

Sterowanie trajektorią narzędzia robota

przy pomocy zadajnika haptycznego w operacjach stereotaktycznych mózgu

Artykuł recenzowany

Streszczenie

Nowoczesna medycyna daje pole do wykorzystania różnego rodzaju robotów. Jednym z istotnych zagadnień związanych z robotyką medyczną jest wykorzystanie robotów na salach operacyjnych do wspomagania operacji chirurgicznych. Przy ich projektowaniu konieczne jest uwzględnienie specyficznych potrzeb obszaru chirurgii, w jakim będzie stosowany dany robot. Roboty chirurgiczne wymagają również specyficznego sposobu programowania. Nie jest możliwe, aby wykonywały jedynie wcześniej zaplanowane programy. Dlatego należy stosować programowanie w czasie rzeczywistym. Robot wspomagający operację chirurgiczną może być sterowany przez chirurga przy pomocy zadajnika haptycznego. Jest to układ master-slave, gdzie jako master występuje zadajnik haptyczny z zamontowanym narzędziem, którym porusza chirurg, natomiast jako slave robot wspomagający operację, na ramieniu którego jest zamontowane narzędzie chirurgiczne. W celu zbadania zagadnień związanych ze sterowaniem robotem do zastosowania w neurochirurgii zbudowano demonstrator obejmujący urządzenie haptyczne, robota przemysłowego, kamery oraz komputery, których zadaniem jest komunikacja pomiędzy elementami układu i użytkownikiem oraz przetwarzanie danych. W artykule tym omówiono sterowanie pozycją narzędzia umieszczonego na robocie przy pomocy ruchów urządzenia haptycznego zadawanych przez osobę sterującą, czyli w przypadku zastosowań medycznych chirurga. Opisano matematyczne i programistyczne aspekty sterowania pozycją. Omówiono rolę poszczególnych elementów systemu w procesie zadawania trajektorii oraz sposób komunikacji między nimi. Uwzględniono niektóre z warunków bezpieczeństwa, jakie muszą być spełnione w przypadku zastosowań robota w chirurgii. Opisane zagadnienie jest częścią większego systemu służącego do badań nad zastosowaniem robotów w neurochirurgii.

**DOROTA
MARSZALIK,
MAREK
SIBIELAK,
WALDEMAR
RĄCZKA,
JAROSŁAW
KONIECZNY**

AGH Akademia
Górnictwo-Hutnicza,
Wydział Inżynierii
Mechanicznej i Robotyki,
Katedra Automatykacji
Procesów

WPROWADZENIE

Rozwój automatyki i robotyki powoduje, że na salach operacyjnych coraz częściej stosowane są roboty medyczne wspomagające pracę zespołu lekarzy. Są one wyspecjalizowanymi maszynami dedykowanymi do poszczególnych obszarów chirurgii. Dlatego też roboty stosowane np. w operacjach neurochirurgicznych mają inną konstrukcję niż te do operacji kardiochirurgicznych czy ortopedycznych. Głównymi celami wprowadzenia robotów na salę operacyjną są: zwiększenie precyzji prowadzenia narzędzia, poprawa bezpieczeństwa pacjenta, wspomaganie chirurga, zmniejszenie inwazyjności operacji oraz liczby powikłań co skutkuje szybszym powrotem pacjenta do zdrowia po operacji [1]. Zastosowanie robotów umożliwia zwiększenie precyzji czynności chirurgicznych, które jest realizowane przez dobór wzmocnienia ruchów operatora (zwykle wzmocnienie jest mniejsze od jedności) oraz redukcję drgań narzędzia [2]. Dodatkowo roboty mogą być wyposażone w różnego rodzaju czujniki i przetworniki wspomagające pracę chirurga takie jak np. kamery pracujące w wybranych zakresach widma, położenia, kąta itd. [3], [4].

Początki zastosowania robotów w chirurgii sięgają połowy lat 80 XX w., kiedy to po raz pierwszy wykonano biopsję guza mózgu przy pomocy zaadaptowanego do tego celu manipulatora przemysłowego Puma 560 [5]. Od tego czasu nastąpił gwałtowny rozwój robotyki medycznej. Do robotów stosowanych w chirurgii zaliczają się m.in.: OrthoDOC [6] i ROBODOC [7] wspomagające operację wymiany stawu biodrowego, PROBOT [7] stosowany do operacji prostaty, AESOB sterowany głosem manipulator będący jednym z ramion robota ZEUS [1],[7] służącego do operacji laparoskopowych, czy obecnie najpopularniejszy system da Vinci [7]. W Polsce najbardziej rozwiniętą konstrukcją jest robot Robin Heart przeznaczony do operacji kardiochirurgicznych, opracowywany przez naukowców z Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrze [8]. W obszarze neurochirurgii do bardziej popularnych robotów zaliczają się: Minevra [9], NeuRobot [10] oraz Pathfinder [11]. Pierwszym dostępnym komercyjnie robotem neurochirurgicznym był NeuroMate [12].

W przypadku operacji neurochirurgicznych szczególnie ważna jest precyzja wykonywanych czynności. Zastosowanie robota daje możliwość wykonywania ich bardziej dokładnie, niż może to zrobić neurochirurg bez wspomagania [13]. Umożliwia to minimalizację uszkodzeń tkanek, co jest szczególnie istotne w przypadku mózgu. Pozwala również na zwiększenie bezpieczeństwa [14], a ponadto daje możliwość zdalnego wykonywania operacji [15]. Obecnie zabiegi neurochirurgiczne są planowane na podstawie zdjęć z tomografii komputerowej (CT) i rezonansu magnetycznego (MRI) [16]. Zdjęcia używane do planowania, wyświetlane na ekranie komputera w sali operacyjnej, wspomagają pracę chirurga również w trakcie operacji. Przewiduje

się, że dzięki zastosowaniu narzędzia w postaci robota wspomagającego operatora wraz z obrazowaniem CT i MRI mózgu uzupełnionym o traktografię możliwe będą operacje guzów obecnie nieoperacyjnych [17].

W celu sprawdzenia opisanej idei zbudowano demonstrator robotycznego systemu neurochirurgicznego, do którego użyto robota przemysłowego. Roboty przemysłowe stosowane na taśmach produkcyjnych poruszają się po zaplanowanych trajektoriach i wykonują z góry określone procedury czy czynności np. paletowanie, montaż, obróbka skrawaniem powtarzalnych detali itd. Dlatego do sterowania nimi używa się wcześniej przygotowanych i przetestowanych programów. Taki sposób programowania jest odpowiedni do realizacji powtarzalnych czynności technologicznych, jednak w przypadku operacji chirurgicznych jest niedopuszczalny. Roboty chirurgiczne wspomagające operatora muszą odtworzyć ruch ręki chirurga przeprowadzającego operację. Ze względu na unikalność każdego organizmu, nie jest możliwe opracowanie powtarzalnego programu wycięcia np. woreczka żółciowego. W przypadku operacji neurochirurgicznych mózgu, oprócz osobniczej budowy anatomicznej mózgu, dochodzi jeszcze unikalne dla każdego człowieka rozmieszczenie połączeń nerwowych. Uszkodzenia takiego połączenia może powodować liczne deficyty u buduje się specjalne roboty chirurgiczne. Podczas operacji każdy ruch urządzenia zadającego trzymanego w ręku chirurga jest w czasie rzeczywistym przetwarzany na odpowiednie ruchy robota. Kolejne ruchy są ustalane po odebraniu przez chirurga sterującego robotem informacji na temat aktualnego stanu operacji. Nie można więc, jak w przypadku robotów przemysłowych, przygotować programu zadającego z góry ustaloną sekwencję ruchów, które następnie będą realizowane przez robota podczas operacji.

Prototyp, w którym zastosowano robota przemysłowego służy do przebadania różnych strategii pracy z robotem neurochirurgicznym. Jest używany do wykonywania eksperymentów prowadzących do uzyskania wiedzy na temat sterowania i pracy z robotem neurochirurgicznym wyposażonym w system obrazowania CT i MRI mózgu uzupełnionym o traktografię. Eksperymenty te mają pomóc w znalezieniu odpowiedzi na pytania jaka jest najlepsza strategia pracy z robotem, jak zwizualizować pole operacyjne, jak pracować z zadajnikiem, jakie są maksymalne, dopuszczalne stałe czasowe układu itd. Kolejnym problemem związanym ze sterowaniem ruchami robota przy pomocy zadajnika jest brak czucia przez chirurga siły reakcji tkanki na kontakt z narzędziem. Dlatego podejmowane są działania prowadzące do jak najlepszego odtworzenia warunków tradycyjnej operacji, tak aby chirurg miał wrażenie, że trzyma w ręku prawdziwy skalpel lub inne narzędzie. W tym celu stosuje się sprzężenie od siły oraz urządzenia haptyczne [18], [19], [20]. Kolejnym ważnym zadaniem jest opracowanie ergonomicznego sposobu synchronizacji i kalibracji układów współrzędnych robota, ekranu, pacjenta i zadajnika ruchu. Wyniki

eksperymentów prowadzonych z użyciem zbudowanego prototypu robota neurochirurgicznego mają pomóc w rozwiązaniu wyżej wymienionych problemów.

W artykule opisano budowę stanowiska laboratoryjnego i układ sterowania ruchem robota. Szczególną uwagę poświęcono sterowaniu ruchem narzędzia umieszczonego na ramieniu robota przy pomocy zadajnika haptycznego. Przedstawiono podstawy matematyczne przekształcania ruchu chirurga na ruch robota oraz sposób programowania pozwalający na sterowanie pozycją w czasie rzeczywistym.

UKŁAD STEROWANIA ROBOTEM

Zastosowanie robota przemysłowego do operacji chirurgicznych niesie za sobą wiele problemów natury technicznej. Należy wybrać taki sposób sterowania, który pozwoli na wykonywanie przez robota ruchów najbardziej zgodnych z intencjami chirurga przeprowadzającego zabieg. Do sposobów sterowania robotami zaliczamy: sterowanie w reakcji na zdarzenia, kopiowanie zadanej pozycji (manipulatory typu master/slave) oraz kopiowanie zadanej pozycji z wykorzystaniem sprzężenia od siły przykładanej do efektora.

W pierwszej z wymienionych metod stosuje się programy realizujące sekwencje ruchów robota w reakcji na zdarzenia. Ten sposób nie nadaje się do sterowania robotem chirurgicznym, ponieważ roboty te mają odtwarzać na bieżąco ruchy wykonywane przez chirurga kierującego operacją, a dokładnego przebiegu operacji nie można przewidzieć. W drugiej metodzie robot (slave) powtarza ruchy manipulatora (master) w celu odtworzenia jego pozycji. Ważne jest aby master i slave miały podobną kinematykę. Trzecia metoda dodatkowo wykorzystuje sprzężenie od siły. Tę metodę stosuje się w przypadku sterowania z wykorzystaniem przetwornika haptycznego robotem wspomagającym operację.

Podstawowymi elementami wchodzącymi w skład systemu sterowania robotem do zastosowań w chirurgii są manipulator-zadajnik ruchu, panel operatora, sterownik robota oraz robot (Rys. 1).

Jako zadajnik ruchu użyto urządzenia haptycznego PhantomOmni, które jest sterowane poprzez ruch ręki operatora. Zadajnik symuluje narzędzie trzymane przez chirurga w trakcie operacji. Zazwyczaj taki zadajnik nie generuje sygnałów pozwalających na przybliżenie osobie sterującej nim warunków, jakie panują na elemencie wykonawczym. Odczuwanie przez chirurga sterującego operacją siły oporu jest szczególnie ważne, ponieważ daje lepszy pogląd na przebieg operacji. Przez to sterowanie robotem staje się dla chirurga bardziej intuicyjne. Dlatego w przedstawionym systemie jako zadajnik ruchu użyto przetwornika haptycznego, który może generować siłę oporu stwarzając chirurgowi warunki zbliżone do tradycyjnej operacji.

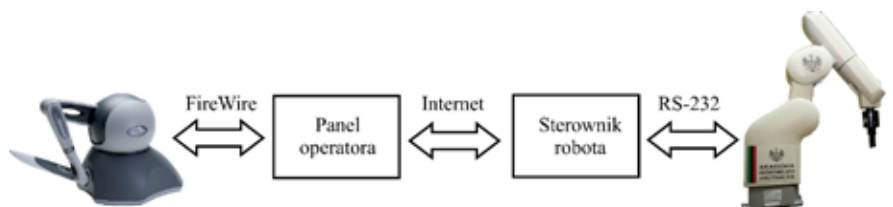
Panel operatora to komputer, którego zadaniem jest stworzenie chirurgowi środowiska ułatwiającego przeprowadzenie operacji oraz zapewnienie komunikacji pomiędzy zadajnikiem, a sterownikiem robota. Na monitorze wyświetlane są zdjęcia CT i MRI mózgu pacjenta, z zaznaczoną aktualną pozycją narzędzia robota. Komputer komunikuje się z zadajnikiem ruchu, od którego otrzymuje informacje na temat położenia oraz steruje siłą oporu na zadajniku. Do sterownika robota przesyła aktualną pozycję zadajnika i odbiera informacje o położeniu robota oraz sile oporu.

Sterownik robota to komputer, którego zadaniem jest komunikacja z robotem oraz panelem operatora, sprawdzanie warunków bezpieczeństwa, przesyłanie do robota komend sterujących ruchem oraz odbiór i przetwarzanie informacji przesyłanych pomiędzy panelem operatora, a robotem.

Elementem wykonawczym jest robot przemysłowy Mitsubishi Melfa CR – E16. Do niego montuje się narzędzie służące do przeprowadzenia operacji. Robot ma odtwarzać ruchy jakie wykonuje chirurg trzymający w ręku zadajnik. Odbiera i wykonuje komendy przesyłane ze sterownika, a następnie wysyła informację zwrotną.

Odpowiednie połączenia pomiędzy elementami systemu mają umożliwić sterowanie dynamiczne robotem. Pozycja zadajnika jest przesyłana przez złącze FireWire do komputera stanowiącego panel operatora. Tam zostaje przeliczona z układu współrzędnych zadajnika, na pozycję w układzie współrzędnych robota. Następnie dane te są przekazywane do komputera sterującego, który na ich podstawie generuje komendy sterujące przesyłane przez złącze RS-232 do robota. Jako informację zwrotną robot odsyła do sterownika pozycję osiągniętą przez efektor. Dalej jest ona przesyłana do panelu operatora, gdzie może posłużyć do wygenerowania siły oporu zadawanej na urządzeniu haptycznym oraz wyboru zdjęć tomograficznych wyświetlanych na monitorze.

Metoda wyznaczania pozycji narzędzia chirurgicznego przy sterowaniu za pomocą urządzenia haptycznego. W celu skutecznego sterowania przy pomocy zadajnika haptycznego pozycją narzędzia chirurgicznego



Rys. 1 Schemat połączeń pomiędzy elementami układu.

zamontowanego na robocie konieczna jest synchronizacja układów współrzędnych. Taki sposób sterowania daje możliwość nie tylko odtwarzania trajektorii, ale również skalowania ruchów, co jest szczególnie istotne w przypadku mikrochirurgii. Odtworzenie trajektorii jest rozumiane jako przekształcenie pozycji końcówki

narzędzia zamontowanego na urządzeniu haptycznym na pozycję końcówki narzędzia zamontowanego na ramieniu robota. Przekazywane są nie tylko współrzędne końcówki, ale również kąty nachylenia narzędzia do układu współrzędnych.

Układ sterowania robotem jest rozbudowanym systemem, w którym oprócz układów współrzędnych związanych z narzędziami zamontowanymi na ramionach zadajnika i robota występują też układy związane z położeniem głowy pacjenta oraz zdjęciami wyświetlanymi na panelu operatora. Aby uniknąć komplikacji podczas wykonywania operacji, a także zadbać o bezpieczeństwo pacjenta należy określić przekształcenia pomiędzy tymi układami. Przed przystąpieniem do pracy z takim systemem należy na wstępie skalibrować układy współrzędnych dla zadajnika haptycznego u_{HO} oraz narzędzia robota u_{RO} , które będą uznawane za ich układy początkowe. Ważne jest również określenie macierzy transformacji pomiędzy tymi układami oraz macierzy przekształcającej układ, w którym jest odczytywana pozycja narzędzia zadajnika haptycznego u_H na układ w którym jest podawana pozycja wysyłana jako komenda dla robota u_R .

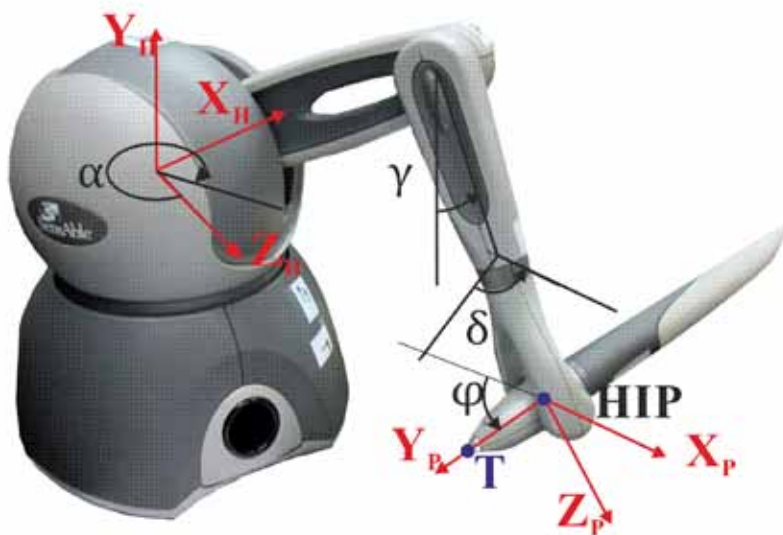
$$O_{HR} = O_{ROR} \cdot O_{HRO} \cdot O_{HOH} \quad (1)$$

$$N_R = O_{HR} \cdot T_H = O_{ROR} \cdot O_{HRO} \cdot O_{HOH} \cdot T_H \quad (2)$$

W rozdziale tym zaprezentowano przykładowa transformację układów współrzędnych dla przypadku, w którym układ u_H pokrywa się z u_{HO} , a układy u_R i u_{RO} mają tę samą orientację i przesunięte układy współrzędnych (Rys. 2).

Pierwszym etapem sterowania trajektorią narzędzia jest wyznaczenie pozycji końcówki narzędzia zamontowanego na urządzeniu haptycznym, przy pomocy którego chirurg ma sterować przeprowadzaną operacją.

Rys. 2 Układy współrzędnych związanych z urządzeniem haptycznym (na dole) i robotem (po prawej).



Pozycja ta jest obliczana na podstawie danych o kątach w przegubach urządzenia haptycznego, które są odczytywane z enkoderów oraz pozycji punktu HIP (haptic interface point). W tym obliczono macierz transformacji układu u_p , którego początek znajduje się w punkcie HIP, a oś y jest zgodna z osi narzędzia, do układu u_H związanego z podstawą urządzenia haptycznego (3). Następnie z macierzy transformacji układów wyjęto macierz określającą orientację osi y układu u_p względem u_H (4).

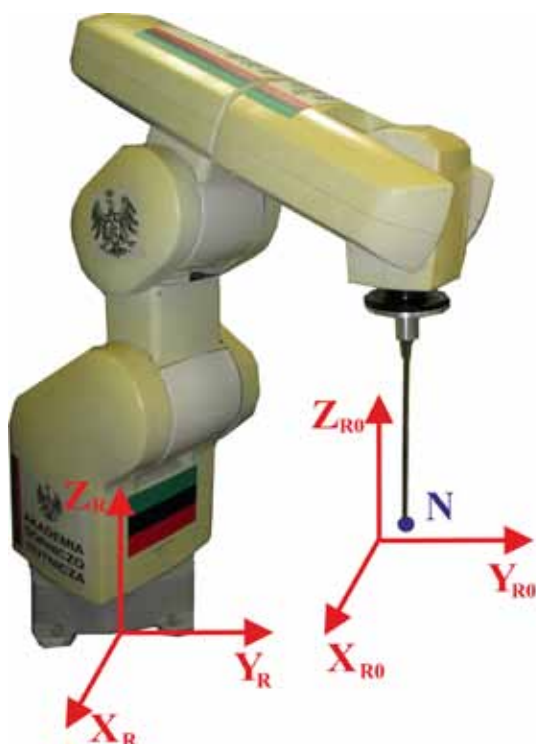
$$O_{PH} = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x & p_x \\ l_y & m_y & n_y & p_y \\ l_z & m_z & n_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$y_{PH} = [m_x \quad m_y \quad m_z]^T \quad (4)$$

Współrzędne końcówki narzędzia obliczono według wzoru (8). Metodę obliczania współrzędnych końcówki narzędzia szerzej opisano w artykule [21].

Na podstawie macierzy y_{PH} są obliczane kąty nachylenia narzędzia robota do osi z oraz x układu u_H . Układ u_H jest zamieniany na układ początkowy u_{RO} (9) i są obliczane współrzędne końcówki w układzie u_{RO} (10). Tutaj też jest dokonywane skalowanie ruchów. Współczynnik skali jest oznaczony jako k.

Kolejnym krokiem jest przekształcenie układu u_{RO} a układ główny związany z podstawą robota u_R (11). X_{RO} , Y_{RO} oraz Z_{RO} są współrzędnymi początku układu u_{RO} w układzie u_R . Pozycja końcówki narzędzia jest obliczana według wzoru (12). Ta pozycja jest używana do sterowania końcówką narzędzia umieszczonego na ramieniu robota.



$$m_x = \cos \varphi \sin \alpha \cos \gamma \cos \delta - \cos \varphi \cos \alpha \sin \delta - \sin \alpha \sin \gamma \sin \varphi \quad (5)$$

$$m_y = -\sin \gamma \cos \delta \cos \varphi - \cos \gamma \sin \varphi \quad (6)$$

$$m_z = -\cos \varphi (\sin \alpha \sin \delta + \cos \alpha \cos \gamma \cos \delta) + \cos \alpha \cdot \sin \gamma \cdot \cos \varphi \quad (7)$$

$$T_H = [x_T \quad y_T \quad z_T] = [x_{HIP} + m_x \cdot r \quad y_{HIP} + m_y \cdot r \quad z_{HIP} + m_z \cdot r] \quad (8)$$

$$O_{HRO} = k \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$N_{RO} = O_{HRO} \cdot T_H \quad (10)$$

$$O_{RO R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{RO} \\ 0 & 1 & 0 & y_{RO} \\ 0 & 0 & 1 & z_{RO} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$N_R = O_{RO R} \cdot N_{RO} \quad (12)$$

OPROGRAMOWANIE PANELU OPERATORA ORAZ STEROWNIKA ROBOTA W KONTEKŚCIE WYZNACZANIA TRAJEKTORII

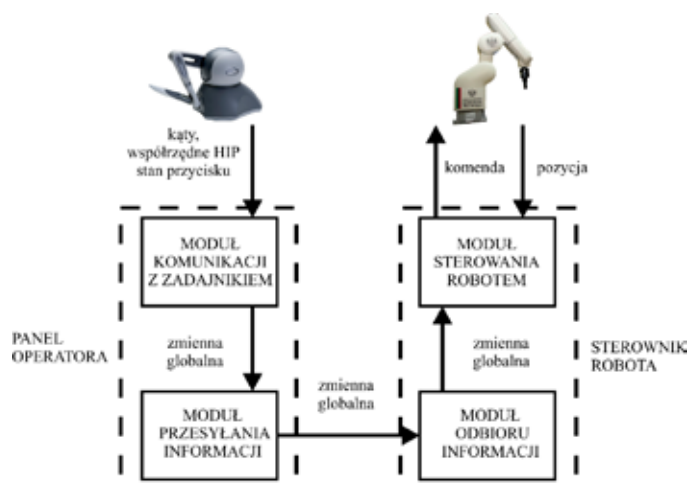
Oprogramowanie służące do sterowania pozycją końcówki narzędzia zamontowanego na ramieniu robota jest podzielone na cztery skomunikowane ze sobą programy. Wszystkie są zaimplementowane w LabVIEW. Dwa z nich, moduł komunikacji z zadajnikiem oraz moduł przesyłania informacji z panelu operatora, są umieszczone w panelu operatora, natomiast dwa kolejne, moduł odbioru informacji oraz moduł sterowania robotem, w sterowniku robota (Rys. 2).

Program umieszczony w panelu operatora działa jako pętla czasu z częstotliwością 50 Hz. Komunikuje się z urządzeniem haptycznym przez złącze FireWire i odczytuje współrzędne punktu HIP, stan przycisku na narzędziu oraz informacje, które pozwalają na obliczenie kątów w przegubach. W przypadku stanu wysokiego przycisku, a więc, kiedy chirurg daje sygnał, że w tym momencie chce sterować ruchem narzędzia dochodzi do przetwarzania tych informacji. Wtedy zostają wyznaczone macierze transformacji pomiędzy poszczególnymi układami współrzędnych na urządzeniu haptycznym. Na tej podstawie jest obliczana pozycja końcówki narzędzia oraz kąty nachylenia narzędzia. Ich wartości oraz stan przycisku są umieszczone w ele-

mencie typu cluster, który następnie zostaje zapisany do zmiennej globalnej. W panelu operatora istnieje również możliwość wyboru sposobu sterowania pozycją. W zależności od potrzeb operator może wybrać sterowanie bezwzględne lub przyrostowe. Sterowanie bezwzględne daje możliwość przenoszenia trajektorii końcówki narzędzia i orientacji narzędzia, tylko trajektorii przy stałej orientacji lub tylko orientacji przy stałej pozycji końcówki narzędzia. Jest również możliwość wyboru sterowania przyrostowego. Tutaj oprócz opcji dostępnych również dla sterowania bezwzględnego jest możliwość pozostawienia narzędziu robota tylko jednego wybranego stopnia swobody. A więc można doprowadzić narzędzie robota do pewnej pozycji i dalej sterować już np. tylko przemieszczeniem wzdłuż osi z. Informacje o wybranym sterowaniu są również przekazywane do zmiennej globalnej.

Zmienna globalna jest odczytywana przez moduł przesyłania danych z panelu operatora. Dalej jest przesyłana poprzez sieć lokalną do modułu odbioru informacji znajdującego się w sterowniku robota, a stamtąd do modułu sterowania robotem.

Moduł sterowania robotem jest zbudowany z pracujących synchronicznie pętli czasu, z których każda realizuje odrębne zadania. Przepływ danych pomiędzy modułami odbywa się poprzez kolejki. W programie są dwa typy kolejek: kolejki komend i kolejki pozycji. Kolejki komend składają się z elementów typu string. W kolejce nadawczej komend znajdują się komendy przygotowane w celu wysłania ich do robota. Typowy



Rys. 3 Schemat oprogramowania według przepływu danych do sterowania pozycją.

element tej kolejki jest zbudowany z trzech komend: określającej prędkość ruchu robota, zadającej pozycję oraz zapytania o pozycję osiągniętą przez robota. Kolejka odbiorcza komend zawiera informację zwrotną odsyłań przez robota, czyli najczęściej jego pozycję. Drugim rodzajem są kolejki pozycji typu cluster. Kolejka nadawcza pozycji zawiera informacje o pozycji zadawanej robotowi, natomiast kolejka odbiorcza pozycji o położeniu efektora robota.

Tworzenie komendy służącej do zadawania pozycji narzędziu robota na podstawie pozycji narzędzia zamontowanego na urządzeniu haptycznym odbywa się w pętli sterowania poprzez urządzenie haptyczne. Pętla ta odbiera zmienną globalną typu cluster z modułu odbioru informacji, a następnie na podstawie danych o aktualnej pozycji narzędzia na urządzeniu haptycznym i robocie, sposobie sterowania i wybranym współczynniku skali (jeśli dokonuje się skalowania ruchu) oblicza pozycję jaką ma osiągnąć końcówka narzędzia zamontowanego na robocie i orientację tego narzędzia. Pozycja jest podawana w układzie głównym robota u_R . Dane te są umieszczane w kolejce nadawczej pozycji oraz po przekształceniu na komendę w kolejce nadawczej komend. Utworzona komenda jest przesyłana do pętli komunikacji z robotem, a stamtąd przez złącze RS-232 do robota.

Przed wysłaniem komendy następuje sprawdzenie, czy pozycja jaka ma zostać zadana robotowi spełnia określone wcześniej warunki bezpieczeństwa. To znaczy, czy mieści się w zdefiniowanym zakresie dostępnych pozycji i kątów oraz czy zaplanowane prędkości i przemieszczenia nie przekraczają dopuszczalnych wartości. W przypadku niespełnienia któregokolwiek z warunków komenda nie zostaje wysłana do robota, a więc niedozwolony ruch nie zostanie wykonany. Osoba sterująca otrzyma komunikat o błędzie.

Pętla komunikacji jest odpowiedzialna również za odbiór informacji wysyłanych przez robota. W przypadku sterowania pozycją robot zwraca informację o aktualnej pozycji końcówki narzędzia oraz jego orientacji. Informacja ta zostaje umieszczona w kolejce odbiorczej komend, przy pomocy której jest przesyłana do pętli kontroli błędów, gdzie pozycja odebrana jest porównywana z pozycją zadaną robotowi umieszczoną w kolejce nadawczej pozycji. W przypadku wykrycia błędu program zwraca komunikat i wstrzymuje dalsze działanie ze względu na bezpieczeństwo.

PODSUMOWANIE

W artykule opisano stanowisko laboratoryjne służące do badania zagadnień związanych ze sterowaniem robotem do zastosowań w neurochirurgii. Skoncentrowano się na części związanej ze sterowaniem pozycją narzędzia robota przy pomocy urządzenia haptycznego. Omówiono sposób komunikacji pomiędzy elementami systemu. Opisano przekształcenia matematyczne pozwalające na zamianę danych odczytanych z urządzenia haptycznego na współrzędne i orientacje koń-

cówki narzędzia umieszczonego na ramieniu robota. Przedstawiono sposób programowania służącego do sterowania trajektorią narzędzia chirurgicznego przy pomocy zadajnika haptycznego z uwzględnieniem warunków bezpieczeństwa. Opisano budowę systemu oraz rolę jego poszczególnych komponentów w wyznaczaniu pozycji narzędzia chirurgicznego. Przedstawione zagadnienie jest częścią większego systemu, którego celem jest opracowanie sterowania robotem do wykorzystania w neurochirurgii.

Praca finansowana z dotacji na cele statutowe z projektu nr 15.11.130.971

BIBLIOGRAFIA

- [1] T. a. Mattei, A. H. Rodriguez, D. Sambhara, and E. Mendel, "Current state-of-the-art and future perspectives of robotic technology in neurosurgery," *Neurosurg. Rev.*, vol. 37, no. 3, pp. 357–66; discussion 366, Jul. 2014.
- [2] P. Das, T. Goyal, and A. Xue, "Simulation Training in Neurological Surgery," vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2014.
- [3] G. R. Sutherland, S. Wolfsberger, S. Lama, and K. Zarei-nia, "The evolution of neuroArm," *Neurosurgery*, vol. 72 Suppl 1, no. January, pp. 27–32, Jan. 2013.
- [4] J. Guo and S. Guo, "A haptic interface design for a VR-based unskilled doctor training system in Vascular Interventional Surgery," 2014 IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom., pp. 1259–1263, Aug. 2014.
- [5] R. Clarke and I. Introduction, "A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery - Biomedical Engineering, IEEE Transactions on," vol. 35, no. 2, 1988.
- [6] P. Kazanzides, J. Zuhars, B. Mittelstadt, B. Williamson, P. Cain, F. Smith, L. Rose, and B. Musits, "Architecture of a surgical robot," [Proceedings] 1992 IEEE Int. Conf. Syst. Man, Cybern., pp. 1624–1629.
- [7] A. R. Lanfranco, A. E. Castellanos, J. P. Desai, and W. C. Meyers, "Robotic surgery: a current perspective," *Ann. Surg.*, vol. 239, no. 1, pp. 14–21, Jan. 2004.
- [8] Z. Nawrat, "Robin heart progress - advances material and technology in surgical robots," *Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci.*, vol. 58, no. 2, pp. 323–327, Jan. 2010.
- [9] R. a. Beasley, "Medical Robots: Current Systems Research Directions," *J. Robot.*, vol. 2012, pp. 1–14, 2012.
- [10] M. Mitsuishi, "Master - slave robotic platform and its feasibility study for micro-neurosurgery," no. May 2012, pp. 180–189, 2013.
- [11] S. Eljamel, "Evaluation of a neurosurgical robotic system to make accurate burr holes," no. January, pp. 101–106, 2011.
- [12] W. Tianmiao, W. Jun, H. Lei, and L. Wenyong, "An Internet Robot Assistant Tele-neurosurgery System Case A,, I," pp. 2845–2849, 2006.
- [13] T. Haidegger, T. Xia, and P. Kazanzides, "Accuracy improvement of a neurosurgical robot system," 2008 2nd IEEE RAS EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics, pp. 836–841, Oct. 2008.
- [14] W. Shen and J. Gu, "Robotic Neurosurgery and Clinical Applications," no. August, pp. 114–119, 2004.
- [15] J. Marescaux, J. Leroy, F. Rubino, M. Smith, M. Vix, M. Simone, and D. Mutter, "Transcontinental Robot-Assisted Remote Telesurgery: Feasibility and Potential Applications," *Ann. Surg.*, vol. 235, no. 4, pp. 487–492, Apr. 2002.
- [16] D. Liu and T. Wang, "A Workflow for Robot Assisted Neurosurgery," 2006 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst., pp. 2870–2875, Oct. 2006.
- [17] M. Sibieliak, W. Rączka, J. Konieczny, M. Moskała, and M. Krupa, "Robot Control System for Stereotactic Surgery," *Solid State Phenom.*, vol. 198, pp. 45–52, Mar. 2013.
- [18] J.-S. Oh, S.-H. Choi, and S.-B. Choi, "Control of repulsive force in a virtual environment using an electrorheological haptic master for a surgical robot application," *Smart Mater. Struct.*, vol. 23, no. 1, p. 015010, Jan. 2014.
- [19] S. Kapoor, P. Arora, V. Kapoor, M. Jayachandran, and M. Tiwari, "Haptics - touchfeedback technology widening the horizon of medicine.," *J. Clin. Diagn. Res.*, vol. 8, no. 3, pp. 294–9, Mar. 2014.
- [20] A. A. Syed, X. Duan, A. N. Khizer, M. Mengli, X. Kong, and Q. Huang, "Design and Implementation of Probe Driver Teleoperative Force Feedback System," *TELKOMNIKA Indones. J. Electr. Eng.*, vol. 12, no. 6, pp. 4215–4221, Jun. 2014.
- [21] D. Marszałik, "Application of haptic omni device to determination of the set point trajectory," *Proc. 2014 15th Int. Carpathian Control Conf.*, pp. 332–335, May 2014.