

Dr inż. Paweł Kostka,  
Instytut Elektroniki, Politechnika Śląska Gliwice  
Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii, Zabrze  
Dr Zbigniew Nawrat  
Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii, Zabrze,  
Śląska Akademia Medyczna, Katowice

## **SYSTEM STEROWANIA TELEMANIPULATORA ENDOSKOPOWEGO ROBIN HEART VISION**

*Prezentowana praca przedstawia założenia oraz proponowaną strukturę systemu sterowania tworzonego modelu telemanipulatora chirurgicznego toru wizyjnego (endoskopowego) dla operacji małoinwazyjnych – Robin Heart Vision. Zaprojektowany i wykonany system realizuje funkcje układu śledzącego telemanipulatora z dodatkowymi opcjami zwiększającymi precyzję oraz komfort pracy operatora. Bardzo istotne miejsce w prezentowanej pracy zajmuje opis podstawowych cech i realizujących je modułów systemu bezpieczeństwa stanowiących integralną część układu sterowania. Opiera on się na wykorzystaniu możliwości 'inteligentnych' sterowników EPOS jednostek napędowych firmy Maxon oraz zastosowania zdublowanych czujników rzeczywistej trajektorii zadajnika Master i ramienia Slave, na bazie czujników akcelerometrycznych i żyroskopowych oraz enkoderów położenia bezwzględnego.*

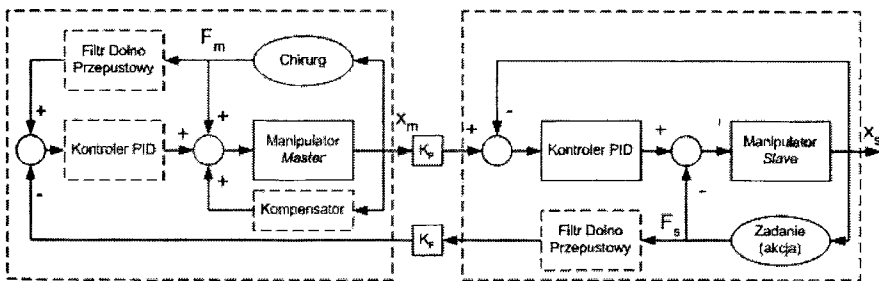
### **CONTROL SYSTEM OF THE ENDOSCOPE TELEMANIPULATOR ROBIN HEART VISION**

*Abstract. Presented work presents assumptions and proposed structure of the control system of created Robin Heart telemanipulator for vision (endoscope) channel in minimal invasive surgery. Designed solution works in the configuration of tracking system, reflecting the Master tool movement into the movement of Slave arm, with additional options improving the accuracy and work comfort for surgeon. Presented paper describes the role, features and hardware-software solutions for safety modules, which are the very important and integrated part of whole control system. It bases on the possibilities of 'intelligent' EPOS Maxon motor drivers as well as the application of accelerometer and gyroscopic sensors as a source of alternative information for real trajectory reading both for Master tool and Slave arm.*

# 1. WPROWADZENIE.

## 1.1. Podstawowe pętle sterowania i sprzężenia zwrotnego w systemie telemanipulatora chirurgicznego

System telemanipulatora chirurgicznego *Robin Heart* pracuje w konfiguracji typu *Master-Slave* (rys.1). Podstawowym zadaniem modułu sterowania tego systemu jest mapowanie ruchów operatora chirurga (zadajnika położenia/prędkości – narzędzie *Master*) na ruch ramienia wykonawczego (manipulator *Slave*) [1], poprzez wypracowywanie odpowiednich sygnałów sterujących dla jego napędów oraz wprowadzenie dodatkowych opcji opcjami zwiększającymi precyzję oraz komfort pracy operatora. Rys.1 przedstawia (linia przerywana), opcjonalny tor siłowego oddziaływania zwrotnego na operatora.



Rys. 1. 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  $K_P < 1$   
 $x_S = K_P x_M$   
 $F_S$  – aktualna siła nacisku narzędzia manipulatora *slave*  
 $F_M$  – aktualna siła nacisku zwrotnego manipulatora *master*  
 $K_F$  – współczynnik skalowania siły nacisku  $K_F > 1$   
 $F_S = K_F F_M$

## 1.2 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. Opracowanie i implementacja wielopoziomowego systemu bezpieczeństwa w oparciu o sygnały z czujników różnych typów.
5. Implementacja skalowania wielkości zadanej, celem zwiększenia dokładności manipulowania oraz komfortu pracy, eliminacja efektu drżenia rąk operatora,

6. 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.
7. Programowo/sprzętowa kontrola przekroczenia limitów ruchu dla danych osi.
8. 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.
9. Opcjonalnie wprowadzenie pętli sprzężenia zwrotnego *Force-Feedback* z możliwością skalowania zwrotnych odczuć siłowych (względnie innych np. audio-wizualnych, termicznych, mechanicznych (wibracyjnych)) przekazywanych operatorowi.
10. Opcjonalnie planowana jest implementacja programowa zespołów ruchów realizujących podstawowe procedury chirurgiczne w trybie pracy półautomatycznej – nadzorowanej przez operatora.

## 2. STRUKTURA SYSTEMU STEROWANIA TELEMANIPULATORA ROBIN HEART.

### 2.1 Jednostki napędowe.

Na podstawie doświadczeń własnych oraz analizy wymagań związanych z realizacją przyjętych założeń przyjęto zastosowanie jednostek napędowych firmy Maxon w postaci modułowych systemów złożonych z silnika bezszczotkowego prądu stałego (DCBL) wyposażonego w czujniki halotronowe + moduł przekładni planetarnej + przetwornik obrotowo-impulsowy (enkoder) jako czujnik faktycznie wykonanego przesunięcia generujące dane dla pętli sprzężenia zwrotnego toru regulacji.

Na podstawie opracowanych założeń, z uwzględnieniem prędkości max. oraz zakresu kąтового dla danego stopnia swobody telemanipulatora wyznaczona w specjalizowanych środowiskach symulacyjnych firmy Maxon, elementy składowe oraz parametry jednostek napędowych (typ silników DCBL, stopień i moment obrotowy wymaganych przekładni planetarnych).

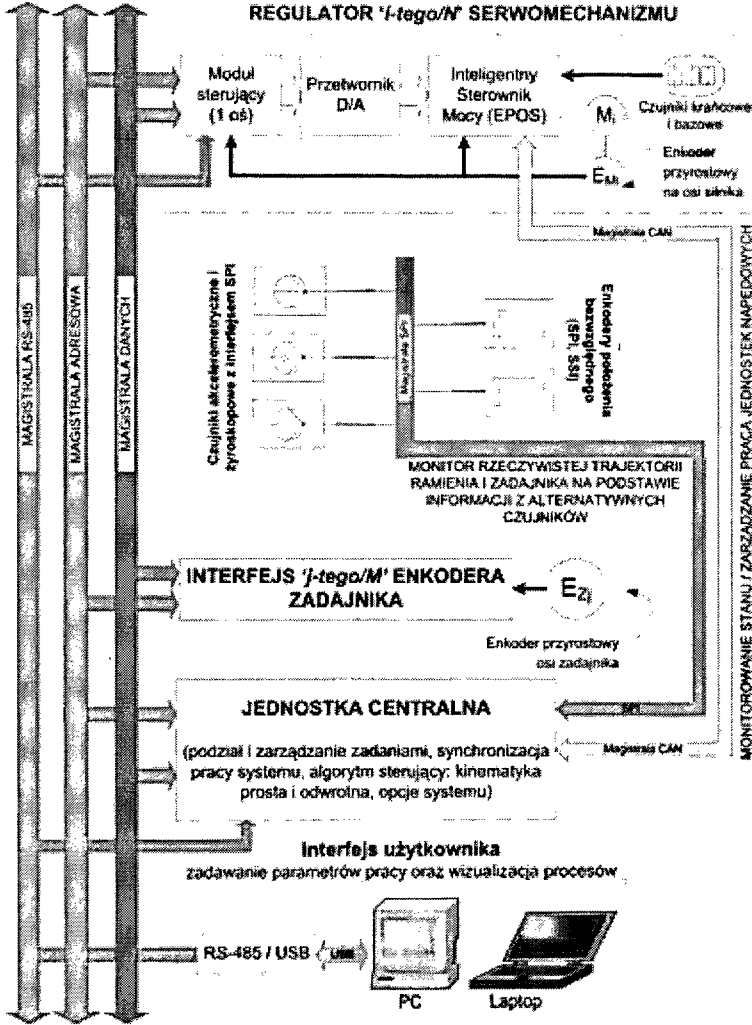
Istotną cechą wybranych jednostek napędowych jest kompleksowość proponowanych rozwiązań. Zestaw uzupełnia sterownik EPOS, wyposażony w blok regulatora PID, z wieloma dodatkowymi opcjami, zdolny do pracy w sieci modułów połączonych magistralą CAN.

W realizowanym rozwiązaniu sprzętowym przyjęto ideę umieszczenia sterowników EPOS w najbliższym możliwym sąsiedztwie jednostek napędowych. Ogranicza to znacznie długość niezbędnych połączeń kablowych, zmniejszając jednocześnie podatność systemu na zakłócenia zewnętrzne.

### 2.2 Struktura systemu sterowania.

System posiada strukturę modułowego, złożonego układu mikroprocesorowego (rys.2) (*Embedded System*) [2][3], w którym można wyróżnić wymienione poniżej jednostki połączone:

- magistralą wymiany danych (DataBus)
- magistralą adresowania modułów (Address Bus)
- komunikacji (sieć RS485 <-> USB <-> PC).
- magistrala CAN dla modułów sterowników EPOS
- magistrala SPI dla sieci czujników toru systemu bezpieczeństwa



Rys.2 Schemat blokowy systemu sterowania z modułami toru bezpieczeństwa  
Moduły – składniki systemu:

- I. Jednostka centralna na bazie mikroprocesora sygnałowego (16 lub 32 bitowy procesor zmiennoprzecinkowy), której zadaniem jest:
  1. Podział i synchronizacja zadań - zarządzanie pracą całego systemu

2. Odczyt pozycji czujników zadajnika Master oraz wypracowywanie i przesyłanie danych sterujących dla ramienia wykonawczego Slave (w trybie z wykorzystaniem kinematyki prostej zadajnika i odwrotnej ramienia)
3. Odczyt sygnałów z wejść ogólnego przeznaczenia (np. obsługa czujników limitów krańcowych lub bazowych oraz innych czujników wchodzących w skład systemu bezpieczeństwa robota)
4. Realizacja opcji systemu sterowania:
  - a) skalowanie ruchów
  - b) filtracja dolnoprzepustowa (eliminacja drżenia rąk operatora)

II. Moduły regulatorów silników DC/DCBL na bazie procesorów jednocukłowych specjalizowanych do sterowania napędów:

- Posiadają zaimplementowany algorytm PID
- Realizują trapezową trajektorię zadawania ruchu
- Umożliwiają sterowanie położeniowe lub prędkościowe
- Monitorowanie i ustawianie parametrów z użyciem programu interfejsu użytkownika na PC , przez łącze USB
- Sterowanie 2 osiami na jednym module PCB
- Tor akwizycji sygnału sprzężenia zwrotnego z enkoderów silnika oraz tor sterowania sterownikiem mocy Maxon DES/EPOS wyposażony w barierę galwaniczną
- Oddzielone masy zasilania części cyfrowej i sterownika Maxon
- Realizacja na druku 4-warstwowym z warstwą ekranowania

III. Moduły obsługi czujników zadajnika (narzędzie Master)

- Obróbka sygnałów z przetwornika obrotowo/impulsowego; detekcja kierunku ruchu
- Możliwość pracy w trybie skalowania x1 lub x4
- Tor akwizycji danych z enkoderów silnika wyposażony w barierę galwaniczną

IV. Elementy systemu bezpieczeństwa systemu, opisane w pkt. 3.

### 3. SYSTEM BEZPIECZEŃSTWA TELEMANIPULATORA ROBIN HEART

#### 3.1 Założenia ogólne.

Znaczna część czasu oraz mocy obliczeniowych układu sterowania systemu telemanipulatora (w rozwiązaniu docelowym ok. 60%) przeznaczona jest na zadania związane z obsługą modułów bezpieczeństwa układu.

Podstawowe elementy systemu bezpieczeństwa (rys.2):

- Monitorowanie stanu pracy jednostek napędowych, poprzez komunikację ze sterownikami EPOS, pracującymi w magistrali CAN, w tym m.in.:
  - wykrywanie przeciążeń prądowych
  - detekcja przekroczenia limitów krańcowych
- Ewentualne zatrzymanie pracy całego systemu i odblokowanie jednostek napędowych w celu przeprowadzenia manualnej obsługi ramion (rozkazy dla sterowników ESPOS -> CAN)
- Dublowanie czujników detekcji rzeczywistego przesunięcia na poszczególnych stopniach swobody, zarówno od dla zadajnika (narzędzie Master) jak i ramienia telemanipulatora (narzędzie Slave) z użyciem czujników akcelerometrycznych i żyroskopowych (rozdział 3.2) [4] lub przetworników obrotowo impulsowych położenia bezwzględnego.
- Wprowadzenie szybkiej szeregowej magistrali SPI dla sieci czujników akcelerometrycznych i żyroskopowych względnie enkoderów położenia bezwzględnego (rys.2) w celu monitorowania ich stanu

#### 3.2 Analiza przydatności czujników akcelerometrycznych i żyroskopowych w modułach bezpieczeństwa systemu sterowania telemanipulatora.

Do badań wytypowano wstępnie dwa typy dwuosiowych monolitycznych czujników przyspieszenia: ADXL202E [5] o zakresie pomiarowym  $\pm 2g$  i MXA2500 [6] o zakresie pomiarowym  $\pm 1g$  oraz dwa typy monolitycznych żyroskopów ADXRS150 [4] i ADXRS300 o zakresach pomiarowych  $\pm 150$  °/s i  $\pm 300$  °/s. W dwuosiowym akcelerometrze MXA2500 analizowany jest ruch ogrzanego gazu nad matrycą czujników temperatury natomiast w akcelerometrze ADXL202E mierzone są, za pomocą czujników pojemnościowych, przemieszczenia sprężystej mikrobelki krzemowej. W monolitycznym żyroskopie ADXRS150 mierzone są wychylenia drgającej mikrobelki krzemowej, spowodowane działaniem sił Coriolisa, występujących podczas ruchu obrotowego. Obydwa typy czujników występują w małych obudowach i mają masę poniżej 1g. Podstawowe parametry zastosowanych czujników (dla napięcia zasilania +5V) zestawiono w tabeli 1.

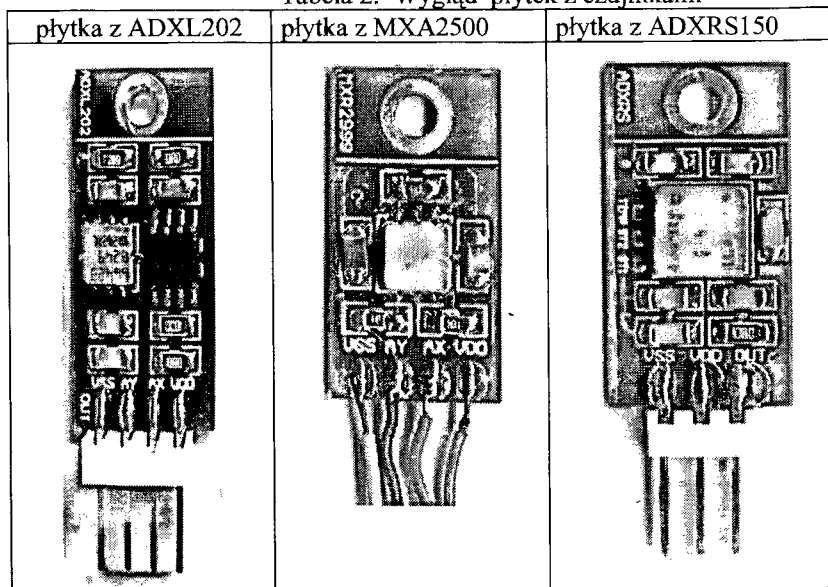
Tabela 1. Podstawowe parametry czujników

Czujnik	Zakres pom.	Czułość	Pasma	Gęstość mocy szumów
ADXL202	$\pm 2g$	312 mV/g <sup>+</sup>	0 – 50 Hz*	0.0002 g/ $\sqrt{Hz}$
MXA2500	$\pm 1g$	500 mV/g	0 – 20 Hz	0.0002 g/ $\sqrt{Hz}$
ADXRS150	$\pm 150^\circ/s$	12.5 mV/ $^\circ$	0 – 40 Hz*	0.05 $^\circ/s/\sqrt{Hz}$
ADXRS300	$\pm 300^\circ/s$	5 mV/ $^\circ$	0 – 40 Hz*	0.1 $^\circ/s/\sqrt{Hz}$

Podane w tabeli pasma przenoszenia oznaczone gwiazdką (\*) - zostały ukształtowane przez elementy zewnętrzne. Natomiast czułość akcelerometru ADXL202 oznaczona plusmem (<sup>+</sup>) odnosi się do wyjść  $X_{FIL}$  i  $Y_{FIL}$ . Aby nie obciążać tych wyjść zastosowano wzmacniacze separujące o jednostkowym wzmocnieniu. Wyjścia cyfrowe pozostają w tym układzie niewykorzystane. W czujnikach przyspieszenia sygnałami wyjściowymi są dwa napięcia proporcjonalne do składowych przyspieszenia ( $a_x$  i  $a_y$ ). W żyroskopie ADXRS150 sygnałem wyjściowym jest napięcie, proporcjonalne do szybkości obrotowej czujnika ( $\omega$ ).

Po wstępnych pomiarach do dalszych prac wykorzystano jedynie monolityczny żyroskop ADXRS150, ze względu na to, że występujące w manipulatorze prędkości kątowe nie przekraczały 150 $^\circ/s$ . Pomimo różnic w górnej częstotliwości granicznej czujników MXA2500 (20 Hz) i ADXL202 (50 Hz), przydatność obydwóch czujników jest porównywalna, gdyż spadek wzmocnienia dla akcelerometru MXA2500 w funkcji częstotliwości, jest częściowo kompensowany jego większą czułością. Czujniki zamontowano na płytkach drukowanych o wymiarach (w przybliżeniu) 25 x 15 mm, wyposażonych w łączówkę i otwór do mocowania. W tabeli 2 przedstawiono wygląd gotowych płytek z zamontowanymi czujnikami.

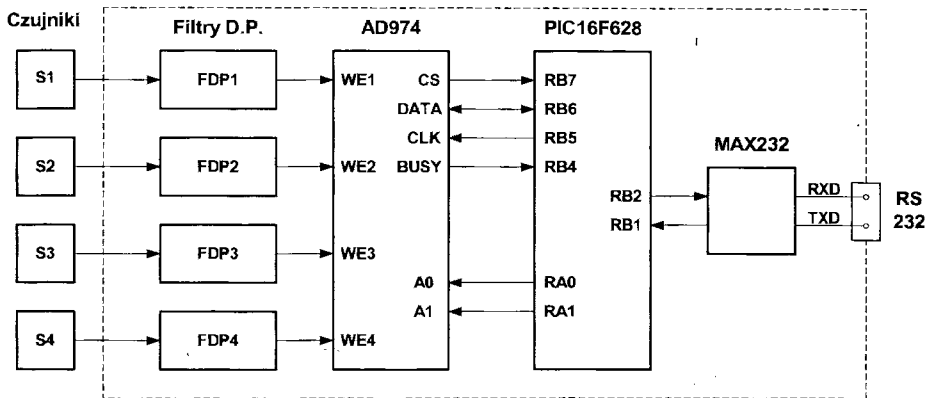
Tabela 2. Wygląd płytek z czujnikami



Niewielkie wymiary samych czujników pozwoliły na umieszczanie wielu czujników na ramieniu manipulatora bez zakłócania jego pracy.

### Interfejs pomiarowy

Na potrzeby pracy zaprojektowano i wykonano wyspecjalizowany interfejs pomiarowy pozwalający na transmisję analogowych sygnałów z czujników do komputera, za pomocą interfejsu szeregowego. Schemat blokowy układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 2. Układ zawiera 4 identyczne torów pomiarowe. W każdym z torów znajduje się filtr dolnoprzepustowy, o częstotliwości granicznej równej 50 Hz. Przetwarzanie analogowo-cyfrowe dokonywane jest za pomocą 16-bitowego przetwornika A/C typu AD974 z wyjściem szeregowym. Jednookładowy mikroprocesor typu PIC16F628 wytwarza odpowiednie sygnały sterujące dla przetwornika analogowo-cyfrowego, jak również przesyła dane do komputera przez interfejs szeregowy. Przyjęto częstotliwość próbkowania równą 800 Hz (200 Hz/kanał) i szybkość transmisji równą 19200 bitów/s.



Rys. 3. Schemat blokowy interfejsu pomiarowego.

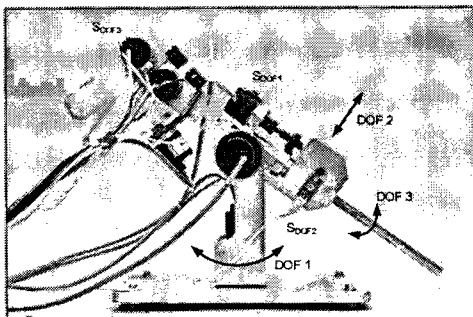
### Testy czujników żyroskopowych dla detekcji przesunięcia kąowego poszczególnych stopni swobody zadajnika (narzędzie Master)

Celem przeprowadzonych testów było ustalenie możliwości zastosowanie czujników żyroskopowych w torze systemu bezpieczeństwa, jako czujników dublujących przyrostowe przetworniki obrotowo-impulsowe stosowane w zadajniku Master systemu telemanipulatora Robin Heart.

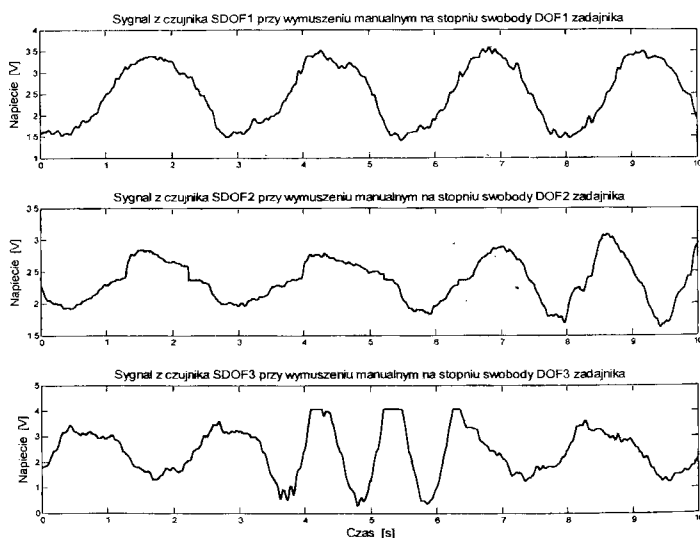
Moduły czujników umieszczone zostały prostopadle do trzech obrotowych osi zadajnika typu laparoskopowego (rys.4).



Rejestrowane sygnały napięciowe przy wymuszeniach manualnych operatora w pełnym zakresie kątowym ruchów, na kolejnych stopniach swobody przedstawia rys.5.



Rys. 4 Rozmieszczenie trzech czujników żyroskopowych ( $S_{DOF1}$  -  $S_{DOF3}$ ) detekcji przesunięcia kątowego dla trzech stopni swobody (DOF1-DOF3) zadajnika laparoskopowego telemanipulatora.



Rys.5 Wyjściowe sygnały napięciowe trzech czujników żyroskopowych, przy wymuszeniach manualnych operatora zadajnika na odpowiednich stopniach swobody (DOF).

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.

Przedstawiony w pracy, w dużej części zaimplementowany system sterowania z rozbudowanym torem bezpieczeństwa stanowi oryginalny projekt, scalający w sobie różnorodne efektywne rozwiązania zarówno na platformie sprzętowej jak i co istotniejsze w dziedzinie programowej użytych algorytmów. Sprawdzone protokoły komunikacyjne, dedykowane do poszczególnych rozwiązań (CAN, SPI) sprzęgają rozproszony system kilkunastu samodzielnych modułów mikroprocesorowych, zarządzanych przez jednostkę centralną o dużej mocy obliczeniowej na bazie 32 bitowego procesora (aktualnie testowane rozwiązania na rodzinie procesorów ARM oraz DSP Sharc Analog Device). Jednocześnie trwają prace nad doбором najbardziej efektywnych czujników pracują-

cych w torze bezpieczeństwa systemu, stanowiących alternatywne źródło informacji o stanie pracy systemu dla podstawowych przetworników obrotowo-impulsowych. Opracowanie systemu o uniwersalnych typach wejść i wyjść, realizującego zaprogramowane algorytmy sterowania z uwzględnieniem ochrony bezpieczeństwa będzie stanowiło końcowy efekt prowadzonych prac. Jednocześnie tak przygotowany system będzie elastyczny dla dalszych prac badawczych i rozwojowych co będzie pozwalało na efektywne wykorzystanie szybkiego postępu w dziedzinie sprzętowej technik mikroprocesorowych. Pozwoli to na implementację bardziej złożonych algorytmów w tym uwzględniających prócz zagadnień kinematycznych również aspekty dynamiki telemanipulatora.

**Podziękowania:** Projekt robota Robin Heart był finansowany w ramach projektu badawczego KBN 8 T11E 001 18, obecnie w ramach badawczego projektu zamawianego PW-004/ITE/02/2004 oraz przez Fundację Rozwoju Kardiologii i wielu sponsorów z których wymienię tylko Vattenfall, BPH, PKO SA.

#### Literatura.

- [1] Brooks T.L., Telerobotics response requirements. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp: 113-120, Los Angeles, CA (1990)
- [2] P.Kostka, Z Nawrat, R.Pruski, Z.Małota Systemy sterowania rodziny telemanipulatorów kardiologicznych Robin Heart 0,1 i 2 – rozwiązania techniczne. Automation 2004, Warszawa, PIAP, 467-476
- [3] P.Kostka, Z.Nawrat, Z.Małota, A.Kandora, „System sterowania oraz interfejs operatora robota RobInHeart – w kierunku bardziej przyjaznych dla chirurga rozwiązań”. Postępy Robotyki. Przemysłowe i medyczne systemy robotyczne. Pr. zb. pod red. K.Tchonia. Wyd. Komunikacji i Łączności. Wyd.1. Warszawa 2005. Str: 159-167.
- [4] S.Pietraszek, P.Kostka, Z.Nawrat, „Analiza ruchów ramienia robota kardiologicznego RobInHeart z wykorzystaniem monolitycznych czujników przyspieszenia oraz żyroskopów”. Postępy Robotyki. Przemysłowe i medyczne systemy robotyczne. Praca zbiorowa pod red. Krzysztofa Tchonia. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. Wydanie 1. Warszawa 2005. Str: 167-175.
- [6] ADXL202E Low-Cost  $\pm 2$  g Dual-Axis Accelerometer with Duty Cycle Output, ADXL202E\_a.pdf, Analog Devices, Inc., 2000, [www.analog.com](http://www.analog.com)
- [7] Improved, Ultra Low Noise  $\pm 1$  g Dual Axis Accelerometer with, Absolute Outputs, MXA2500GL/ML\_Rev\_C.pdf, MEMSIC, 2003, [www.memsic.com](http://www.memsic.com)