

Paweł LAJMERT, Leszek PODSEDKOWSKI
Politechnika Łódzka

ANALIZA RÓŻNYCH STRUKTUR UKŁADU STEROWANIA TELEMANIPULATORA KARDIOCHIRURGICZNEGO Z PUNKTU WIDZENIA WYMOGÓW BEZPIECZEŃSTWA PRACY

Słowa kluczowe

Roboty chirurgiczne, systemy bezpieczeństwa, redundancja, diagnostyka uszkodzeń, sterowanie.

Streszczenie

Telemanipulator kardiochirurgiczny jest złożonym urządzeniem elektro-mechanicznym przeznaczonym do pracy wewnątrz ciała pacjenta, przez co stwarza ryzyko narażenia jego zdrowia w wyniku awarii lub nieprawidłowej pracy. Z tych przyczyn urządzenie to musi spełniać wysokie wymagania co do niezawodności oraz bezpiecznej pracy. W artykule przedstawiono propozycję redundantnego systemu sterowania telemanipulatorem kardiochirurgicznym spełniającego te wymagania. Omówiono najważniejsze właściwości opracowanego systemu sterowania. We wstępie przeanalizowano możliwe wybory struktury sprzętowej oraz struktury redundancji torów pomiarowych i sterujących telemanipulatora. Przeanalizowano również wybrane algorytmy sterowania nadržanego robota z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy. Sformułowano wnioski oraz propozycje dalszych prac.

Wstęp

Telemanipulator chirurgiczny jest aktywnym inwazyjnym wyrobem medycznym, przeznaczonym do krótkotrwałego stosowania wewnątrz ciała pacjen-

ta, między innymi do korygowania wad centralnego układu krążenia. Z tego powodu jego niesprawność może stwarzać ryzyko uszkodzenia narządów wewnętrznych człowieka lub nawet spowodować jego śmierć. Zagrożenie to może wynikać z zachowania się robota niezgodnego z oczekiwaniami operującego chirurga lub też z nieprawidłowego zachowania się samego chirurga. Nieoczekiwane zachowanie się robota medycznego, objawiające się nieskoordynowanymi ruchami poszczególnych osi, może zostać spowodowane nieprawidłowym działaniem układu sterowania bądź uszkodzeniem podsystemów napędów wykonawczych. Zmniejszenie ryzyka na drodze zastosowania dodatkowych urządzeń ochronnych lub osłon, charakterystycznych dla aplikacji robotów przemysłowych, nie może być tutaj zastosowane. Wynika stąd, że jedynym sposobem rozwiązania tego problemu jest zwiększenie do maksimum bezpieczeństwa funkcjonalnego samego telemanipulatora, zależnego od prawidłowego działania systemu elektrycznego-elektronicznego-programowalnego oraz od prawidłowego działania systemu mechanicznego i elektromechanicznego [1].



Rys. 1. Prototyp konstrukcji polskiego robota kardiologicznego „RobIn Heart 3” na stanowisku testowym

Na świecie aktualnie produkowany seryjnie jest tylko jeden telemanipulator chirurgiczny – robot da Vinci firmy Intuitive Surgical. W Polsce od 2000 roku prowadzone są prace nad stworzeniem polskiego robota chirurgicznego RobIn Heart. Prace prowadzone są przede wszystkim w Fundacji Rozwoju Kardiologii w Zabrze oraz w Politechnice Łódzkiej. Aktualnie w PŁ

testowana jest wersja *RobIn Heart 3* (rys. 1) zaprojektowana w całości (wraz z układem sterowania) w Instytucie Obrabiarek i TBM PŁ. Ramię robota posiada 8 stopni swobody: trzy do pozycjonowania narzędzia, cztery (w tym jeden redundantny) do orientacji narzędzia i jeden do otwierania szczęk. Wszystkie są napędzane za pomocą silników bezszczotkowych firmy Maxon. Robot wykorzystuje zadajnik o 7 stopniach swobody wyposażony w silniki do realizacji siłowego sprzężenia zwrotnego. W poprzednich konstrukcjach (*Robin Heart 0, 1, 2*) zostały zastosowane typowe serwonapędy i systemy sterowania, stosowane w robotach przemysłowych. Były one w zupełności wystarczające do przeprowadzenia prac badawczych nad prototypami, jednakże poziom nienaruszalności bezpieczeństwa tych rozwiązań jest niewystarczający do medycznego zastosowania. W aktualnym rozwiązaniu na każdym ze stopni swobody zadajnika oraz na podstawowych stopniach swobody robota zostały zamontowane zdublowane układy pomiarowe.

Metodyka zwiększania bezpieczeństwa funkcjonalnego robotów medycznych

Pierwsze publikacje z zakresu budowy robotów medycznych pojawiły się w latach 90. i koncentrowały się niemal wyłącznie na etapie projektowania układu elektromechanicznego robota [2, 3, 4]. Prace te dotyczyły głównie problemu jak najlepszego dopasowania struktury kinematycznej robota i jego konstrukcji do konkretnego zadania medycznego oraz problemu współpracy systemu manipulacyjnego z systemem zadającym. Praktyczne wykorzystanie tych rozwiązań napotkało na barierę z powodu braku wiarygodnej, systemowej analizy bezpieczeństwa funkcjonalnego całego systemu oraz wpływu czynnika ludzkiego na to bezpieczeństwo. Dopiero w ostatnich latach w literaturze widoczne jest rosnące zainteresowanie tym problemem.

Dwie najczęściej spotykane strategie polegają na ograniczeniu liczby funkcji, które mogą być jednocześnie wykonywane przez robota oraz na zaopatrzeniu robota medycznego w redundantne układy pomiarowe. Pierwsza z wymienionych metod może polegać na ograniczeniu stopni swobody robota [5] (sekwencyjne ruchy tylko jedną, wybraną osią) lub na ograniczeniu obszaru pracy robota poprzez zastosowanie zderzaków oraz elastycznych napędów [2]. Druga metoda wykorzystuje redundancję, czyli np. nadmiarowość układów sterujących i pomiarowych robota chirurgicznego [5]. Ponieważ prawdopodobieństwo wystąpienia jednoczesnej awarii w dwóch torach sterujących robota jest znacząco mniejsze niż w przypadku zastosowania tylko jednego toru, najprostszym rozwiązaniem jest podwojenie, a nawet potrojenie elementów tych układów, a zwłaszcza czujników pomiarowych robota chirurgicznego i zadajnika. Należy tu zauważyć, że ta nadmiarowość może dotyczyć nie tylko elementów pomiarowych, ale również zwielokrotnienia jednostek obliczeniowych układu sterowa-

nia oraz samych algorytmów sterowania zespołami robota (zwielokrotnienie software'u). Z drugiej jednak strony zbyt duża nadmiarowość tych układów może doprowadzić do skomplikowania całego systemu i w efekcie do obniżenia jego niezawodności, a zarazem zmniejszenia poziomu bezpieczeństwa. Ponadto prowadzi to do zwiększenia kosztów całego systemu.

Wydaje się jednak, że wymienione rozwiązania prowadzą jedynie do zwiększenia niezawodności tych systemów, w mniejszym zaś stopniu do zwiększenia bezpieczeństwa pracy za pomocą metod oszacowywania potencjalnych źródeł możliwych szkód oraz sposobów zabezpieczenia się na wypadek ich wystąpienia. Robot medyczny jest urządzeniem bardzo skomplikowanym, na konstrukcję wielu jego elementów są nałożone ograniczenia zmniejszające ich trwałość, a dodatkowo pracuje w ciągłym kontakcie z ludźmi. Cechy te powodują, że idea robota medycznego o bardzo wysokiej niezawodności jest błędna, gdyż jest bardzo trudna lub wręcz niemożliwa do uzyskania. Chociaż całkowite prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia powinno być utrzymane na odpowiednio niskim poziomie, to o wiele ważniejszą cechą robota medycznego powinna być zdolność do stwierdzenia, że uszkodzenie faktycznie wystąpiło oraz zdolność do zapobiegania zagrożeniom wynikającym z tego uszkodzenia. W zależności od stopnia uszkodzenia, w najprostszym wypadku może to oznaczać chwilowe zatrzymanie się robota w celu szybkiego usunięcia zaistniałego problemu lub w najgorszym całkowite wyłączenie robota, usunięcie go z obszaru pracy i kontynuacja operacji chirurgicznej w sposób tradycyjny, tzn. ręcznie. Realizacja takiej idei wymaga opracowania odpowiednich metod autodiagnostyki systemu sterowania oraz stworzenia algorytmów szacowania poziomu bezpieczeństwa w celu ustalenia, czy dany poziom zabezpieczeń jest już wystarczający.

Analiza wariantów konstrukcyjnych układu sterowania

Zapewnienie właściwego poziomu nienaruszalności bezpieczeństwa zrobotyzowanego systemu chirurgicznego musi być przeprowadzone zarówno w fazie projektowania elektromechanicznego układu robota i systemu zadającego, jak również na etapie projektowania układu odpowiadającego za bezpieczeństwo pracy całego systemu.

Przy projektowaniu systemu sterowania dla telemanipulatora kardiochirurgicznego rozważono w pierwszej kolejności możliwe wybory dotyczące platformy sprzętowej dla głównej jednostki obliczeniowej sterującej ruchem ramion jednostek manipulacyjnych według przemieszczeń otrzymywanych z zadajnika. Możliwe wybory wraz z wadami i zaletami poszczególnych rozwiązań przedstawiono w tabeli 1.

Z przedstawionej tabeli jednoznacznie wynika, że w rachubę wchodzi tylko użycie komputera przemysłowego lub systemu mikroprocesorowego. Jednakże w przypadku pierwszego rozwiązania pewnym ograniczeniem stają się proble-

my w doborze odpowiednich kart sterujących i pomiarowych, szczególnie w przypadku zastosowania systemów czasu rzeczywistego. Z kolei użycie systemu mikroprocesorowego, pomimo wysokiej elastyczności, wymaga samodzielnego wykonania specjalizowanej bazy sprzętowej systemu sterowania i późniejszego jej oprogramowania. Wiąże się to ze wzrostem prawdopodobieństwa popełnienia błędów w oprogramowaniu.

Tabela 1. Wady i zalety różnych rozwiązań platform sprzętowych systemu sterowania

Jednostka główna	Komputer PC	Komputer przemysłowy	System mikroprocesorowy
Wady	<ul style="list-style-type: none"> wysoka awaryjność niestabilny system operacyjny brak sterowników w systemach czasu rzeczywistego, jak QNX lub VxWorks 	<ul style="list-style-type: none"> wysoka cena mała elastyczność modyfikacji oprogramowania 	<ul style="list-style-type: none"> konieczność samodzielnego wykonania bazy sprzętowej i jej oprogramowania wysoka cena projektu – nakład pracy
Zalety	<ul style="list-style-type: none"> niska cena dostępność wielu kart sterująco-pomiarowych oraz ich oprogramowania 	<ul style="list-style-type: none"> pewna, przetestowana baza sprzętowa i softwarowa 	<ul style="list-style-type: none"> możliwość dowolnej konfiguracji systemu sterowania niska cena jednostkowa wysoka niezawodność łatwość wprowadzenia redundancji torów sterujących i pomiarowych

Przy projektowaniu struktury systemu sterowania należy rozważyć również możliwe wybory struktury sterowania serwonapędami manipulatora, tj. sterowanie centralne i rozproszone. W sterowaniu scentralizowanym wszystkie poziomy algorytmu sterowania, tj. generator trajektorii ruchu oraz regulator sterowania nadążnego dla każdej z osi robota umieszczone są w głównej jednostce centralnej, z której wyprowadzane są napięciowe sygnały sterujące i pomiarowe. Oczywiście wadą takiej struktury jest wysoka ilość okablowania (oddzielne przewody pomiarowe oraz sterujące dla każdej osi), co zwiększa prawdopodobieństwo awarii (niekontrolowany ruch napędu) oraz stwarza poważne problemy w rozmieszczeniu przewodów wewnątrz konstrukcji robota.

W sterowaniu rozproszonym algorytmy sterowania położeniowego lub prędkościowego umieszczone są wraz ze stopniami mocy w niezależnych sterownikach w każdej z osi robota. Zadawanie przemieszczeń odbywa się tu najczęściej z zastosowaniem bezpiecznego szeregowego protokołu komunikacyjnego CAN lub Ethernet. Podstawową zaletą takiej struktury jest znacznie mniejsza ilość przewodów łączących główną jednostkę sterującą z napędami (prócz zasilania jedynie przewody komunikacyjne). Niebezpieczeństwo przerwania

przewodów jest tutaj znacząco mniejsze niż w przypadku sterowania scentralizowanego. Ponadto przerwanie przewodów komunikacyjnych jest automatycznie wykrywane przez główną jednostkę sterującą oraz napędy poszczególnych osi robota, przez co ruch może być bezpiecznie zatrzymany. Zbiorczo wady i zalety obu struktur sterowania przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Porównanie sterowania scentralizowanego i rozproszonego

	Sterowanie scentralizowane	Sterowanie rozproszone
Wady	<ul style="list-style-type: none"> • duża ilość okablowania/połączeń zwiększająca prawdopodobieństwo awarii • wyższa awaryjność • wyższe zakłócenia w torach sterujących i pomiarowych • problemy z doprowadzeniem przewodów sterujących i pomiarowych do napędów 	<ul style="list-style-type: none"> • sterowniki napędów obciążają ramiona robota • wolniejsza komunikacja (komunikacja szeregową) • trudniejsze oprogramowanie – konieczność obsługi skomplikowanego szeregowego protokołu komunikacyjnego
Zalety	<ul style="list-style-type: none"> • krótki czas pętli sterowania położeniowego/prędkościowego • prostsze oprogramowanie – brak obsługi szeregowego protokołu komunikacyjnego 	<ul style="list-style-type: none"> • możliwość wpisania inteligencji w sterowniki (np. reakcja na sytuację awaryjną) • znacznie mniejsza ilość okablowania • protokół komunikacyjny z autodetekcją błędów

Prócz właściwego doboru bazy sprzętowej systemu oraz struktury niezwykle istotnym czynnikiem wpływającym na całkowite bezpieczeństwo funkcjonalne robota jest również wybór sposobu sterowania nadążnego względem pozycji odczytywanych z manipulatora zadającego [6]. Możliwe metody to sterowanie prędkościowe, położeniowe oraz sterowanie prędkościowo-położeniowe względem czasu (PVT). W sterowaniu prędkościowym wyznaczana jest uśredniona prędkość ruchu zadajnika i podawana do jednostki wykonawczej – manipulatora jako sygnał sterujący. Najistotniejszą wadą tej metody jest kontynuacja ruchu serwonapędu z ostatnio zadaną prędkością w przypadku zerwania komunikacji z napędem danej osi manipulatora. Rozwiązania takiego nie powinno się zatem stosować w systemie, od którego wymaga się wysokiego poziomu bezpieczeństwa funkcjonalnego, chyba że zastosuje się dodatkowe zabezpieczenia na wypadek takiej awarii. Z kolei w sterowaniu położeniowym niebezpieczeństwo takie nie występuje, gdyż w przypadku przerwania komunikacji ruch jest zatrzymany na ostatnio zadanej pozycji. Podstawową wadą jest jednak niestabilny ruch w przypadku zastosowania rozproszonych napędów, spowodowany niską częstotliwością zadawania pozycji, co może prowadzić do nierównomiernej pracy poszczególnych napędów i drgań całego układu robota. Zbiorczo wady i zalety tych metod przedstawiono w tabeli 3. Rozwiązaniem tych problemów może być zastosowanie sterowania w przestrzeni pozycja–prędkość–czas lub

pozycja–czas, gdzie wyznacza się gładką trajektorię ruchu pomiędzy zadanymi pozycjami.

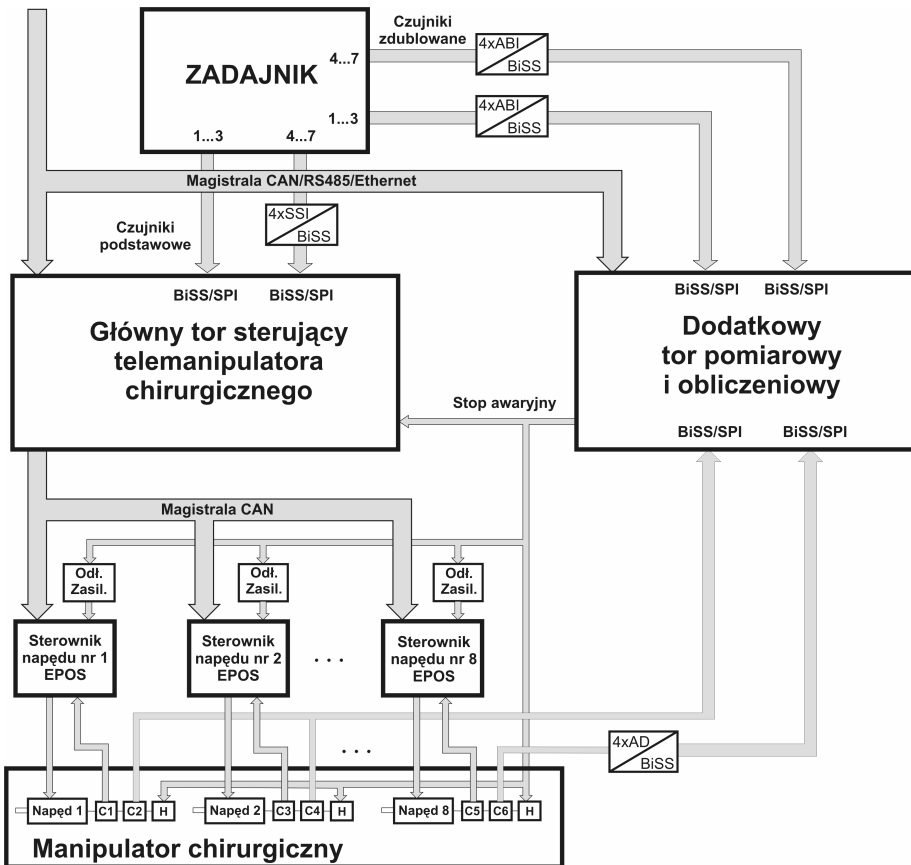
Tabela 3. Porównanie metod sterowania nadążnego

Metoda sterowania	Prędkościowe	Położeniowe	Sterowanie pozycyjno-prędkościowe względem czasu (PVT)
Wady	<ul style="list-style-type: none"> niska dokładność odwzorowania ruchu kontynuacja ruchu w przypadku zerwania komunikacji z napędem nieczułość na niewielkie przemieszczenia 	<ul style="list-style-type: none"> niezbędna wysoka częstotliwość zadawania pozycji niestabilny ruch prowadzący do drgań manipulatora 	<ul style="list-style-type: none"> wyższy koszt serwonapędów
Zalety	<ul style="list-style-type: none"> gładki, płynny ruch 	<ul style="list-style-type: none"> konieczność zadawania jedynie kolejnych pozycji 	<ul style="list-style-type: none"> płynny ruch wysoka dokładność odwzorowania ruchu zatrzymanie ruchu w przypadku przerwania komunikacji z napędem generator trajektorii ruchu zaimplementowany w sterowniku napędu

Dodatkowym, najważniejszym czynnikiem wpływającym na bezpieczeństwo funkcjonalne robota jest struktura redundancji torów obliczeniowych i pomiarowych systemu sterowania. Struktura ta powinna być tak dobrana, aby odpowiednie metody autodiagnostyki, analizy poszczególnych sygnałów awarii i redundancji mogły posłużyć do jak najszybszego wykrycia wszystkich potencjalnych uszkodzeń w celu zatrzymania pracy robota i w ten sposób do przekwalifikowania uszkodzenia niebezpiecznego na bezpieczne. Przyjęto zatem założenie, że uszkodzenie odpowiednio wcześniej zdiagnozowane, którego efektem jest zatrzymanie robota, jest bezpieczne, gdyż wtedy operacja jest kontynuowana ręcznie przez chirurga. Należy tu zaznaczyć, że sytuacje takie mają wielokrotnie miejsce z przyczyn medycznych. Przyjmując to założenie opracowano redundantny system sterowania telemanipulatora chirurgicznego o odpowiednio wysokim poziomie nienaruszalności bezpieczeństwa pracy. Schemat tego systemu przedstawiono na rysunku 2.

Zadaniem głównego toru pomiarowego jest odczyt położenia z zadajnika i przeliczenie go na położenia przegubowe manipulatora chirurgicznego. W tym samym czasie te same obliczenia (na podstawie niezależnych czujników położenia) są wykonywane w drugim torze pomiarowym i porównywane ze zdublowanymi czujnikami położenia umieszczonymi na robocie. Jeśli w trakcie pracy

wystąpi różnica pomiędzy wartościami wyznaczonymi w obu torach, to praca robota jest zatrzymywana, oznaczając awarię czujników lub awarię w torze obliczeniowym układu pomiarowo-sterującego. Taki sposób weryfikacji poprawności pracy można by nazwać *redundancją zbiorczą*. Takie rozwiązanie utrudnia jednak dokładne ustalenie miejsca uszkodzenia. W przypadku gdy oba tory obliczeniowe mogą weryfikować obliczenia pomiędzy sobą mówimy o redundancji szczegółowej. Niewątpliwą zaletą takiego rozwiązania jest szybsza reakcja na wykryte uszkodzenia. Porównanie obu struktur redundancji przedstawiono w tabeli 4.



Rys. 2. Redundantna struktura systemu sterowania telemanipulatora kardiochirurgicznego

W robocie *RobIn Heart 3* oraz *RobIn Heart Vision* zarówno w torze pomiaru położenia zadajnika, jak i torze pomiarowym manipulatora chirurgicznego zastosowane zostały redundantne układy pomiarowe oparte na optycznych czuj-

nikach przyrostowych (główny tor pomiarowy) oraz na czujnikach absolutnych wykorzystujących szeregowy interfejs BiSS lub SSI (tor redundantny).

Tabela 4. Porównanie redundancji zbiorczej i szczegółowej

Struktura redundancji	Redundancja zbiorcza całego toru sterowania	Redundancja szczegółowa każdego toru elementu kontrolno-pomiarowego
Wady	<ul style="list-style-type: none"> • duże opóźnienia w reakcji na uszkodzenia • ograniczona zdolność autodiagnostyki systemu (przynajmniej awarii trudniej ustalić) 	<ul style="list-style-type: none"> • wyższa złożoność systemu sterowania (większa liczba połączeń) • wyższy stopień złożoności oprogramowania • większa ilość danych do przysyłania pomiędzy redundantnymi torami sterowania
Zalety	<ul style="list-style-type: none"> • duża niezależność obydwu torów sterująco-pomiarowych 	<ul style="list-style-type: none"> • możliwość autodiagnostyki systemu – szybsze usuwanie awarii przez serwis • szybsze zatrzymanie pracy w razie awarii • możliwość pracy przy częściowej awarii

Z punktu widzenia oprogramowania wykorzystane zostaną następujące metody w celu osiągnięcia właściwego poziomu bezpieczeństwa:

- zastosowanie redundancji na różnych poziomach oprogramowania,
- wykorzystanie autodiagnostyki,
- analiza logiczna i czasowa przebiegu realizacji programu w czasie rzeczywistym,
- testowanie poszczególnych modułów programu z wykorzystaniem metod inżynierii oprogramowania.

Wnioski

W pracy przedstawiono strukturę systemu sterowania dla telemanipulatora chirurgicznego o wysokim poziomie nienaruszalności bezpieczeństwa pracy. Przeanalizowano możliwe wybory dotyczące struktury sprzętowej systemu, struktury redundancji torów pomiarowych i sterujących oraz wybrane algorytmy sterowania nadążnego telemanipulatora. Przyjęta struktura systemu sterowania minimalizuje prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia niebezpiecznego poprzez szybkie zatrzymanie robota i przekwalifikowanie uszkodzeń niebezpiecznych na bezpieczne.

Dzięki przedstawionemu w pracy podejściu, polegającym na przekwalifikowaniu uszkodzeń niebezpiecznych na bezpieczne możliwe jest opracowanie układu sterowania, układów napędowych oraz opracowanie oprogramowania o poziomie nienaruszalności bezpieczeństwa znacznie wyższym niż w robotach przemysłowych. Dalsze prace polegać będą na doskonaleniu oprogramowania oraz na opracowaniu odpowiednich algorytmów autodiagnostyki i wykrywania wszystkich możliwych uszkodzeń. W pierwszej wersji planuje się budowę ukła-

du sterowania w oparciu o komputer przemysłowy, a w wersji docelowej w oparciu o system mikroprocesorowy.

Bardzo istotną częścią pracy, która została jeszcze do wykonania jest opracowanie algorytmów oceny poziomu nienaruszalności bezpieczeństwa. Metody obliczeniowe będą nieco zbliżone do tych stosowanych podczas oceny niezawodności, ale wykorzystujące dodatkowo informacje o prawdopodobieństwie wykrycia awarii, prawdopodobieństwie wystąpienia jednocześnie kilku awarii i o stopniu zagrożenia wynikającym z danej awarii.

Podziękowania

Autorzy pragną bardzo podziękować dr. Zbigniewowi Nawratowi, Pawłowi Kostce, Jackowi Teodorczykowi, Jakubowi Janiakowi, Piotrowi Wróblewskiemu i wszystkim pozostałym kolegom z FRK i IOiTBM PŁ za współpracę w pracach badawczych opisanych w tym artykule.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministra Nauki i Informatyzacji, wykonana w ramach realizacji Programu Wieloletniego pn. „Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008” oraz finansowana ze środków na naukę w latach 2003–2007 jako projekty badawcze 4T07D01330, 4T07D01329, 4 T07D 031 26, 5T07D 026 25.

Bibliografia

1. Missala T.: Robot jako system związany z bezpieczeństwem. Materiały VIII KKR, Polanica Zdrój, Politechnika Wrocławska, 2004.
2. Tou J.: Highly redundand sensing in robotic systems, Berlin Springer, C1990.
3. Bowling A. i inni: Modular redundand manipulator design for dynamic performance, 13th CISM – IFToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulator, Paris, France, July 1998.
4. Khatib O.: Motion and force control of robot manipulators, Proc. IEEE Int. Conf. Robotic and Automation 1986.
5. Dombre E. i inni: Intrinsically safe active robotic systems for medical applications, Proc. 1st IARP – IEEE/RAS Joint Worksop on Technical Callenges for Dependable for Dependable Robots in Human Environments, Seoul, May 21–22, 2001.
6. Kozłowski K., Dutkiewicz P., Wróblewski W.: Modelowanie i sterowanie robotów, Państwowe Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.

Recenzent:
Wojciech BLAJER

Treść artykułu była również prezentowana na konferencji „Postępy Technologii Biomedycznych” – Zabrze 2007.

Analysis of different structures of cardiochirurgical telemanipulator control system from safety requirements point of view

Key words

Surgical robots, safety systems, redundancy, fault diagnosis, control systems.

Summary

This paper discusses some problems concerned with safety requirements for the cardiochirurgical robot control system. Different structures of control systems for this kind of application has been presented and analysed. Also, various control methods have been analysed, including velocity and position control methods. Consequently, an original structure of a redundant control system has been proposed to meet all safety requirements for the cardiochirurgical telemanipulator system. The purpose of the developed control system is to secure the surgery process against hardware and software malfunctions as well as surgeon mistakes. Conclusions and propositions for future work have also been presented.