

Manipulator POLMAN-3x2 do zastosowań neurochirurgicznych

Krzysztof Mianowski

POLMAN-3x2 to manipulator o strukturze równoległej własnej konstrukcji. Manipulatory takie pojawiły się już w praktyce klinicznej jako ważne elementy składowe zrobotyzowanych systemów operacyjnych. Prezentowana konstrukcja jest rozwiązaniem dedykowanym do prowadzenia operacji neurochirurgicznych z zastosowaniem nowoczesnych technik operacyjnych i wykorzystaniem nowoczesnych technologii.

W wykorzystanie różnego rodzaju manipulatorów w medycynie systematycznie rośnie. Jest to związane z wygodą i ogólnym usprawnieniem pracy lekarza oraz znacznym zmniejszeniem nakładów. Roboty medyczne są wykorzystywane do:

- asystowania w zabiegach chirurgicznych,
- do obsługi szpitalnej,
- w rehabilitacji.

Zastosowanie zdalnie sterowanych robotów i telemanipulatorów w chirurgii stało się możliwe w ostatnich latach dzięki dynamicznemu rozwojowi komputerowych metod tworzenia obrazów (*imaging methods*). Metody te są stosowane zarówno w procesie diagnostycznym jak i przy prowadzeniu operacji. Zastosowanie endoskopów i laparoskopów pozwala chirurgowi na dokładną obserwację organów wewnętrznych w sposób bezpośredni lub przez elektroniczne przetworzenie obrazów graficznych. Niezależnie od tego szczególnie do celów diagnostycznych stosuje się tomografię komputerową i rezonans magnetyczny. Uzyskana w ten sposób informacja diagnostyczna, dotycząca np. wielkości, położenia i usytuowania rozpoznawanego schorzenia staje się podstawowym elementem składowym dokumentacji medycznej (np. w postaci taśmy wideo) i pozwala planować operacje przez zespół operacyjny z odpowiednim wyprzedzeniem czasowym. Metody te pozwalają także na przesyłanie obrazów na duże odległości z wykorzystaniem Internetu nawet w czasie rzeczywistym, co przy wykorzystaniu do prowadzenia operacji zdalnie sterowanych teleoperatorów (robotów) pozwala na rozszerzenie konsylium lekarskiego, wykorzystanie wiedzy szerszego gremium medycznego i ma duże znaczenie dydaktyczne. Uzyskane metodami tomograficznymi trójwymiarowe obrazy można w prosty sposób porównywać ze standardowymi obrazami stworzonymi w opracowanych tymi samymi metodami nowoczesnych atlasach anatomicznych. Zarówno diagnoza jak i planowanie leczenia przed operacją jest w tym wypadku znacznie uproszczone i daje lepsze rokowania.

Roboty medyczne do wspomagania operacji chirurgicznych są stosowane do teleoperacji, teleprezencji, mogą być sterowane bez użycia rąk, tj. w sposób automatyczny, szczególnie w zakresie precyzyjnych czynności powtarzalnych. Niezależnie od tego mogą być wykorzystywane jako lokalizatory zarówno pasywne, jak i częściowo lub całkowicie aktywne.

Operacja chirurgiczna wspomagana zastosowaniem robota jak i operacja wykonywana zdalnie przez chirurga z jednoczesną obserwacją za pomocą kamery laparoskopowej lub endoskopowej przebiega w trzech fazach:

- planowanie przedoperacyjne, w trakcie którego chirurg planuje operację z wykorzystaniem trójwymiarowych obrazów uzyskanych za pomocą kamery stereowizyjnej, porównując uzyskane obrazy z odpowiednim trójwymiarowym modelem komputerowym. W tej fazie ustala się optymalną strategię planowanej operacji i rejestruje się ją w pamięci komputera centralnego oraz przygotowuje się programy sterujące pracą robota;
- planowanie operacji z użyciem robota (telemanipulatora): pierwszą czynnością prowadzonej operacji jest synchronizacja i kalibracja układów pomiarowych i wykonawczych robota względem pacjenta, tj. charakterystycznych anatomicznych punktów operacyjnych, ustalenie pola pracy robota i ustalenie właściwych bezwzględnych i lokalnych układów odniesienia;
- zasadniczy zabieg operacyjny: robot realizuje zaplanowane zadania pod nadzorem chirurga, podczas gdy w trakcie zabiegu procedury operacyjne są interaktywnie kontrolowane z wykorzystaniem odpowiednich układów sensorycznych. Przebieg operacji jest – poza chirurgiem prowadzącym – obserwowany i korygowany w sposób automatyczny przez odpowiednie procedury komputera głównego; nad bezpieczeństwem pacjenta czuwa komputerowy system bezpieczeństwa oraz zespół operacyjny.

Należy podkreślić, że operacja jest prowadzona przez lekarza-operatora, który w zależności od jej przebiegu podejmuje zasadnicze decyzje co do dalszej kontynuacji z zastosowaniem robota lub w razie potrzeby przerywa ją i kontynuuje pracę metodami klasycznymi.

Dr inż. Krzysztof Mianowski – ITLiMS Politechnika Warszawska

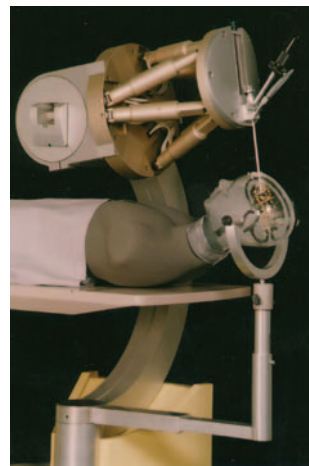
Ogólne wymagania stawiane konstrukcjom manipulatorów robotów medycznych

Manipulator robota-telemanipulatora przeznaczonego do prowadzenia operacji chirurgicznych musi spełniać specjalne wymagania w szczególności dotyczące dokładnego odtwarzania trajektorii zadawanych ręcznie przez lekarza-operatora i przetwarzanych na sygnały sterujące ruchami narzędzia endoskopowego. Podstawowe właściwości manipulatora są związane z zastosowanym schematem kinematycznym, długościami poszczególnych członów, rozkładem mas, rodzajem i wielkością układów napędowych oraz charakterystykami zastosowanych układów regulacyjnych. Konstruktor w procesie projektowania musi uwzględniać wiele, często będących ze sobą w sprzeczności warunków. Zastosowanie manipulatorów o strukturze równoległej pozwala na korzystniejsze niż w wypadku typowych manipulatorów o strukturze szeregowej kształtowanie takich właściwości manipulatora jak np. współczynniki sztywności w odniesieniu do rozmiarów podstawowych elementów. Ponadto już na etapie doboru schematu kinematycznego i podstawowych parametrów geometrycznych manipulatora możliwe jest łatwiejsze kształtowanie właściwości kinematycznych dotyczących rozkładów prędkości liniowych i kątowych końcówki w obszarze przestrzeni roboczej; właściwość ta pozwala również na racjonalne kształtowanie dokładności manipulatora w zakresie całej przestrzeni roboczej lub określonych jej podobszarów. W projekcie manipulatora równoległego możliwe jest łatwe dopasowanie bieżącego podobszaru przestrzeni roboczej do planowanego zadania oraz wybór podobszaru o najlepszych własnościach dla aktualnie realizowanego zadania. Przykładem takiego rozwiązania jest prezentowany manipulator POLMAN-3x2 o schemacie kinematycznym zawierającym w układach napędowych równoległowodę płaskie służące do transmisji napędu z silników montowanych na podstawie manipulatora. Zastosowany układ mechaniczny charakteryzuje się wysokimi własnościami kinematycznymi i dynamicznymi, co jest związane z dobrymi tzw. izotropowymi własnościami prędkości i przyspieszeń rozwijanych przez końcówkę. Podstawowymi zaletami rozwiązania jest prostota i lekkość konstrukcji. W związku z tym możliwe jest zastosowanie nowoczesnych jednostek napędowych, jak np. silników tzw. napędu bezpośredniego DD (*Direct Drive*).

Należy podkreślić, że w rozważaniach nad własnościami mechanizmów manipulatorów należałoby rozstrzygnąć co oznacza pojęcie „dobry manipulator”. W odniesieniu do manipulatorów robotów chirurgicznych opinii, czy opracowane rozwiązanie jest dobre można będzie sformułować dopiero po wykonaniu prototypu i wprowadzeniu go do praktyki klinicznej, a następnie zbadaniu, czy rozwiązanie jest w pełni akceptowane przez lekarzy. Konstruktor musi jednak już na etapie projektowania prototypu podejmować decyzje co do doboru określonych parametrów zgodnych z założeniami sformułowanymi na podstawie zgrubnych oszaco-

wań wstępnych oczekiwanych (typowych) warunków pracy manipulatora. W związku z tym należy tu np. uwzględnić zbiór typowych zadań obsługiwanych i realizowanych przez manipulator. Jednak projekt zupełnie nowego rozwiązania dotyczącego nowych zastosowań powinien spełniać również warunki zapewniające pokonywanie barier ograniczających stosowanie nielicznych istniejących konstrukcji. W tym względzie rozwój robotów medycznych nie osiągnął jeszcze takiego stanu rozwoju, przy którym można byłoby dysponować niezbędnymi, odpowiednio udokumentowanymi danymi nawet w zakresie podstawowych założeń konstrukcyjnych. Warto dodać, że również wiedza na temat manipulatorów robotów przemysłowych w tym zakresie nadal nie jest dostatecznie dobrze usystematyzowana i ugruntowana. Jest to spowodowane brakiem dostępu do danych dotyczących konstrukcji będących własnością firm przemysłowych, które starają się nie udostępniać ich innym firmom, stanowiących dla nich potencjalną konkurencję.

W związku z tym jako jedno z podstawowych założeń dotyczących pożądaných właściwości manipulatora i ich kształtowania w procesie projektowania przyjęto zdolność do generowania prędkości końcówki o wartościach porównywalnych na różnych kierunkach w przestrzeni. Warunek ten oznacza również zdolność do generowania błędów końcówki manipulatora wynikających z rozdzielczości układów pomiarowych o porównywalnych wartościach na różnych kierunkach w przestrzeni. Kolejnym założeniem jest sztywność manipulatora; racjonalnym jest postawienie warunku, aby współczynniki sztywności określone dla różnych kierunków obciążania końcówki miały porównywalne wartości liczbowe.

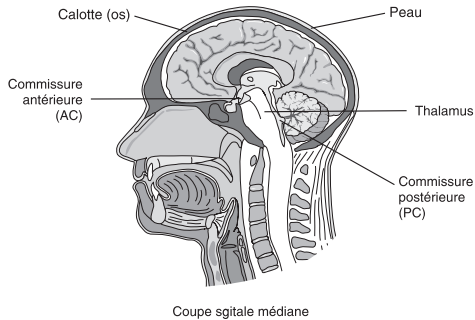


Rys. 1. Koncepcja stanowiska do operacji neurochirurgicznych z wykorzystaniem manipulatora typu Platforma Stewarta

Odrębnym zagadnieniem istotnym dla celów sterowania jest konieczność wyznaczania bieżących wartości współrzędnych sterujących w zależności od współrzędnych bezwzględnych i odwrotnie. Niestety dla typowego manipulatora równoległego typu Platforma Stewarta wykorzystywanego w rozwiązaniach medycznych (rys. 1), zadanie proste kinematyki polegające na wyznaczeniu współrzędnych końcówki na podstawie współrzędnych napędowych jest w formie ogólnej bardzo skomplikowane (patrz [3]). W związku z tym taka jego forma nie nadaje się ani do wykorzystania w projektowaniu ani w szczególności do sterowania manipulatorem. Możli-

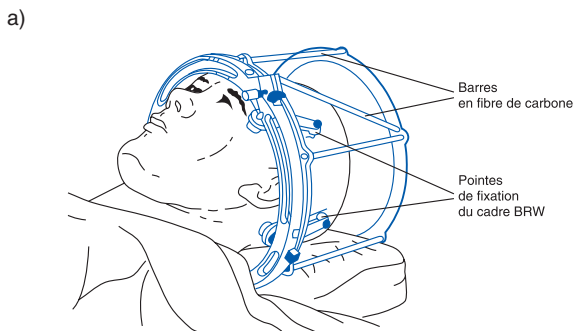
we jest co prawda modyfikowanie konstrukcji dające w efekcie możliwość uproszczenia modelu kinematyki, który może mieć wówczas zamkniętą postać analityczną, jednak wymaga to zastosowania skomplikowanych, nietypowych rozwiązań układów mechanicznych [13] zawierających z reguły bardzo skomplikowane rozwiązania konstrukcyjne elementów.

Ogólna koncepcja operacji neurochirurgicznych z zastosowaniem robotów-telemanipulatorów



Rys. 2. Ogólna koncepcja prowadzenia operacji neurochirurgicznych [15] obszar pola operacyjnego ograniczonego czaszką

Jednym z pierwszych rozwiązań zrobotyzowanych systemów medycznych było stanowisko operacyjne z robotem do prowadzenia operacji chirurgicznych (neurochirurgicznych) na mózgu, opracowane w ramach programu MINERVA na Politechnice w Lozannie. Cała operacja musi być wykonywana przez robot, gdyż okresowo jest uruchamiany tomograf komputerowy, którego promieniowanie szkodziłoby lekarzom. W trakcie operacji głowa pacjenta musi być unieruchamiana względem stołu operacyjnego za pomocą specjalnych trzymaków wykonanych z materiałów kompozytowych. Jest to konieczne do prowadzenia operacji przez robota w pomieszczeniu, w którym pracuje tomograf, gdyż zastosowanie materiałów metalowych powodowałoby zniekształcenia otrzymywanego obrazu tomograficznego. W tym rozwiązaniu zasada pracy skanera tomogra-

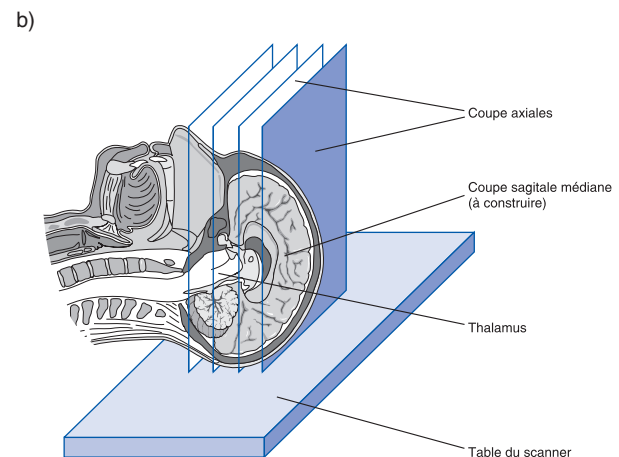


Rys. 3. Zasada przetwarzania obrazu pola operacyjnego na stanowisku: a) system mocowania głowy pacjenta za pomocą obejm i uchwytów wykonanych z materiałów kompozytowych, b) zbiory obrazów tworzonych w kolejnych przekrojach przez system tomograficzny

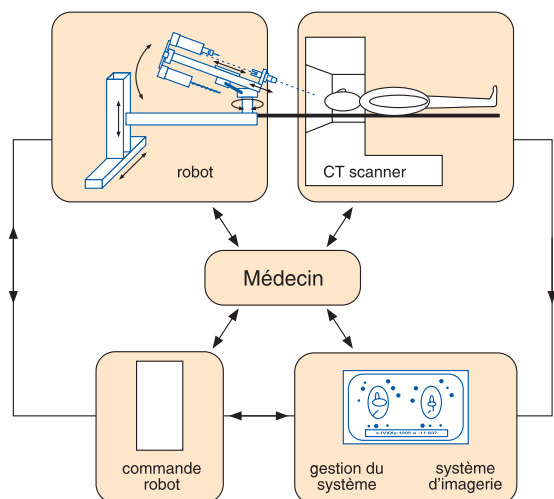
ficznego polega na tym, że obrazy przestrzenne są otrzymywane przez skanowanie kolejnych powierzchni przekrojów obszaru głowy pacjenta.

Na rys. 2 pokazano widok ogólny pola operacyjnego, które stanowi przestrzeń wypełniona tkanką nerwową (miękką), zamknięta ze wszystkich stron zrosniętymi kośćmi czaszki. W przypadku nowotworu mózgu zabieg leczniczy w dotychczasowym, tzw. klasycznym wykonaniu polega na operacyjnym chirurgicznym zdjęciu skóry z górnej powierzchni głowy, odcięciu z użyciem piły górnej części czerepu czaszki i ręcznym wypreparowaniu chorych tkanek, a następnie w odwrotnej kolejności zamknięciu pola operacyjnego. Stanowi to bardzo poważne zagrożenie dla przebiegu dalszego leczenia, zabieg operacyjny z reguły trwa kilka do kilkunastu godzin, natomiast powrót pacjenta do zdrowia również trwa bardzo długo, tj. kilka do kilkunastu miesięcy. Zadaniem operacji jest usunięcie np. niewielkiego guza wielkości śliwki zagnieżdżonego w zdrowej tkance mózgu. Praca typowymi narzędziami chirurgicznymi typu skalpel czy nożyczki wykonywana przez lekarza-operatora wymaga wysokiej precyzji manipulacji poprzedzonej długotrwałym treningiem zawodowym, dużego doświadczenia lekarza i odpowiednich warunków organizacji stanowiska operacyjnego.

W pracy [15] przedstawiono inną bardziej nowoczesną metodę prowadzenia takiej operacji z zastosowaniem systemu robotycznego. Jedną z najważniejszych jej zalet jest małoinwazyjność polegająca w tym wypadku na wykorzystaniu narzędzi endoskopowych i laparoskopowych o specjalnej konstrukcji, wprowadzanych w pole operacyjne do wnętrza czaszki przez kilka (najczęściej trzy) niewielkich otworów (8 mm). Operacja wymaga wysokiej precyzji i powinna być prowadzona w polu działania np. tomografu komputerowego (CT), w związku z tym głowa pacjenta jest mocowana na stanowisku operacyjnym za pomocą specjalnych obejm i uchwytów wykonanych z materiałów specjalnych, np. kompozytów niemetalowych (rys. 3a). Wymaganie to jest związane z koniecznością eliminacji zakłóceń przy przetwarzaniu obrazu pola operacyjnego przez tomograf, które może być zakłócanie pojawieniem się w polu operacyjnym elementów metalowych.



Na rys. 3b przedstawiono zasadę tworzenia zbioru obrazów płaskich wykorzystywanych do odtwarzania przestrzennego obrazu pola operacyjnego. Konieczność skójarzenia tych obrazów w tym samym układzie odniesienia wymaga wysokiej precyzji i dokładności pracy urządzenia oraz stabilnych warunków pracy systemu.



Rys. 4. Schemat blokowy systemu operacyjnego do operacji neurochirurgicznych

Na rys. 4. przedstawiono ogólny schemat systemu do prowadzenia operacji neurochirurgicznych [15]. Zawiera on bardzo prosty manipulator do obsługi narzędzi obróbczych wykonujących zabiegi wstępne, jak wiercenie otworów, lokowanie portów, rozstawienie tzw. znaczników. Pacjent znajduje się w polu działania CT skanera. System jest wyposażony w system sterowania komputerowego i układ zadawania ruchu przez lekarza-operatora. Należy podkreślić, że pracą systemu w zakresie tworzenia sygnałów zadanych dla urządzeń automatycznych steruje człowiek – odpowiedzialny za przebieg operacji musi kontrolować wszystkie istotne elementy pracy systemu. W wypadku niewłaściwej pracy jednego z ele-

mentów składowych to właśnie lekarz podejmuje decyzję o ewentualnym przerwaniu operacji robotem i dalszym jej kontynuowaniu metodą klasyczną.

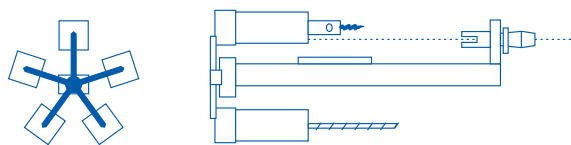
Na rys. 5. przedstawiono zestaw typowych narzędzi wyposażenia stanowiska operacyjnego z robotem. Zawiera on typowy obrabiarkowy obrotowy układ głowicy rewolwerowej z zestawem maszyn do wiercenia, ew. frezowania i stabilizacji narzędzi (rys. 5a), narzędzia laparoskopowe na sztywnych wysięgnikach oraz narzędzia endoskopowe na wysięgnikach elastycznych (rys. 5b). Wstępną fazę operacji obsługuje głowica rewolwerowa zamocowana na suporcisku ukośnym (rys. 5c) podpartym na wsporniku pionowym o dodatkowych pięciu stopniach swobody. Zadaniem wspornika jest ustawienie głowicy w określone położenie co do punktu portu oraz zapewnienie odpowiedniej orientacji narzędzia. Należy podkreślić, że stosowanie „klasycznych” technik obróbki i „klasycznych” układów manipulacyjnych czyni układ ciężkim i nie jest łatwo nim precyzyjnie operować.

Robot zawiera układ wiercenia otworów w czaszce oraz zestaw przewodników narzędzi pozwalających na oświetlenie obszaru pracy światłem laserowym o odpowiedniej długości fali, wycinanie chorych tkanek metodą cięcia strugą cieczy (płynu fizjologicznego) oraz odsysanie wyciętych tkanek obcych. Dla przebiegu zabiegu, w czaszce pacjenta wierce się trzy otwory po 8 mm każdy. Orientacja narzędzi typu laparoskopowego odbywa się w lokalnych układach kulistych, co zapewnia prawidłowe pozycjonowanie ich końcówek w obszarze pracy przy zachowaniu stałych punktów w rejonie otworów wykonanych do wprowadzenia narzędzi.

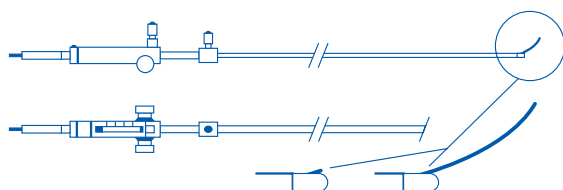
Robot znacznie usprawnia pracę zespołu operacyjnego, gdyż uwalnia pracownika pomocniczego od trudnej statycznej i męczącej pracy trzymania kamery, zwalnia dodatkowe miejsce w rejonie pola operacyjnego, ale przede wszystkim precyzyjnie reaguje na polecenia operatora.

Zasadniczą zaletą zastosowanego układu jest wysoka dokładność przekazywania ruchów sterujących końcówką robota oraz możliwość programowego wyeliminowania drżenia rąk operatora.

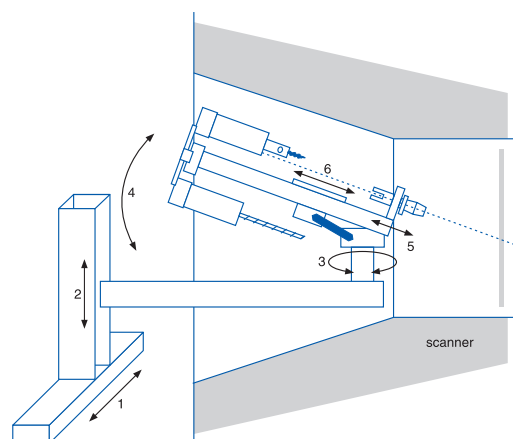
a)



b)



c)



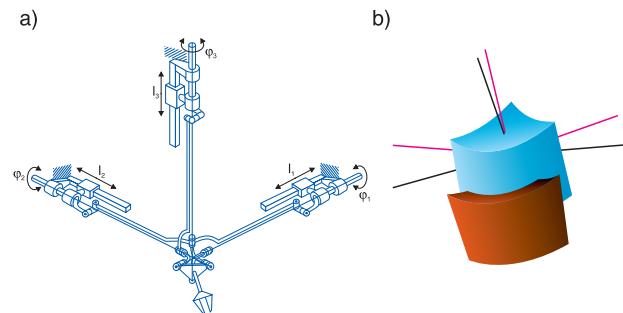
Rys. 5. Zestawy narzędzi do prowadzenia operacji neurochirurgicznych z zastosowaniem robota: a) układ rewolwerowy maszyn do wiercenia otworów i utrzymywania narzędzi, b) narzędzia endoskopowe na wysięgnikach elastycznych, c) widok ogólny pola operacyjnego z robotem

Koncepcja manipulatora równoległego o trzech stopniach swobody do zastosowań chirurgicznych

Manipulatory równoległe charakteryzują się w szczególności wysokimi wartościami współczynników sztywności i to nie tylko na określonych kierunkach np. związanych z płaszczyzną pracy jak w mechanizmach płaskich, lecz dotyczyć to może dowolnych kierunków obciążenia końcówki w przestrzeni. W konstrukcjach takich manipulatorów możliwy jest odpowiedni dobór parametrów geometrycznych i kinematycznych, aby np. obszary błędów końcówki generowanych przez ograniczoną wartość rozdzielczości układów pomiarowych miały kształty regularne przy maksymalnych błędach nieprzekraczających wartości założonych.

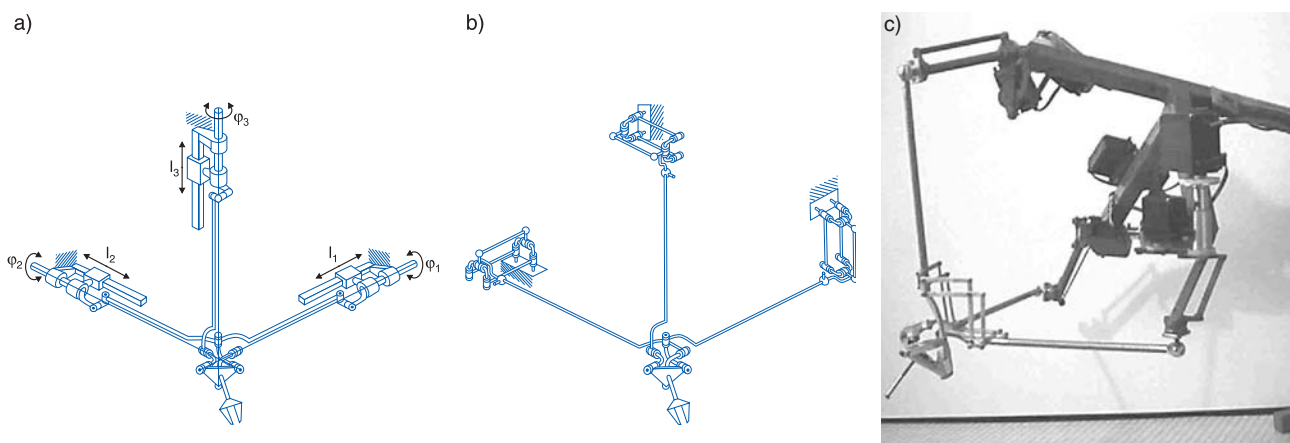
Na rys. 6 przedstawiono schematy kinematyczne dwóch podstawowych rozwiązań manipulatorów równoległych POLMAN typu 3x2 – własnej konstrukcji – o sześciu stopniach swobody i rozprzężonych ruchach zmiany położenia i orientacji elementu końcowego. Mechanizmy te mają tę szczególną cechę, że poza rozprzężeniem ruchów, wszystkie silniki napędowe są ułożone na podstawie, a napęd jest transmitowany z układów napędowych za pomocą trzech odpowiednio ułożonych łączników, które są obciążone siłami wzdłużnymi i momentami skręcającymi, natomiast nie przenoszą obciążenia od sił poprzecznych i momentów zginających. W związku z tym konstrukcja jest lekka, a mimo to charakteryzuje się dużą sztywnością, dużymi częstotliwościami drgań własnych, małymi luzami w układzie mechanicznym i przede wszystkim ma duże zakresy ruchów kątowych końcówki – znacznie większe niż dla typowych manipulatorów równoległych. Mechanizm tego typu został zrealizowany w postaci funkcjonalnego modelu laboratoryjnego pokazanego na rys. 5c, który wyposażono w modelarskie jednostki napędowe sterowane komputerowo i wstępnie przebadano. Pewną wadą rozwiązania jest niezerowa wielkość odsadzenia punktu chwytu chwytaka względem punktu centralnego sferycznego mechanizmu zapewniającego rozprzężenie kinematyki, możliwe jest jednak inne rozwiązanie układu nośnego platformy końcowej, w którym

mechanizm ruchów kątowych końcówki można przenieść w obszar półpłaszczyzny zajmowanej przez łączniki i wówczas chwytak można znacznie skrócić. Wersję taką pokazano na rys. 7a. W tej wersji zakresy ruchów kątowych platformy zostaną zmniejszone o ok. 30 %, przy czym ograniczenie to jest zależne od wymiarów platformy i związanych z nią łączników sferycznych.

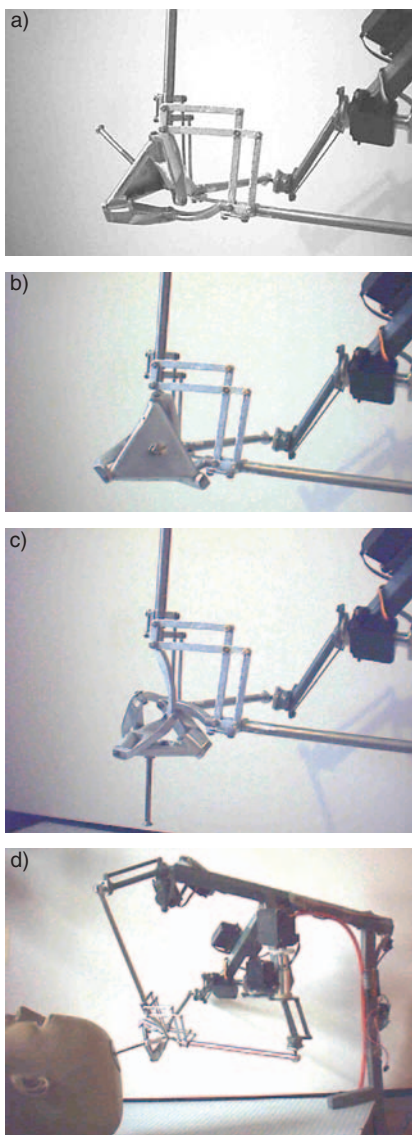


Rys. 7. Manipulator POLMAN-3x2 ze specjalnym przegubem potrójnym: a) schemat kinematyczny, b) przestrzeń robocza

Analiza manipulacyjności kinematycznej określającej relacje w zbiorze przełożeń kinematycznych ruchów przemieszczeń i równocześnie relacje między składowymi wektora błędu generowanego przez układy pomiarowe pokazała, że mechanizm ma bardzo dobre tzw. izotropowe właściwości kinematyczne w położeniu, w którym wszystkie trzy łączniki podstawowe są umieszczone w przestrzeni pod kątami prostymi względem siebie, tzn., gdy ich osie wzdłużne są usytuowane wzdłuż przyległych krawędzi prostopadłościanu. Ten warunek wykorzystano w sformułowaniu założeń konstrukcyjnych i preprototyp został zrealizowany zgodnie z nim. Parametry konstrukcyjne manipulatora dobrano w ten sposób, że punkt izotropowości kinematycznej jest punktem centralnym przestrzeni roboczej, w związku z tym właściwości kinematyczne stopniowo pogarszają się przy przemieszczaniu końcówki w kierunku granic przestrzeni roboczej. Ma ona kształt pokazany na rys. 7b i jest ograniczona sześcioma powierzchniami sferycznymi przecinającymi się w narożach sześciokąta.



Rys. 6. Schemat kinematyczny manipulatora POLMAN-3x2: a) wersja z silownikami liniowymi i obrotowymi ulokowanymi na podstawie, b) wersja z równoległowodami płaskimi i przestrzennymi, c) model laboratoryjny



Rys. 8. Właściwości manipulatora POLMAN korzystne przy prowadzeniu operacji neurochirurgicznych: a) końcówka obrócona ku górze, b) końcówka obrócona na wprost, c) końcówka obrócona ku dołowi, d) przykładowe ustawienie względem czaszki prezentowane na fantomie

Na rys. 8. pokazano końcówkę w charakterystycznych położeniach granicznych. Jak widać zakresy ruchów kątowych (jak manipulatora równoległego) są bardzo duże. Mała wartość odsunięcia końcówki narzędzia względem punktu centralnego końcowego mechanizmu sferycznego pozwala na manipulowanie narzędziem w dużym zakresie ruchów kątowych. Ruch ogólny końcówki uzyskuje się przez złożenie ruchów przemieszczeń translacyjnych i ruchów kątowych, przy czym praktyka pokazała, że sterowanie układem dzięki rozprzęgnięciu kinematycznemu jest bardzo ułatwione.

Uwagi końcowe

Manipulator POLMAN-3x2 ma szereg zalet pozwalających na jego wykorzystanie do prowadzenia operacji neurochirurgicznych. Jest on w sposób szczególnie predysponowany do utrzymywania i przemieszczania kamery endoskopowej, natomiast w zastosowaniu do operacji z wykorzystaniem techniki cięcia strugą cieczy może bardzo efektywnie wspomagać pracę lekarza-operatora. Niewątpliwie wadą rozwiązania jest szeroka kątowa rozpiętość nośnego mechanizmu przestrzennego, jednak wysoka precyzja, duża sztywność i relatywnie duże zakresy ruchów kątowych końcówki, jak też prostota sterowania stanowią parametry i czynniki nieosiągalne dla klasycznych rozwiązań manipulatorów o strukturze szeregowej. Autor ma nadzieję, że możliwe będzie dalsze rozwijanie koncepcji kinematycznie rozprzężonych manipulatorów równoległych do zastosowań medycznych.

Praca została zrealizowana w ramach prac własnych i statutowych na Wydziale MEiL w Politechnice Warszawskiej w roku akademickim 2002/2003.

Bibliografia

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. Chironis N. P.: Mechanisms, Linkages and Mechanical Control, McGraw-Hill Book Company, 1965.
3. Innocenti C., Parenti-Castelli V.: Direct Position Analysis of the Stewart Platform Mechanism, Mech. Mach Theory, Vol. 25, No. 6, pp. 611-621, 1990,
4. Jacket P., Danescu G., Carvalho J., Dahan M.: A spatial Fully-Parallel Manipulator, Int. Conf. RoManSy '92, Udine, Italy.
5. Matone R., Roth B.: Designing manipulators for both kinematic and dynamic isotropic properties, Proc. RoManSy '96.
6. Mianowski K., Nazarczuk K.: Parallel Drive of Manipulator Arm, Proc. RoManSy 8, Warsaw-Kraków 1990, pp. 143-150.
7. Mianowski K.: 3-D Lever Mechanism of a robot of 6 Degrees of freedom, app. To the proc. of 5th World Conf. on Robotics Research, Cambridge, Mass. 1994.
8. Mianowski K.: A 3-D Lever Parallel Mechanism of a Robot with 6 Degrees of Freedom, proc. Of 6th Int. Symp. Measurement and Control in Robotics, Brussels 1996, pp. 104-109.
9. Mianowski K.: Manipulator równoległy o sześciu stopniach swobody, Mat. V KKR, Wrocław 1996.
10. Mianowski K.: Dynamic model of a double parallel manipulator with six degrees of freedom, Proc. 10th World Congress on TMM, Oulu Finland, 1999, pp. 1222-1227.
11. Mianowski K.: New concept of parallel manipulator POLMAN-3x2 with six degrees of freedom, proc. XVII National Conference on TMM, Warsaw-Jach-ranka, 2000, pp. 277-284.
12. Mianowski K., Nazarczuk K.: Parallel manipulator, Pat. No PL 180484, Warszawa 1996.
13. Nanua P., Waldron K. J.: Direct Kinematic Solution of a Special Parallel Robot, Proc. RoManSy 8, Warsaw-Cracow 1990, pp. 134-142.
14. Pierrot F., Daunchez P., Fournier A.: HEXA: a Fast six-DOF fully-Parallel Robot, IEEE Proc. 1991, Vol. 1, pp. 1158.
15. Rembold U., Burghart C.: Surgical robotics, Journal of Intelligent & Robotics Systems, Vol. 30, No 1 2001.
16. Stewart D.: A Platform with Six Degrees of Freedom, Proc. Instn. Mech. Engrs. 1965-66, pp. 371-378.
17. Uchijama., Pierrot F., Dauchez P., Unno K., Toyama O.: A New Design of a Very Fast 6-DOF Parallel Robot, proc. ISIR '92, Barcelona.
18. Rovetta A. At al.: ATC: New Telecontrol System Description and Performance Assesment, Preprints of the Int. Workshop on Medical Robots, Vienna, Austria, Oct. 1-2, 1966, T. U. of Vienna, ed. by P. Kopacek.
19. Müller W., Ziegler R.: Virtual Reality in the Surgical Training, Preprints of the Int. Workshop on Medical Robots, Vienna, Austria, Oct. 1-2, 1966, T. U. of Vienna, ed. by P. Kopacek. ■