zadanych wielkości (rys. 7). Funkcja ta jest szczególnie użyteczna na etapie strojenia modelu podczas kalibracji, w celu uzyskania właściwej charakterystyki i dokładności pozycjonowania.



Rys. 6. Okno wyboru trajektorii

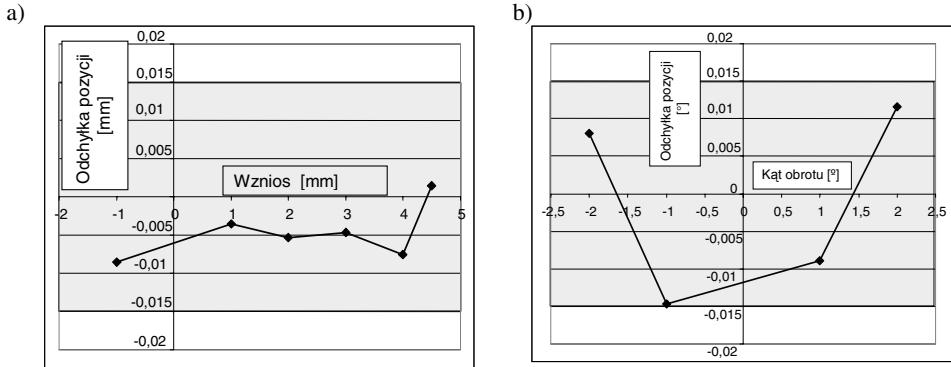


Rys. 7. Okno edycji parametrów modelu matematycznego

4. Parametry systemu

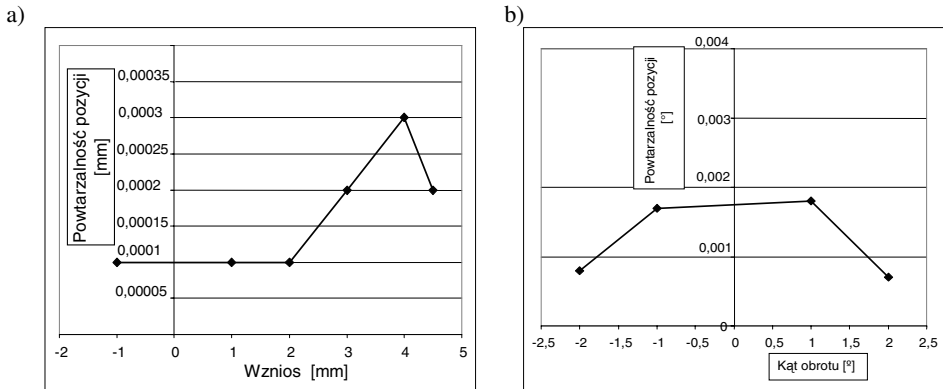
Badania eksperymentalne dotyczące pozycjonowania przeprowadzono z wykorzystaniem numerycznej maszyny pomiarowej. Celem przeprowadzonych badań było określenie wartości podstawowych parametrów manipulatora. Badania zrealizowano dla manipulatora pracującego bez obciążenia oraz obciążonego masą 5 kg. Na maszynie pomiarowej przeprowadzono wstępne badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania w ruchu postępowym i obrotowym. Wstępne wyznaczenie dokładności manipulatora limitowane było dokładnością maszyny pomiarowej, wynoszącą $\pm 2 \mu\text{m}$. Ostateczne, weryfikujące badania przeprowadzono na specjalnym stanowisku do badań eksperymentalnych, oferującym dokładność pomiarową $0,25 \mu\text{m}$.

Odchyłki dokładności pozycjonowania efektora zarejestrowane podczas badań eksperymentalnych przedstawia rys. 8. W wyróżnionym obszarze wykresu zaznaczono dopuszczalną szerokość pasma tolerancji dla odchyłek pozycji.



Rys. 8. Dokładność pozycjonowania manipulatora: a) w ruchu postępowym, b) w ruchu obrotowym

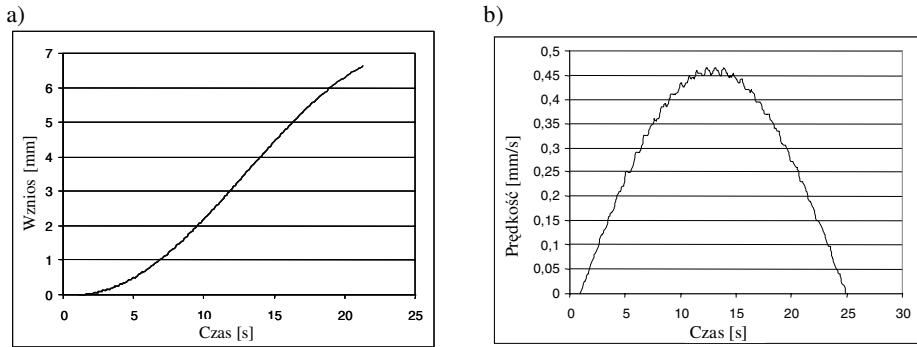
Zarejestrowaną powtarzalność pozycjonowania efektora przedstawia rys. 9.



Rys. 9. Powtarzalność pozycjonowania manipulatora: a) w ruchu postępowym, b) w ruchu obrotowym

Na podstawie zarejestrowanych wyników sporządzono charakterystyki kinematyczne efektora w ruchu postępowym wzdłuż osi Z (rys. 10).

Po przeprowadzeniu weryfikacji w układzie nie pojawiły się dodatkowe zakłócenia spowodowane zwiększonymi luzami łańcucha kinematycznego. Algorytmy sterowania poprawnie realizowały wyznaczone zadania. Pozycja efektora była uzyskiwana powtarzalnie.



Rys. 10. Charakterystyka kinematyczna efektora: a) wznios w ruchu postępowym, b) prędkość w ruchu postępowym

W trakcie zrealizowanych badań eksperymentalnych wyznaczono podstawowe parametry manipulatora:

- zakres pozycjonowania w ruchu postępowym – 7 mm,
- zakres pozycjonowania w ruchu obrotowym – 8° ,
- szybkość pozycjonowania w ruchu postępowym do 0,5 mm/s,
- szybkość pozycjonowania w ruchu obrotowym do $0,7^\circ/\text{s}$,
- dokładność pozycjonowania w ruchu postępowym – 0,01 mm,
- dokładność pozycjonowania w ruchu obrotowym – $0,01^\circ$,
- powtarzalność pozycjonowania w ruchu postępowym – 1 μm ,
- powtarzalność pozycjonowania w ruchu obrotowym – $0,002^\circ$,
- rozdzielczość – 0,25 μm ,
- nośność manipulatora – 5 kg,
- ciężar manipulatora – 4,7 kg.

Podsumowanie

W opracowanym manipulatorze zamiana ruchu obrotowego aktuatora na postępowy efektor realizowana jest w strukturalnie prostszym łańcuchu kinematycznym niż rozwiązania z napędami liniowymi. Uproszczenie łańcucha kinematycznego przyczynia się do zwiększenia dokładności pozycjonowania oraz zmniejszenia niekorzystnego stosunku gabarytów i masy manipulatora do przestrzeni roboczej. Wzrost rozwiązania przejawia się także w możliwości doboru parametrów modelu matematycznego, w zależności od dokładności wykonania i montażu poszczególnych podzespołów, w celu dokładnej kalibracji urządzenia. Ze względu na zastosowanie mimośrodków charakterystyka wzniosu kończyn oraz efektor jest nieliniowa.

Możliwość wykorzystania opracowanego precyzyjnego systemu pozycjonowania obejmuje działy nauki i techniki, w których wymagane jest dokładne pozycjonowanie obiektu np.:

- w mikroskopowych układach obserwacji oraz systemach skanujących dwu- i trójwymiarowych,
- w systemach optycznych (pozycjonowanie zwierciadeł, pryzmatów, soczewek, filtrów, np.: w ławach optycznych),
- poziomowanie obiektu w systemach niwelacyjnych,
- w systemach żyroskopowych,
- w systemach śledzenia i wskazywania celu.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, wykonana w ramach realizacji Programu Wieloletniego pn. „Doskonalenie systemów innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008”.

Bibliografia

1. Steward D.: A platform with six degrees of freedom. Proc. Institution of Mechanical Engineers, 180/1965 s. 371–386.
2. Oczóś K., Weiss E.: Kinematyki równoległe w budowie obrabiarek, robotów i manipulatorów. Część I. Mechanik 5–6/2002, s. 323–333.
3. Oczóś K., Weiss E.: Kinematyki równoległe w budowie obrabiarek, robotów i manipulatorów. Część II. Mechanik 7/2002, s. 489–498.
4. Koch T., Iżykowski S.: Zastosowanie kinematyk równoległych w budowie obrabiarek. Mat. Konf. Manufacturing '01 – Współczesne problemy wytwarzania. T. 1, s. 113–119. 8–9 listopada 2001, Poznań.
5. <http://www.hexapods.net/hexapod.htm>.
6. Husty M.L., Eberharter J.K.: Kinematic Analysis of the Hexapod Telescope. http://www-sop.inria.fr/coprin/EJCK/Vol1-1/25_husty.pdf.
7. <http://155.69.254.10/users/risc/www/ultra-intro.html>.
8. Ham, H. H., Chen, I.-M.: Kinematics, Workspace And Static Analyses of Two DOF Flexure Parallel Mechanism. 7th Int Conf. Control, Automation, Robotics, Vision, Singapore, pp 968–973, 2002.
9. <http://www.physikinstrumente.de/pdf/ParMetr2.pdf>.
10. Zbrowski A.: Analiza kinematyczna modelu mechanizmu funkcjonalnego w precyzyjnym stoliku obrotowym. Problemy Eksploatacji 2005 nr 1, s. 61–72.

Recenzent:

Stanisław MICHAŁOWSKI

Precision manipulator with parallel kinematics

Key words

Precision positioning mechanism, kinematic model, parallel kinematics, tripod.

Summary

The structure and the parameters of the precision manipulator based on the parallel kinematics and non-linear actuators are presented in the article. Miniature cam mechanisms were used as actuators in the positioning system. The developed software enables one to set up the basic parameters of the manipulator and the end position of the platform. The results of the experimental tests of the manipulator are presented. The high positioning accuracy and repeatability with the considerable load capacity are the manipulator's distinguishing features.