

Paweł Kostka,  
Dr inż. Politechnika Śląska Gliwice  
Instytut Elektroniki, Adiunkt,  
Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii, Zabrze

Zbigniew Nawrat  
Dr, dyr.naukowy IPS Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii, Zabrze  
Śląska Akademia Medyczna, Katowice

Robert Pruski  
Mgr inż., Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii, Zabrze

Zbigniew Małota  
Mgr, Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii, Zabrze

## **Systemy sterowania rodziny telemanipulatorów kardiochirurgicznych RobInHeart® 0,1 i 2 - rozwiązania techniczne**

*Przedstawiony został opis dwóch rozwiązań systemów sterowania dedykowanych dwóm zestawom manipulatorów kardiochirurgicznych Robin-Heart 0 i 1 oraz RobinHeart 2, powstałych w ramach realizacji projektu prowadzonego przez Fundację Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrzu we współpracy ze specjalistami z Politechniki Łódzkiej i Warszawskiej. Opracowany na podobnych założeniach funkcjonalnych całego układu manipulatora system bazujący na komputerze przemysłowym z magistralą VME w systemie czasu rzeczywistego OS9 oraz autorski system wykorzystujący mikroprocesory jednoukładowe oraz sygnałowe różnią się przyjętymi rozwiązaniami technicznymi.*

### **CONTROL SYSTEMS OF ROBIN-HEART® CARDIAC SURGERY TELEMANIPULATORS FAMILY – TECHNICAL SOLUTIONS**

*Two types of control systems, dedicated to cardiac surgery telemanipulators RobInHeart 0, 1, 2 are presented. The whole project is lead by Foundation of Cardiac Surgery Development in cooperation with specialists from the Technical University of Lodz and Warsaw University of Technology. Based on the same functional assumptions, system using industrial computer with VME bus with OS9 real time operational system and system based on  $\mu$ Controllers and DSPs were designed and created using different technical solutions.*

## 1. WPROWADZENIE

Opisane w pracy dwa typy systemów sterowania dedykowane są powstałym w ramach realizacji projektu badawczego prowadzonego przez Fundację Rozwoju Kardiologii w Zabrze w współpracy ze specjalistami z Politechniki Łódzkiej i Warszawskiej układom telemanipulatorów tworzących rodzinę RobInHeart 0, 1 i 2 [1]:

**RobInHeart 0,1** – wyposażony w silniki: AC Harmonic Drive zintegrowanego z przekładnią falową (I stopień swobody ramienia), Maxon DC BL, seria EC xx (II i III stopień swobody ramienia) oraz zestaw serw DC (Robin 0) i silników Maxon DC BL, EC6 (Robin 1) (5 stopni swobody dłoni do sterowania pracą narzędzi). -

**RobInHeart 2** – zunifikowane napędy dla wszystkich stopni swobody ramienia: serwa DC HTxx oraz miniaturowe serwa DC HTxx dla sterowania narzędzi.

System sterowania telemanipulatora chirurgicznego posiada dwa podstawowe i niezbędne tory przesyłu informacji pomiędzy chirurgiem-operatorem a ramię wykonawcze [2][4]:

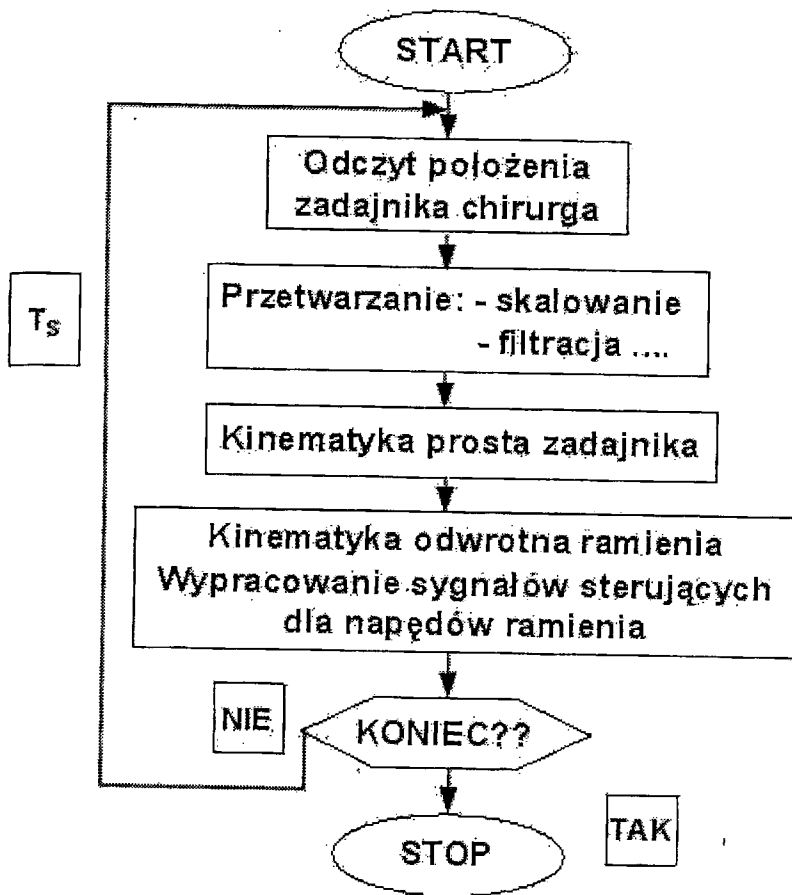
- Tor przesyłu wielkości zadanej (położenia/prędkości) od operatora do ramienia wykonawczego
- Tor sprzężenia zwrotnego wizyjnego

Opcjonalnie pożądanym jest wyposażenie systemu w tor zwrotnego odczuwania wrażeń dotykowych/siłowych (*ang. force feedback*), który technicznie może być zrealizowany z wykorzystaniem odczuć o charakterze mechanicznym/optycznym/akustycznym [3].

## 2. OPIS ROZWIĄZAŃ SYSTEMÓW STEROWANIA

### 2.1 Ogólna idea systemu sterowania

Idea systemu sterowania, przyjęta w omawianym projekcie jest wspólna dla dwóch proponowanych i testowanych rozwiązań technicznych. System pracuje w układzie manipulatora *Master-Slave*. Podstawowym zadaniem modułu sterowania, systemu pracującego w tej konfiguracji jest mapowanie ruchów operatora chirurga (zadajnika położenia/prędkości i ewentualnie innych wielkości fizycznych) na ruch ramienia wykonawczego, poprzez wypracowywanie odpowiednich sygnałów sterujących dla jego napędów (rys.1).



Rys.1 Schemat blokowy algorytmu mapowania ruchów zadajnika na ruch narzędzia wykonawczego telemanipulatora.

Podstawowe założenia systemów sterowania telemanipulatora:

1. Zapewnienie odpowiednio dużej wartości częstotliwości odświeżania w głównej pętli programu sterującego -  $F_s$ , wymaganej dla płynnej pracy ramienia wykonawczego podczas mapowania ruchów zadajnika operatora (wstępnie założono  $F_s = 1$  [kHz]).
2. Uzyskanie minimalnego, możliwego do zaakceptowania opóźnienia między ruchem zadajnika Master a ramieniem wykonawczym Slave:  $T_{DEL\_MIN}$ .
3. Zapewnienie wymaganej dokładności i rozdzielczości mapowania ruchów:  $R_{MIN} = 0.1$  [mm]
4. Implementacja skalowania wielkości zadanej, celem zwiększenia dokładności manipulowania oraz komfortu pracy, eliminacja efektu drżenia rąk operatora,
5. Eliminacja efektu ruchów „lustrzanych” – kierunek ruchów narzędzia na zewnątrz ciała pacjenta jest odwrotny do kierunku ruchu końcówek wewnątrz ciała – układ

- sterujący powinien to wyeliminować zapewniając zgodność kierunku ruchów chirurga z ruchami końcówki narzędzia obserwowanymi przez niego na monitorze.
6. Programowo/sprzętowa kontrola przekroczenia limitów ruchu dla danych osi.
  7. Zapewnienie komunikacji z modułem sterowania z poziomu komputera PC poprzez łącze RS lub Ethernet, w celu wprowadzania parametrów pracy oraz monitorowania istotnych wielkości obrazujących aktualny stan urządzenia.
  8. Opcjonalnie wprowadzenie pętli sprzężenia zwrotnego *Force-Feedback* z możliwością skalowania zwrotnych odczuć siłowych (względnie innych np. audio-wizualnych, termicznych, mechanicznych (wibracyjnych)) przekazywanych operatorowi.
  9. Opcjonalnie planowana jest implementacja programowa zespołów ruchów realizujących podstawowe procedury chirurgiczne w trybie pracy półautomatycznej – nadzorowanej przez operatora.

## 2.2 System na bazie mikroprocesorów jednoukładowych i sygnałowych (DSP) typu RISC najnowszej generacji, specjalizowanych do sterowania napędów

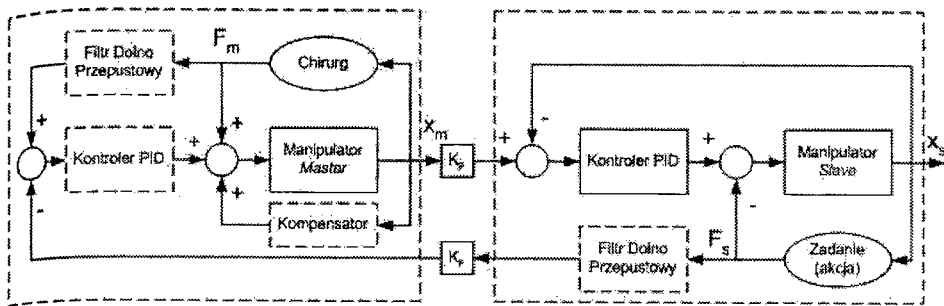
Niezwykłe szybki rozwój zarówno technologiczny jaki koncepcyjny mikroprocesorów, spowodował znaczny spadek cen specjalizowanych układów o bardzo wysokich parametrach. Pojawienie się na rynku w przystępnej cenie jednostek o dużych mocach obliczeniowych wraz z układami specjalizowanymi do sterowania napędami, umożliwiło budowę systemu sterowania telemanipulatora chirurgicznego.

### 2.2.1 Analiza istotnych cech procesorów jednoukładowych warunkujących ich przydatność do realizacji przedstawionego zagadnienia

Podstawowe właściwości procesorów jednoukładowych, które są istotne w aplikacjach związanych ze sterowaniem silnikami prądu stałego to:

- Realizacja sprzętowa algorytmu PWM (liczba kanałów oraz rozdzielczość)
- Liczba dostępnych liczników w systemie, ewentualnie specjalizowane wejścia sygnału enkodera (liczba bitów licznika)
- Wbudowana obsługa mnożenia sprzętowego (istotne przy realizacji algorytmu sterowania PID)
- Częstotliwość pracy zegara procesora (istotne dla częstotliwości bazowej PWM)
- Wielkość pamięci programu i danych (ogranicza złożoność systemu)
- Liczba wejść/wyjść cyfrowych (pozwala na wykorzystanie dodatkowych sygnałów sterujących)
- Wbudowany przetwornik analogowo/cyfrowy (rozdzielczość)
- Wbudowana obsługa komunikacji procesora jednoukładowego z jednostką nadrzędną.

Rys. 2 przedstawia strukturę jednego modułu systemu sterowania dla wybranego stopnia swobody zadajnika i napędu ramienia wykonawczego.



Rys. 2. Dwa tory przesyłu informacji z uwzględnieniem informacji zawartych w charakterystykach częstotliwościowych zdolności ruchowych człowieka.

gdzie:  $x_S$  – aktualna pozycja manipulatora *slave*  
 $x_M$  – aktualna pozycja manipulatora *master*  
 $K_P$  – współczynnik skalowania zakresu ruchów  $K_P < 1$   
 (efekt zmniejszanie ruchów-zwiększanie precyzji)

$$x_S = K_P x_M$$

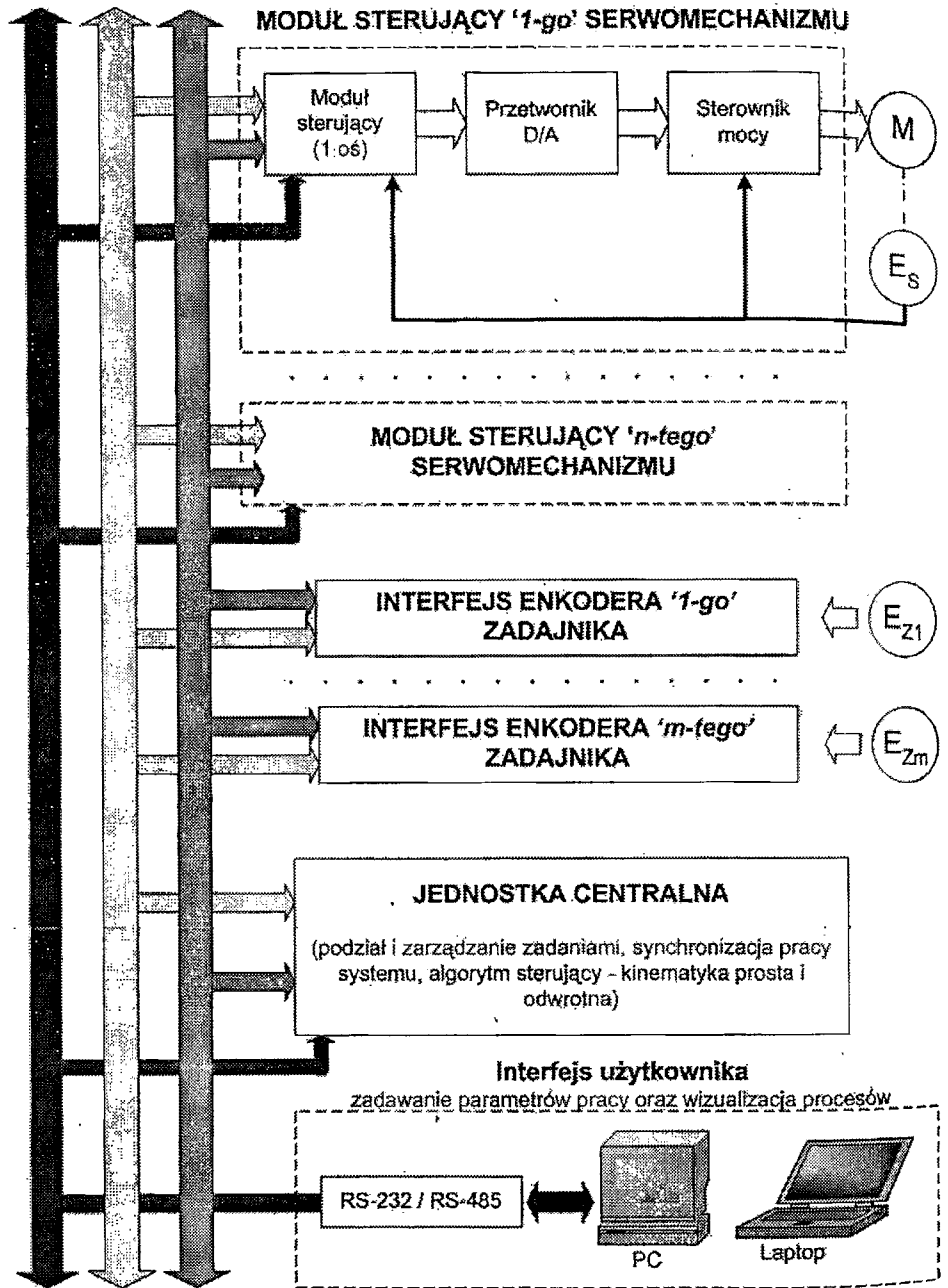
$F_S$  – aktualna siła nacisku narzędzia manipulatora *slave*  
 $F_M$  – aktualna siła nacisku zwrotnego manipulatora *master*  
 $K_F$  – współczynnik skalowania siły nacisku  $K_F > 1$   
 (efekt wzmacniania odczucia siły)

$$F_S = K_F F_M$$

Na przedstawionym schemacie zawarto dwa podstawowe tory przesyłu informacji: tor położenia zadajnika operatora oraz tor zwrotnego odczuwania siły przez operatora (na tym etapie realizacji projektu w fazie konstrukcji). Wielkości fizyczne charakteryzujące obydwa tory przesyłu danych mogą podlegać skalowaniu.

## 2.2.2 Struktura systemu

Procesor sygnałowy (testowane rozwiązania: Sharc ADSP-2106x Analog Device® oraz TMS 320xxx Texas Instruments) stanowi jednostkę centralną systemu, której zadaniem jest przeprowadzanie obliczeń związanych ze skalowaniem, rozwiązaniem równań kinematyki, podziałem i synchronizacją zadań (rys. 3). System wyposażony jest w zestaw  $N$  zaprojektowanych i uruchomionych modułów sterujących dla danej osi, wyposażony w regulator (specjalizowany procesor jednoukładowy PICxxx Microchip®), przetwornik 10/12 bit, D/A oraz sterownik mocy. Zadajnik teleoperatora jest podłączany do systemu przez układ  $M$  modułów sprzęgających, przesyłających informację z enkoderów i zadajnika do systemu. Niewątpliwą zaletą proponowanego układu, będącego aktualnie w fazie testów, jest elastyczność i rozwojowość systemu.



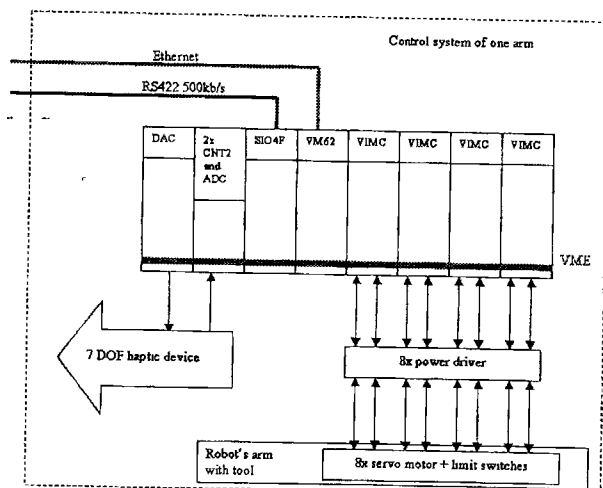
Rys. 3 Struktura systemu opartego na procesorach jednokładowych i DSP

Dzięki zapewnionej przez producentów „zgodności wstecz”, pozwala to na przenoszenie opracowanych algorytmów na pojawiające się nowe jednostki. Dostępne już teraz układy mają moc obliczeniową wymaganą dla stabilnej pracy systemu. Środowiska programowe dedykowane poszczególnym układom, pozwalają na implementację algorytmu sterowania w przyjaznych użytkownikowi warunkach. Koszty związane ze stosowaniem specjalizowanych układów są relatywnie wysokie jedynie w początkowej fazie realizacji projektu, przy zakupie narzędzi programowych.

W związku z zapowiedziami firmy Microchip pojawienia się na rynku w I kwartale 2004 roku nowej generacji procesorów przeznaczonych do sterowania napędów serii dsPIC, łączących w sobie cechy procesora jednocukładowego z rozbudowanymi peryferiami sterowania silników z właściwościami procesora sygnałowego (rozbudowany blok obliczeniowy) planowane jest zrealizowane opisanego projektu sterowania właśnie z wykorzystaniem tych układów.

### 2.3 System bazujący na komputerze przemysłowym PEP Modular Computers®

Jest to system sprawdzony w zastosowaniach komercyjnych (przemysłowych, medycznych i militarnych) bazujący na magistrali standardu VME (VersaModule Eurocard), z kartą główną VM62 na procesorze Motorola MC68060, pracującym w systemie czasu rzeczywistego OS9. System (Rys.4) wyposażony jest w specjalizowane karty przeznaczone do sterowania napędami. Specjalizowane karty pozycyjne (VIMC), pełnią funkcję regulatorów PID, realizowanych na bazie procesorów LM628, pracujących z  $f=8$  [MHz], wyposażonych w 12 bitowy przetwornik D/A oraz zespół wyjść/wejść cyfrowych ogólnego przeznaczenia. Karty liczników, pracujące w trybie obsługi sygnałów z enkoderów przyrostowych stanowią interfejs modułu sterowania od strony zadajnika. Oprogramowanie sterujące telemanipulatora powstało podczas realizacji projektu przy wykorzystaniu środowiska Hawk z kompilatorem skrótnym C++.



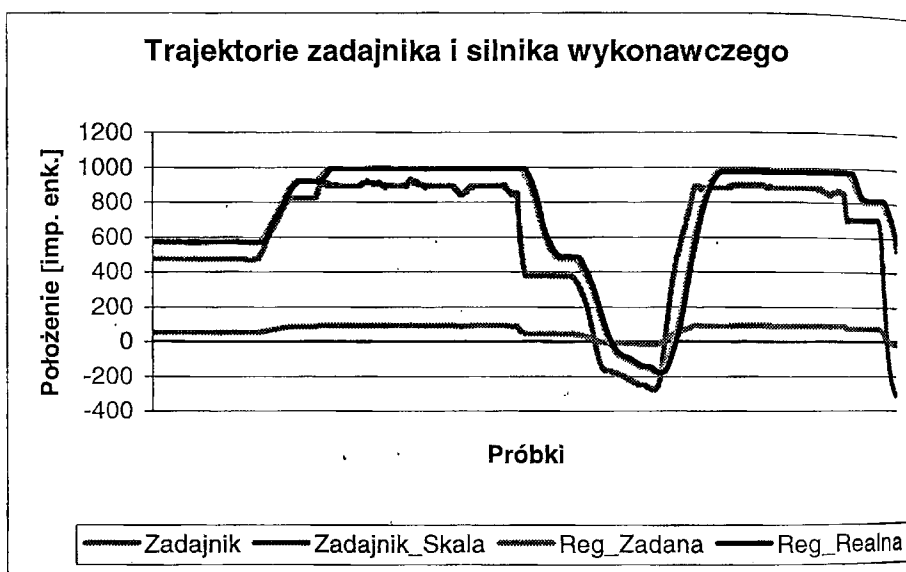
Rys. 4. Struktura systemu sterowania na bazie komputera przemysłowego PEP, pracującego w systemie czasu rzeczywistego OS9

### 3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Spełnione zostały podstawowe założenia systemu sterowania:

- Odwzorowanie ruchów / poleceń systemu zadajnika operatora na ruchy ramienia i narzędzi wykonawczych z wystarczającą częstotliwością odświeżania
- Skalowanie ruchów
- Filtracja dolnoprzepustowa (eliminacja drżenia rąk operatora)
- Limity ruchów nadzorowane sprzętowo i programowo

Rys. 5 przedstawia ilustrację działania opcji skalowania ruchów zadajnika oraz widoczny jest efekt zastosowania filtracji dolnoprzepustowej umożliwiającej eliminację niepożądanych składowych wysokoczęstotliwościowych wynikających z drżenia rąk operatora – „wygładzenie trajektorii ruchu”.



Rys.5. Przebieg trajektorii zadajnika (oryginalna oraz przeskalowana) oraz odpowiedniego silnika wykonawczego (zadana i rzeczywista).

Układ sterowania pozwala na wybór trybu sterowania: położeniowe lub prędkościowe i dostosowanie go do sterowanego obiektu.

Podczas realizacji projektu przeprowadzone zostały implementacje i testy różnych typów zadajników łączenie z wykorzystaniem sterowania głosem.

Porównując obydwa przyjęte do realizacji rozwiązania techniczne systemu sterowania można stwierdzić, że system oparty na  $\mu C$  i DSP w końcowej fazie realizacji projektu dorównał możliwościami uzyskanymi w rozwiązaniu wykorzystującym komputer przemysłowy z magistralą VME i specjalizowanymi kartami rozszerzeń. Obydwa rozwiąza-



nia pozwoliły na spełnienie podstawowych założeń warunkujących prawidłową pracę całego systemu. Uwzględniając jednak szybki postęp technologiczny i możliwości współczesnych układów, system bazujący na  $\mu C$  i DSP jako bardziej elastyczny, wydaje się mieć większe możliwości sprostania dalszym bardziej zaawansowanym wymaganiom stawianym przed systemem sterowania telemanipulatora chirurgicznego. Po zrealizowaniu poprawnie działającego systemu bazującego na klasycznych regulatorach PID, kolejnym etapem rozwoju może być implementacja bardziej zaawansowanych rozwiązań w tym zbliżonych do rzeczywistych układów regulacji, systemów rozmytych.

## PODZIĘKOWANIA

Praca finansowana z projektu badawczego KBN 8 T11E 001 18 oraz przez Fundację Rozwoju Kardiochirurgii. Serdecznie podziękowania składamy wszystkim osobom włączonym w prace nad projektem systemu sterowania na różnych etapach jego realizacji w tym szczególnie: E.Jezierskiemu, G. Granosikowi oraz M.Baczyńskiemu, jak również zaangażowanym bezpośrednio w prace wykonawcze systemów: A.Klisowskiemu, M.Jakubowskiemu, A.Kandorze.

## PIŚMIENNICTWO

- [1] Nawrat Z., Podsekdowski L., Mianowski K., Kostka P., Małota Z., Wróblewski P., Wróblewska A., Baczyński M., Jezierski E., Religa Z.: Robin Heart – aktualny stan realizacji prototypu. AUTOMATION 2003 Konferencja Naukowo-Techniczna. AUTOMATYZACJA- NOWOŚCI I PERSPEKTYWY. Warszawa, 2-4 kwietnia 2003r. Wyd, PIAP ISBN 83-914151-6-3, str 364-378
- [2] Brooks T.L., Telerobotics response requirements. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp: 113-120, Los Angeles, CA (1990)
- [3] Kim W.S., Developments of new force reflecting control schemes and an application to a teleoperation training. Proc. Of the IEEE Intern. Conf. On Robotics and Automation, pp. 1412-1419, Nice, 1992.
- [4] Kwon D., Woo K.Y., Microsurgical Telerobot System, Proc. Of the Int. Conf. On Intelligent Robots and Systems, Victoria B.C., Canada, Oct. 1998.