

Andrzej CZARNECKI  
Politechnika Śląska

## STANOWISKO DO BADAŃ UKŁADU STEROWANIA ELASTYCZNYM RAMIENIEM

**Streszczenie.** W pracy zaprezentowano opis stanowiska do badania algorytmów sterowania elastycznym ramieniem. Przedstawiono również ogólny opis poszczególnych elementów systemu sensorycznego zastosowanego w obiekcie, jak również zadań realizowanych w warstwie przetwarzania numerycznego. Niniejsze stanowisko podlega ciągłej modyfikacji stosownie do potrzeb wynikających z prowadzonych badań.

## TESTBED FOR TESTING OF FLEXIBLE ARM CONTROLLER

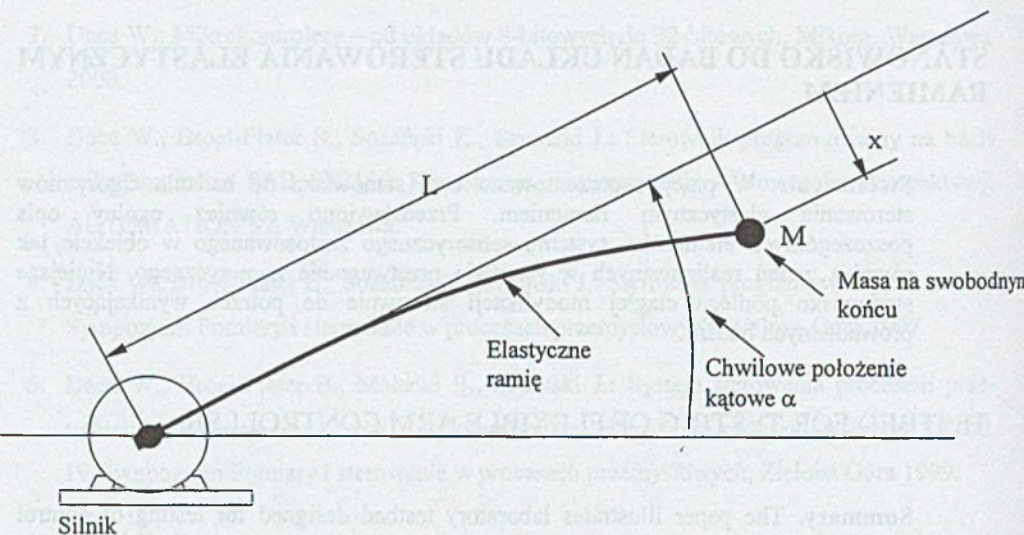
**Summary.** The paper illustrates laboratory testbed designed for testing of control algorithms. It is presented sensor system used in plant and tasks realized in numeric control layer. Presented testbed is still under modification adequatly to actual research.

### 1. Wprowadzenie

Szybki postęp technologiczny, jaki można zaobserwować od czasu wprowadzenia do powszechnego użytku mikroprocesorów, stawia coraz wyższe wymagania zarówno mechanice, napędom jak również sterowaniu. Wysoka precyzja przemieszczeń dużych mas przy zachowaniu dobrej dynamiki wydają się pozostawać w sprzeczności. Jednak coraz częściej zaawansowane technologie pozwalają urzeczywistnić zadania stawiane nowoczesnym układom mechatronicznym. Jednym ze sposobów poprawy jakości sterowania jest wprowadzanie nowych algorytmów, np. aktywnego tłumienia drgań elastycznego ramienia. Opisane dalej stanowisko ma służyć tworzeniu takich algorytmów sterowania na bazie nowoczesnego systemu pomiaru parametrów obiektu.

## 2. Obiekt sterowania

Schemat poglądowy stanowiska przedstawia się następująco:



Rys. 1. Schemat stanowiska

Fig. 1. Outlook of testbed

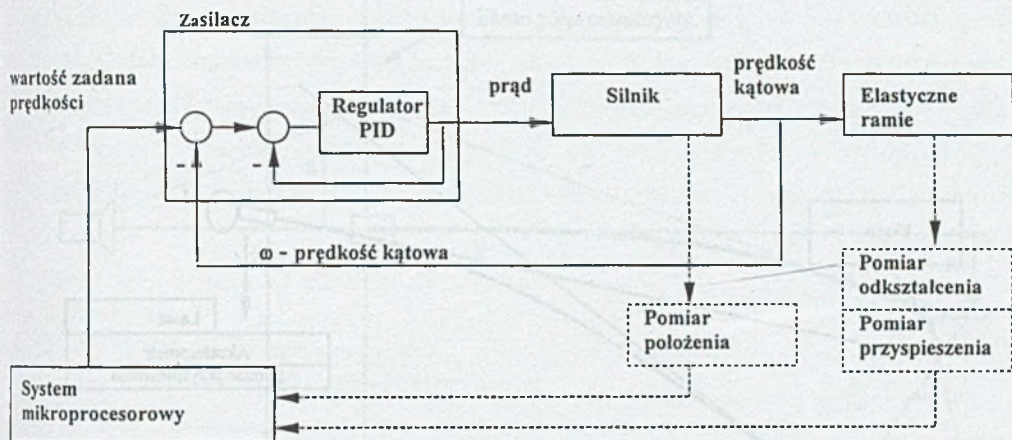
Obiektem sterowania jest pojedyncze elastyczne ramię, którego jeden z końców przymocowany jest bezpośrednio do osi silnika, natomiast drugi obciążony jest masą  $M$ . Prezentowany model zawiera belkę wykonaną w postaci płaskownika w dwóch różnych wersjach materiałowych:

- laminat szklano-epoksydowy,
- duraluminium.

Długość belki  $L$  wynosi 0.5m. Silnik wytwarza na swojej osi stały moment  $M_n$ . Problem sterowania elastyczną belką pojawia się wówczas, kiedy należy zmienić statyczne położenie katowe osi silnika z położenia  $\alpha_1$  do  $\alpha_2$ . Dowolne sterowanie wygenerowane w celu przemieszczenia końcówki ramienia z masą  $M$  pomiędzy położeniami  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  spowoduje powstanie drgań całego ramienia. Celem algorytmu tłumienia drgań jest włączenie wtedy takiego sterowania, aby amplituda powstałych drgań była jak najmniejsza, a czas ich trwania jak najkrótszy.



Schemat blokowy stanowiska ma następującą postać:



Rys. 2. Schemat blokowy stanowiska

Fig. 2. Testbed's scheme

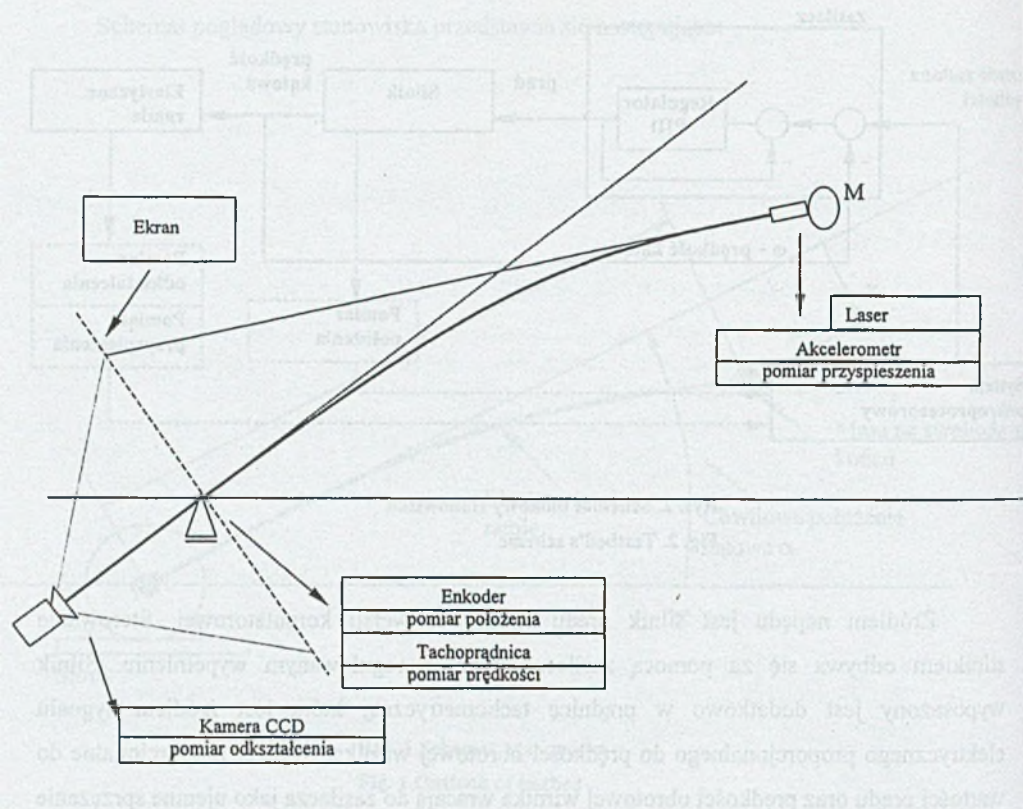
Źródłem napędu jest silnik prądu stałego w wersji komutatorowej. Sterowanie silnikiem odbywa się za pomocą zasilacza mocy o regulowanym wypełnieniu. Silnik wyposażony jest dodatkowo w prądnicę tachometryczną, która jest źródłem sygnału elektrycznego proporcjonalnego do prędkości obrotowej wirnika. Sygnały proporcjonalne do wartości prądu oraz prędkości obrotowej wirnika wracają do zasilacza jako ujemne sprzężenie zwrotne. Regulator wykorzystywany w zasilaczu jest regulatorem typu PID. Sterowanie zasilaczem wykonywane jest przez system mikroprocesorowy, w którym zaimplementowane są procedury aktywnego tłumienia drgań.

### 3. Pozyskiwanie informacji o obiekcie

W celu poprawnego sterowania ramieniem konieczny jest ciągły pomiar kilku następujących parametrów:

- prędkość obrotowa wirnika,
- kąt położenia wirnika,
- odkształcenie belki,
- przyspieszenie masy na końcu belki (opcjonalnie).

Wymienione wielkości muszą być mierzone w czasie rzeczywistym przy użyciu zintegrowanego ze stanowiskiem systemu sensorycznego.



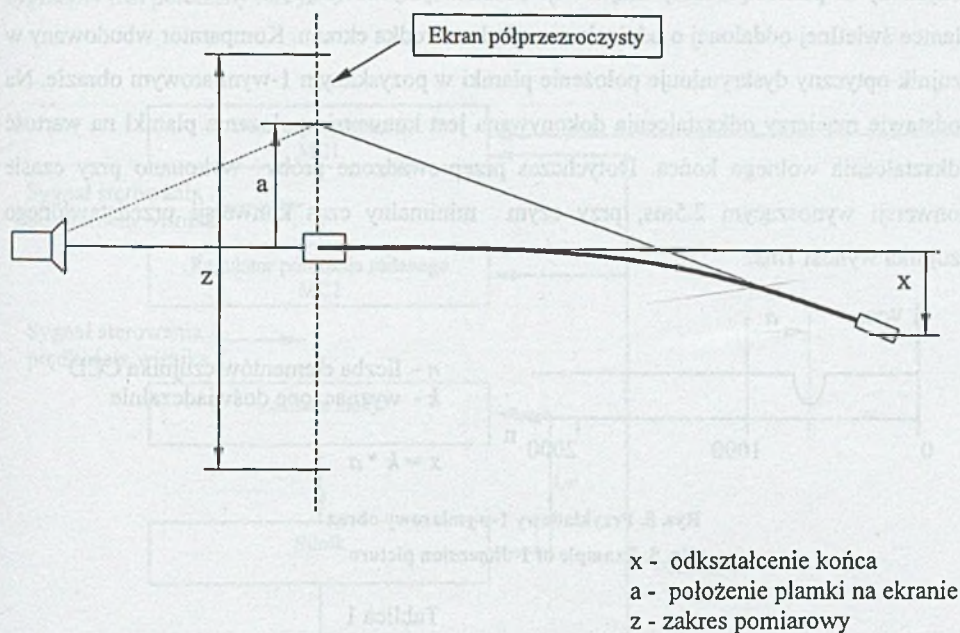
Rys. 3. Umieszczenie poszczególnych czujników pomiarowych na obiekcie  
Fig. 3. Sensors setting on testbed

Opis funkcjonowania poszczególnych czujników pomiarowych:

**Enkoder** - dyskretny pomiar położenia kąтового osi silnika; czujnik umiejscowiony na osi silnika. Rozdzielczość zastosowanego modelu wynosi 42000 imp./obr.

**Czujnik optyczny** - dyskretny pomiar odkształcenia



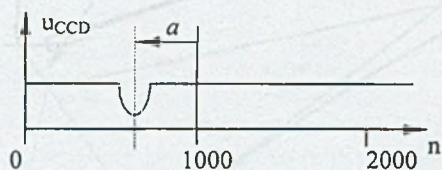


Rys. 4. Pomiar odkształcenia

Fig. 4. Measurement of bend

Zastosowany optyczny sposób pomiaru odkształcenia elastycznej belki pozwolił na wyeliminowanie problemów związanych z użyciem czujnika, jakim jest tensometr. Dzięki takiemu rozwiązaniu znikają trudności związane z umiejscowieniem i poprawnym zamontowaniem tensometru, natomiast wartość odkształcenia otrzymywana jest wprost w postaci cyfrowej. Działanie czujnika optycznego polega na pozyskiwaniu położenia plamki świetlnej na półprzezroczystym ekranie. Plamka świetlna powstaje w wyniku oświetlenia ekranu skupionym strumieniem światła. Źródłem światła jest laser półprzewodnikowy umieszczony na wolnym końcu elastycznego ramienia w taki sposób, aby oś belki pokrywała się z osią strumienia świetlnego. Kamera i ekran są sztywno przymocowane do osi silnika. Dzięki takiemu rozwiązaniu mierzone jest tylko chwilowe odkształcenie ramienia. Położenie plamki na ekranie jest proporcjonalne do odkształcenia końca belki, przy czym założono, że parametr sztywności ramienia jest tak dobrany, aby odkształcenie można było opisać za pomocą wielomianu 2 stopnia. Wartość kolejnych położen plamki należy pozyskać doświadczalnie w postaci macierzy odkształcenia, dzięki czemu możliwe będzie jednoznaczne przekształcenie dowolnego położenia plamki w wartość proporcjonalną do

położenia końca. Na rysunku poniżej przedstawiono przykładowy 1-wymiarowy obraz pozyskany za pomocą kamery linijkowej. Charakterystyczne zagłębienie wykresu odpowiada plamce świetlnej oddalonej o odcinek  $a$  względem środka ekranu. Komparator wbudowany w czujnik optyczny dyskryminuje położenie plamki w pozyskanym 1-wymiarowym obrazie. Na podstawie macierzy odkształcenia dokonywana jest konwersja położenia plamki na wartość odkształcenia wolnego końca. Dotychczas przeprowadzone próby wykonano przy czasie konwersji wynoszącym 2.5ms, przy czym minimalny czas konwersji przedstawionego czujnika wynosi 1ms.



$n$  - liczba elementów czujnika CCD  
 $k$  - wyznaczone doświadczalnie

$$x = k * a$$

Rys. 5. Przykładowy 1-wymiarowy obraz

Fig. 5. Example of 1-dimension picture

Tablica 1

Macierz odkształcenia

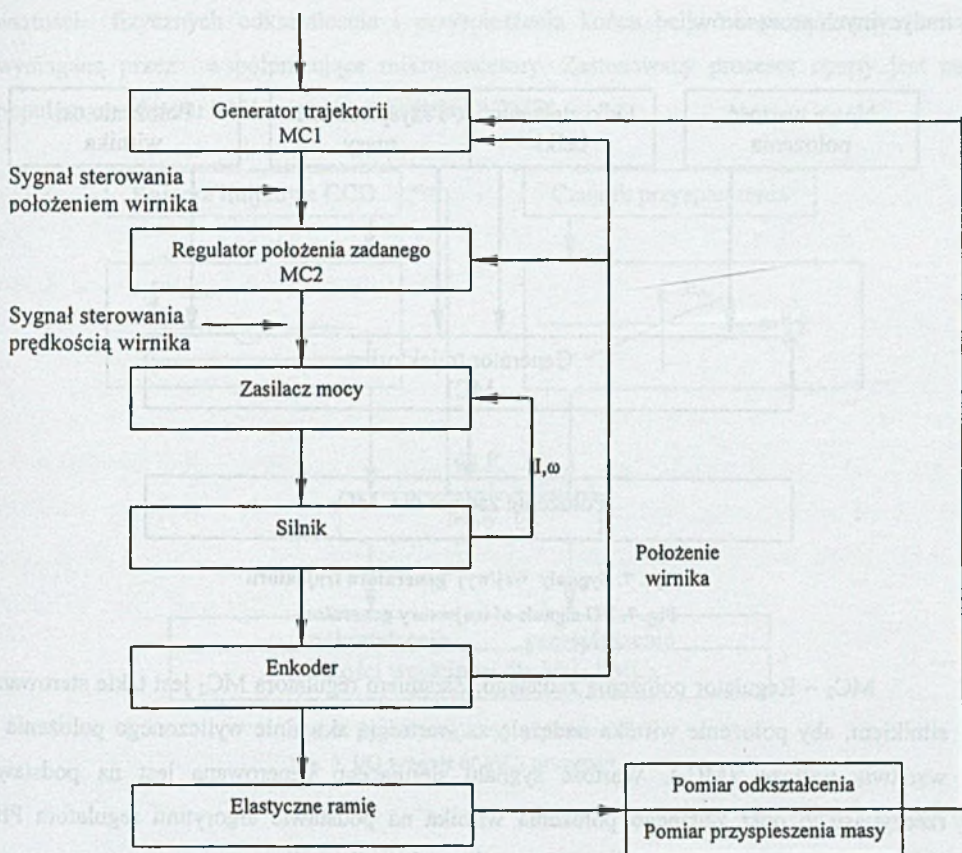
$a, n$	$x$
1	$-X_{\max}$
2	..
..	..
1000	0
..	..
2000	$+X_{\max}$

**Tachoprądnica** – analogowy pomiar prędkości obrotowej wirnika; czujnik umiejscowiony na osi silnika. Sygnał z tachoprądnicy wykorzystywany jest tylko jako sprzężenie zwrotne dla zasilacza i stanowi integralną część kompletnego serwonapędu.

**Akcelerometr** – analogowy pomiar przyspieszenia masy  $M$ , umiejscowienie na końcu elastycznej belki. Zasada działania półprzewodnikowego akcelerometru firmy MEMSIC opiera się na zmiennej (w zależności od kierunku przyspieszenia) konwekcji ciepła. Ogrzewany wewnątrz czujnika gaz wraz ze zmianą przyspieszenia powoduje zmianę gradientu temperatury w czterech punktach pomiarowych, a w rezultacie konwersję przyspieszenia na proporcjonalną wartość napięcia. Zastosowano czujnik o zakresie pomiarowym  $\pm 2g$  i częstotliwości granicznej 30Hz, dla której spadek wzmocnienia nie przekracza 3dB.



Schemat blokowy systemu sterowania wraz z uwzględnieniem poszczególnych sygnałów jest pokazany na rys. 6



Rys. 6. Schemat blokowy systemu sterowania

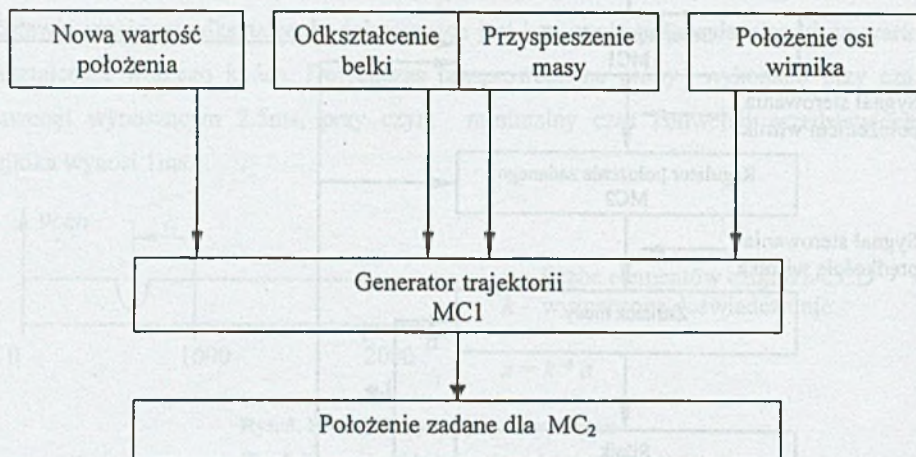
Fig. 6. Control system's scheme

#### 4. Przetwarzanie numeryczne

Przedstawiony system zawiera trzy mikroprocesory. Algorytmy, które zaimplementowano w każdym z nich, są następujące:

$MC_1$  – Generator trajektorii. Zadaniem mikroprocesora  $MC_1$  jest wykonywanie algorytmu tłumienia drgań na podstawie parametrów stanu obiektu: odkształcenia belki, przyspieszenia masy, kąta położenia osi wirnika z uwzględnieniem aktualnej wartości położenia zadanego. Wynikiem działania procedury jest nowe, chwilowe, obliczane w czasie

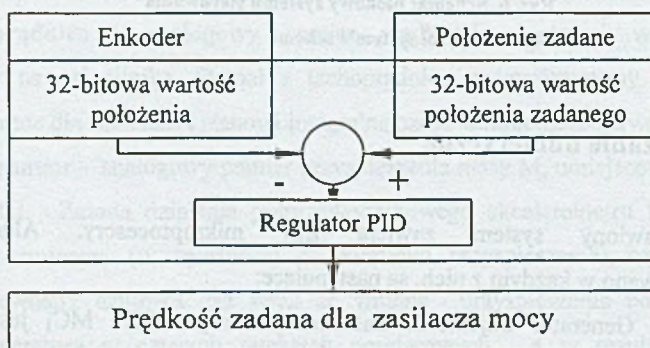
rzeczywistym położeniu osi wirnika. Użyty procesor jest procesorem sygnałowym typu TMS320F240 ze względu na większe możliwości obliczeń numerycznych względem tradycyjnych procesorów.



Rys. 7. Sygnały wej/wyj generatora trajektorii

Fig. 7. I/O signals of trajectory generator

MC<sub>2</sub> – Regulator położenia zadane. Zadaniem regulatora MC<sub>2</sub> jest takie sterowanie silnikiem, aby położenie wirnika nadążało za wartością aktualnie wyliczonego położenia w warstwie wyższej (MC<sub>1</sub>). Wartość sygnału sterującego generowana jest na podstawie rzeczywistego oraz zadane go położenia wirnika na podstawie algorytmu regulatora PID. Sygnałem wyjściowym jest analogowy sygnał sterujący dla zasilacza mocy.

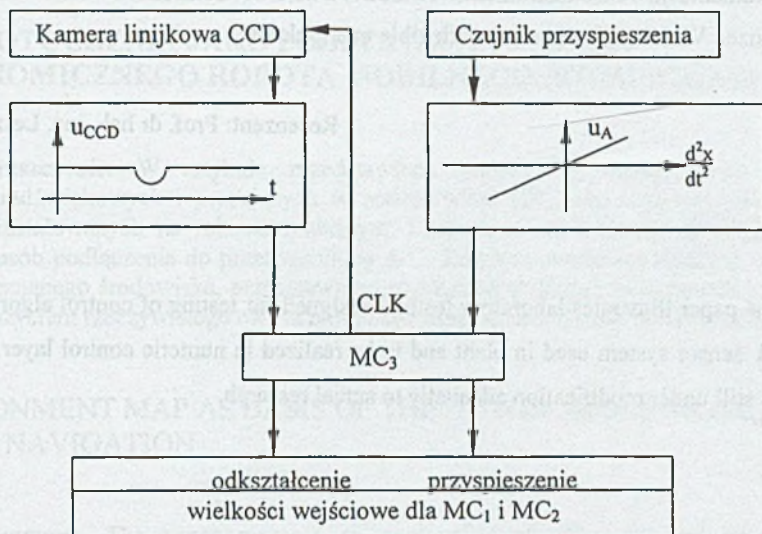


Rys. 8. Sygnały wej/wyj. regulatora położenia

Fig. 8. I/O signals of position regulator



MC<sub>3</sub> – pomiar odkształcenia, pomiar przyspieszenia masy. Mikroprocesor MC<sub>3</sub> steruje pracą czujników odkształcenia oraz przyspieszenia. Jego zadaniem jest przekształcanie wartości fizycznych odkształcenia i przyspieszenia końca belki na postać numeryczną wymaganą przez współpracujące mikroprocesory. Zastosowany procesor oparty jest na popularnym rdzeniu 8051 w wykonaniu firmy ATMEL.



Rys. 9. Sygnały wej./wyj. procesora MC<sub>3</sub>

Fig. 9. I/O signals of MC<sub>3</sub> processor

## 5. Podsumowanie

Przedstawione stanowisko zostało przygotowane w celu stworzenia możliwości prowadzenia badań nad algorytmami sterowania elastycznym ramieniem. Rozwój elektroniki w ostatnim czasie w dziedzinie pozyskiwania obrazu umożliwił nowe podejście do sposobu pomiaru odkształcenia. Zaproponowany system pomiarowy zostanie dokładnie zweryfikowany przez prowadzone badania i zapewne nie uchroni się przed niezbędnymi modyfikacjami, a w wyniku dalszych prac zrealizowane zostaną kompleksowe badania umożliwiające implementacje algorytmów aktywnego tłumienia drgań na opisanym stanowisku.

## LITERATURA

1. Craig J.J.: Wprowadzenie do robotyki. Mechanika i sterowanie. WNT, Warszawa 1995.
2. Riege B., Artega M.: Experimental modeling of a two-link flexible manipulators.
3. Dokumentacja Schäfter + Kirchhoff GmbH.: CCD line scan camera.
4. Dokumentacja Texas Instruments: TMS320F24x DSP Controller.
5. Bernzen W.: Vibration control of flexible manipulator.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Leszek Trybus

## Abstract

The paper illustrates laboratory testbed designed for testing of control algorithms. It is presented sensor system used in plant and tasks realized in numeric control layer. Presented testbed is still under modification adequately to actual research.