

*roboty wiszące na linach,  
transport w pomieszczeniach zamkniętych,  
roboty o zamkniętym łańcuchu kinematycznym*

Michał BACZYŃSKI<sup>1</sup>  
Janusz BACZYŃSKI<sup>2</sup>  
Andrzej BARTOSZEWICZ<sup>3</sup>

### **ROBOT WISZĄCY NA LINACH – ALTERNATYWNE URZĄDZENIE DO PRECYZYJNEGO PRZENOSZENIA OBIEKTÓW W PRZESTRZENIACH ZAMKNIĘTYCH**

*W pracy zaprezentowano, zaprojektowany i zbudowany w Instytucie Automatyki Politechniki Łódzkiej, robot wiszący na sześciu linach. Opisany robot wyposażony jest w napędy elektryczne, ma zamknięty łańcuch kinematyczny i liczbę stopni swobody pozwalającą na łatwe omijanie przeszkód znajdujących się w jego przestrzeni roboczej. Idea konstrukcji opisywanego urządzenia oparta jest na tzw. odwróconej platformie Stewarta, ale została wzbogacona przez dodanie ruchomych punktów zaczepienia sześciu lin podtrzymujących platformę roboczą. Robot może stanowić atrakcyjną alternatywę dla często stosowanych suwnic bramowych oraz dźwigów z ruchomą szyną jezdnią mocowaną do stropu znajdującego się ponad przestrzenią roboczą urządzenia.*

### **CABLE SUSPENDED ROBOT – AN ALTERNATIVE INDOOR DEVICE FOR PRECISE CARRYING OF HEAVY OBJECTS**

*The paper presents a new cable suspended robot which has recently been designed and built at Institute of Automatic Control, Technical University of Łódź. The robot is equipped with electric drives. Furthermore, it is characterized by the closed kinematic chain and the number of the degrees of freedom which allows easy obstacle avoidance in its workspace. The robot design is to some extent motivated by the idea of inverted Stewart platform, however its construction has been enhanced by the introduction of the movable mounting of the suspension cables. The robot may possibly present an attractive alternative for the currently popular standard and gantry type overhead cranes.*

---

<sup>1</sup> Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki; 90-924 Łódź; ul. Stefanowskiego 18/22. Tel: +48 42 631-25-56;  
E-mail: mbaczyn@p.lodz.pl

<sup>2</sup> Uniwersytet Łódzki, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej; 90-236 Łódź; ul. Pomorska 149/153. Tel:  
+48 42 635-56-28;  
E-mail: bacz@uni.lodz.pl

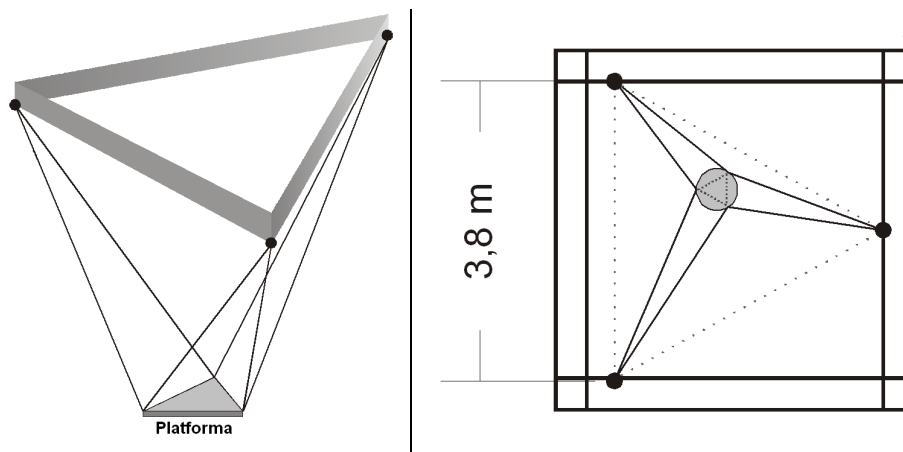
<sup>3</sup> Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki; 90-924 Łódź; ul. Stefanowskiego 18/22. Tel: +48 42 631-25-58;  
E-mail: andrzej.bartoszewicz@p.lodz.pl

## 1. WSTĘP

Celem referatu jest przedstawienie rezultatów wykonanych w Instytucie Automatyki Politechniki Łódzkiej prac nad budową wiszącego robota [1, 2, 3] o zamkniętym łańcuchu kinematycznym. Robot tego typu zapewnia duży udźwig oraz dobrą sztywność i wysoką precyzję działania w przestrzeni roboczej z przeszkodami. Dlatego może on być atrakcyjną alternatywą dla innych obecnie stosowanych urządzeń do transportu różnorodnych obiektów w przestrzeniach zamkniętych [4].

## 2. PODSTAWOWA KONSTRUKCJA ROBOTA

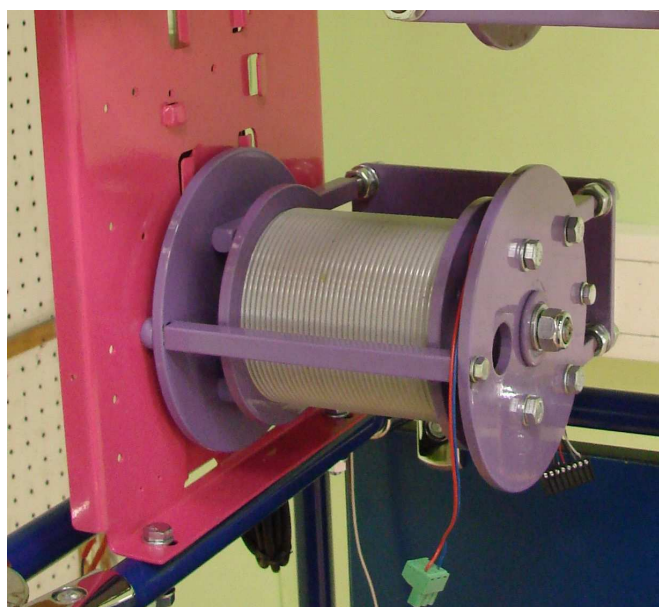
W ramach omawianych prac, na wstępie zbudowano konstrukcję nośną, a więc szkielet, na którym następnie zawieszono wszystkie elementy robota – napędy, zestaw zasilaczy oraz układ sterowania. Konstrukcja została wykonana z lekkich proszkowo malowanych rur aluminiowych i wzmocniona profilami zamkniętymi. Omawiana konstrukcja została także częściowo wypełniona elementami usztywniającymi, co poprawiło zarówno jej właściwości statyczne, jak i przyczyniło się do lepszego tłumienia ewentualnych drgań, które potencjalnie mogłyby być niekorzystne dla prawidłowej pracy budowanego robota. Następnie na tak przygotowanej konstrukcji mocujące wszystkie elementy robota, umieszczono jego ruchomą platformę. Platforma zawieszona jest na sześciu stalowych linach z nylonowym oplotem. Schemat ideowy sposobu mocowania wiszącej platformy przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat wiszącej platformy – rzut izometryczny (po lewej) oraz widok z góry (po prawej stronie)

Aby możliwa była zmiana położenia i orientacji platformy, liny mocujące nawijane są na bębny obracane silnikami elektrycznymi prądu stałego. Wszystkie bębny są dwustronnie

łożyskowane i mają średnicę 12 centymetrów. Warto także w tym miejscu zauważyć, że bębny mocowane są do aluminiowej konstrukcji nośnej, dzięki czemu możliwe jest ich względnie łatwe przemieszczanie, co pozwoliło na przeprowadzenie wielu eksperymentów w początkowej fazie konstrukcji robota. Ponieważ dla prawidłowej pracy robota konieczne jest równomierne nawijanie lin na bębny, w prowadzonych badaniach zastosowano dodatkowe dociski (o regulowanej sile docisku), których zadaniem jest zapewnienie właściwego ułożenia lin w trakcie ich nawijania na bębny. W pierwszej wersji zastosowano do tego celu dociski teflonowe. Jednak ze względu na ich stosunkowo szybkie wycieranie się, nie sprawdziły się one w czasie prowadzonych testów i po wstępnych próbach zostały zastąpione dociskami miedzianymi. Ponieważ jednak samo zastosowanie docisków mogłoby nie być wystarczające (przy szybkim ruchu robota i występowaniu zewnętrznych zakłóceń mogłoby nie gwarantować prawidłowego nawijania lin), w ramach prowadzonych prac zaproponowano dodatkowo rozwiązanie polegające na zastosowaniu bębnow gwintowanych, albo inaczej mówiąc bębnow, w których wykonano spiralny rowek o średnicy liny, prowadzący ją przy nawijaniu na bęben. Rysunek 2 pokazuje gwintowany bęben zastosowany w zbudowanym robocie.



Rys. 2. Gwintowany bęben nawijający liny

Zastosowanie specjalnie przygotowanych bębnow nawijających okazało się bardzo skutecznym rozwiązaniem i zapewniło właściwą pracę urządzenia nawet w bardzo niekorzystnych okolicznościach sztucznie generowanych w trakcie przeprowadzonych prób.

Jak już wcześniej wspomniano bębny napędzane są silnikami elektrycznymi prądu stałego. Silniki te zasilane są napięciem 24 woltów, a ich wały połączone są – za pomocą

przekładni redukcyjnych – z osiami bębnow, na które nawijane są liny podtrzymujące ruchomą platformę robota. Wały silników wyprowadzone są z obu stron ich obudowy. To rozwiązanie umożliwia umieszczenie po jednej stronie silnika przekładni i napędzanego bębna zwijającego lub rozwijającego linę, zaś z drugiej strony – za pośrednictwem sprzęgła redukującego średnicę wału – przetwornika obrotowo-impulsowego (enkodera) służącego do pomiaru położenia kąтового, a pośrednio także położenia lub prędkości kątowej bębna i położenia lub prędkości liniowej liny podtrzymującej ruchomą platformę robota. Takie rozwiązanie, dzięki umieszczeniu enkodera na wale silnika przed przekładnią redukcyjną zapewnia dużą dokładność pomiaru i daje możliwość dokładniejszego sterowania wiszącą platformą niż byłoby to możliwe gdyby pomiaru dokonywano enkoderem umieszczonym za przekładnią pośredniczącą, tj. nie na wale silnika, lecz na wale bębna zwijającego linę.

Punkty mocowania lin na płaszczyźnie platformy z założenia tworzą trójkąt równoboczny. Po wstępnych próbach zdecydowano się powiększyć platformę do koła zabezpieczonego aluminiową obręczą tak, aby w przypadku zderzenia z elementami otoczenia lub ludźmi zminimalizować negatywne skutki takiego zdarzenia. Liny mocowane są za pomocą karabinków do metalowych oczek, które są trwale związane z platformą. Takie rozwiązanie umożliwia łatwą wymianę platformy na inną w celu przetestowania sztywności platform o różnych kształtach i ciężarach.

Wykonane próby przemieszczania prezentowanej platformy pokazały, że zachowuje ona bardzo dużą sztywność w centralnej części obszaru roboczego robota. Sztywność jej jest jednak zmienna w zależności od położenia i orientacji platformy oraz kierunku niekorzystnie działających sił.

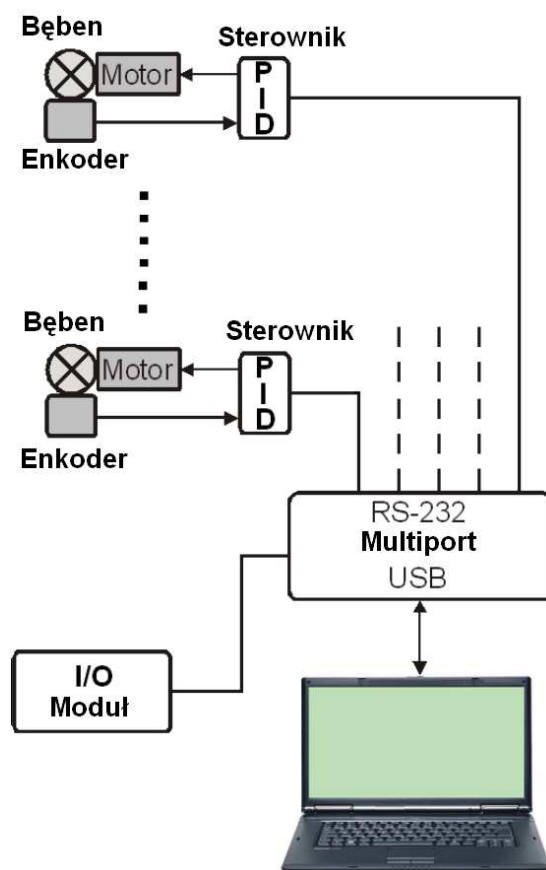
### 3. UKŁAD STEROWANIA ROBOTA

Schemat układu sterowania pokazano na rysunku 3. Układ ten jest nadzorowany przez komputer PC z zainstalowanym systemem operacyjnym Windows XP. Główna aplikacja, która kontroluje pracę całego robota oraz stanowi testowy interfejs użytkownika została stworzona z wykorzystaniem środowiska programistycznego Borland Builder C++. Program ten przesyła komendy z komputera PC do sterowników PID cztery razy na sekundę. Natomiast sterowniki PID pracują z częstotliwością 65 kHz i nadzorują pracę poszczególnych napędów. Sterowniki silników podłączone są za pomocą łącza szeregowego do multiportu, zaś multiport połączony jest poprzez port USB z komputerem PC nadzorującym działanie całego robota. Wykorzystany multiport umożliwia podłączenie do niego maksymalnie 16 urządzeń komunikujących się za pośrednictwem łącza RS. Natomiast multiport podłączony jest do komputera poprzez jeden port USB, a dołączony driver instaluje w systemie operacyjnym 16 wirtualnych portów RS.

Każdy silnik napędzający bęben można sterować w dwóch trybach: w trybie zadawania położenia oraz w trybie zadawania prędkości ruchu. W trybie sterowania położeniem możliwe jest zdefiniowanie i zadanie tzw. trapezowego profilu prędkości, tj. narzucenie maksymalnego zadanego przyspieszenia i maksymalnej prędkości ruchu. W trybie sterowania prędkością możliwe jest ograniczenie szybkości rozpędzania i zatrzymywania poprzez zadanie wartości przyspieszenia i opóźnienia.

Istotną rolę w układzie sterowania robotem pełnią też optoelektroniczne, szczelinowe wyłączniki krańcowe i czujnik bazujący. Uaktywnienie wyłącznika krańcowego powoduje automatycznie odpowiednią polaryzację napięcia wejściowego zabezpieczonego silnika, co

chroni przed przekroczeniem maksymalnego dopuszczalnego zakresu ruchu danego napędu robota, a jednocześnie umożliwia jego powrót do przestrzeni roboczej. Z kolei zamontowany w układzie sensor bazujący pozwala na precyzyjne osiągnięcie pozycji home po każdym włączeniu zasilania. Dzięki temu, po jednokrotnym bazowaniu początkowym, mierząc za pomocą zliczających przetworników obrotowo-impulsowych, jedynie przyrosty poszczególnych zmiennych wewnętrznych robota, układ sterowania ma cały czas informację o bezwzględnym położeniu każdego napędu, a zatem także o położeniu i orientacji wiszącej platformy. Stany czujników krańcowych i bazujących są odczytywane z wykorzystaniem modułu wejść/wyjść oznaczonego na rysunku jako „I/O Moduł”, a przedstawiony moduł komunikuje się z komputerem za pośrednictwem opisanego już wcześniej multiportu.



Rys. 3. Układ sterowania

Do nadzorowania pracy robota zastosowano także zadajnik, który umożliwia sterowanie w trybie teleoperacyjnym. Rozważano zastosowanie zadajnika pasywnego lub aktywnego jako interfejsu użytkownika. Urządzenie pasywne odczytuje zamiary użytkownika poprzez

miar jego zachowań. Interfejs aktywny nie tylko odczytuje komendy wydawane przez człowieka, ale również umożliwia przekazanie informacji o stanie manipulatora lub środowiska, w którym działa do człowieka. W zależności od aplikacji informacje odczytane przez interfejs są różne, mogą dotyczyć położenia, prędkości, przyspieszenia, siły lub kombinacji tych wielkości. Za pośrednictwem interfejsu użytkownika człowiek może kierować ruchem i zachowaniem platformy wiszącej w czasie rzeczywistym. Aktywne interfejsy przekazują informacje nie tylko od użytkownika do manipulatora, ale również w drugą stronę. Najczęściej wielkością fizyczną, która jest odczytywana po stronie manipulatora i przekazywana człowiekowi jest siła. Zadajniki, które umożliwiają wygenerowanie poczucia siły nazywane są zadajnikami haptycznymi. Do sterowania wiszącego robota wybrano komercyjny sześciosiowy zadajnik o nazwie PHANTOM Omni firmy SensAble Technologies. Końcówka tego zadajnika ma kształt wskaźnika – długopisu i jest wyposażona w dwa przyciski, które można dowolnie wykorzystać. PHANTOM Omni do komunikacji z komputerem PC używa interfejsu standardu IEEE-1394 FireWire. Do urządzenia producent dołącza zestaw narzędzi dla programistów Open Haptics Toolkit, który został wykorzystany do tworzenia aplikacji wykorzystujących zadajnik do sterowania robotem.

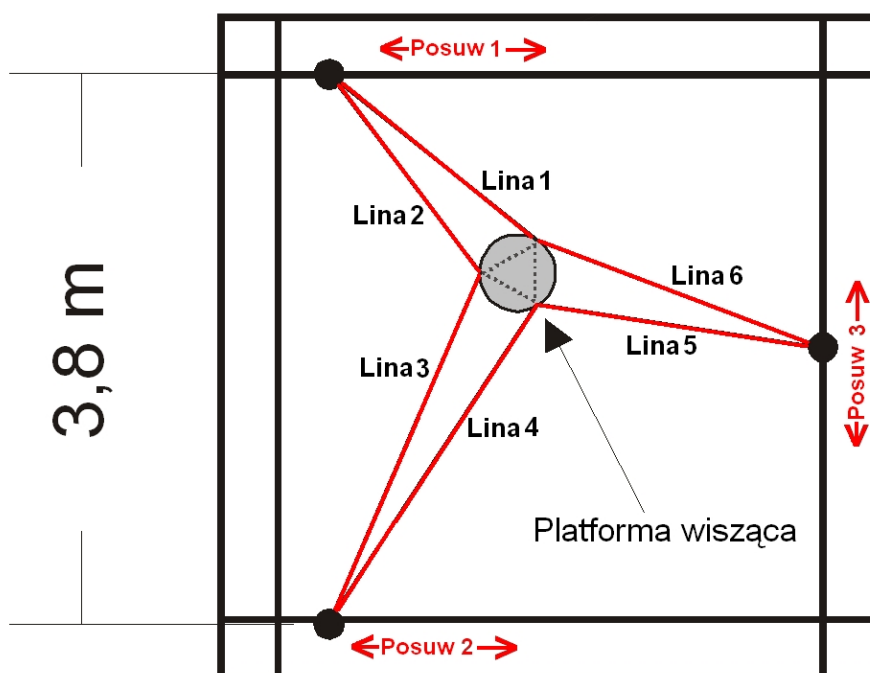
#### **4. ZASTOSOWANIE RUCHOMYCH PUNKTÓW ZACZEPIENIA LIN PODTRZYMUJĄCYCH WISZĄCĄ PLATFORMĘ**

Po wykonaniu wstępnych badań efektywności działania robota, został on rozbudowany o dodatkowe trzy złącza redundantne. Punkty zaczepienia lin zostały umieszczone na ruchomych wózkach, a co za tym idzie mogą być przesuwane wzdłuż linii prostych. Schematycznie nową konfigurację robota składającą się z sześciu zwijanych lin i trzech przesuwów liniowych przedstawiono na rysunku 4.

Zakres ruchu każdego posuwu liniowego wynosi 3 metry. Elementem napędowym posuwu jest elektryczny siłownik, który poprzez zespół przekładni porusza wózkami jeżdżącymi po długiej szynie. Wykorzystany napęd składa się z tradycyjnego silnika elektrycznego prądu stałego o napięciu znamionowym 24 woltów i mocy 75 watów oraz dwóch przekładni. Przekładnia ślimakowa zamocowana na wale silnika zakończona jest kołem zębatym, które wraz z metalowym łańcuchem oczkowym stanowi drugą przekładnię – przekładnię łańcuchową. Po drugiej stronie w stosunku do przekładni ślimakowej, na wale silnika elektrycznego zainstalowano optoelektroniczny przyrostowy przetwornik obrotowy, tzw. enkoder. Wykorzystany przetwornik obrotowy o rozdzielczości 200 działek na obrót pozwala na uzyskanie dokładności pomiaru przesuwu liniowego, który odbywa się poprzez dwie przekładnie, przynajmniej o rząd wielkości większy aniżeli pozwalają na to luzy, które są obserwowane na przekładniach. Przyjęto, że pomiar przesuwu liniowego będzie dokonywany z dokładnością 0,1 mm. Do sterowania silnikiem wraz ze sprzężeniem zwrotnym, które stanowi informacja o aktualnym położeniu silnika wykorzystano sterownik SDC106E-PC. Sterownik ten składa się ze wzmacniacza mocy dla opisanego silnika, regulatora oraz interfejsu umożliwiającego komunikację z komputerem poprzez szeregowy łączący RS232.

Regulator PID, który jest zasadniczym elementem sterownika SDC106E-PC pracuje z częstotliwością 65 kHz i umożliwia niezależne zaprogramowanie wartości dla bloków P, I oraz D z wykorzystaniem gotowej aplikacji komputerowej. Ponadto sterownik posiada

zabezpieczenia przeciążeniowe, zwarciove i termiczne. Każdy napęd wykorzystuje dwa czujniki krańcowe, które zabezpieczają urządzenie przed mechanicznym zniszczeniem oraz czujnik środkowy, który służy do przeprowadzenia procedury bazującej przyrostowego przetwornika obrotowego. Po włączeniu zasilania konieczne jest uruchomienie procedury bazującej, po której sterownik SDC106E-PC pozwala na wykorzystanie przyrostowego przetwornika obrotowego jako przetwornika, który podaje pozycję absolutną aż do momentu wyłączenia zasilania.



Rys. 4. Redundantna konstrukcja wiszącego robota

Na ruchomych wózkach poruszanych przez napędy liniowe zamontowano boczki, które umożliwiają swobodne poruszanie się lin. Poprzez ruch wózków z boczki można zmieniać miejsce podwieszenia lin robota. Aby zapewnić lekkość konstrukcji platformy, wszystkie napędy zostały zainstalowane na rusztowaniu, a nie na platformie. Dzięki zastosowaniu ruchomych boczki uniknięto sytuacji, w której napęd liniowy odpowiada za przesuwanie napędów zwijających liny. A zatem w wykonanej koncepcji napędy bębniów nawijających liny są na stałe zamontowane na rusztowaniu. Punkt zaczepienia lin jest wyznaczony przez położenie boczki, które to mogą być poruszane przez napędy liniowe.

#### 4. WNIOSKI

W referacie przedstawiono konstrukcję i sterowanie zaprojektowanego i zbudowanego w Instytucie Automatyki Politechniki Łódzkiej redundantnego robota wiszącego na sześciu linach. Wykonane badania pokazują, że jego konstrukcja zapewnia dużą sztywność, dobre własności manipulacyjne i względnie duży udźwig, dzięki czemu może on stanowić bardzo dobre rozwiązanie problemu precyzyjnego przenoszenia wielu obiektów w przestrzeniach zamkniętych, jak na przykład laboratoria, hale produkcyjne itp.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007 – 2010 jako projekt rozwojowy numer R 01 009 03 zatytułowany „Budowa i sterowanie robota o zamkniętym łańcuchu kinematycznym z napędami elektrycznymi”.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Albus J. S., Bostelman R. V., Proctor F. M., Shackleford W. P., Lytle A. M.: *The flying carpet: a tool to improve ship repair efficiency*. American Society of Naval Engineers Conference, Bremerton, WA, 2002.
- [2] Oh S., Agrawal S. K.: *Cable-suspended planar parallel robots with redundant cables: controllers with positive cable tensions*. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, str. 3023-3028, 2003.
- [3] Bartoszewicz A.: *Projekt i budowa taniego wiszącego na linach manipulatora z silnikami krokowymi*. Materiały XIV Konferencji Naukowo-Technicznej Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice, Poznań, str. 263-264, 2009.
- [4] Postlethwaite I., Bartoszewicz A.: *Application of nonlinear H-infinity control to the Tetrabot robot manipulator*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I, Journal of Systems and Control Engineering, Vol. 212, No. 4, str. 459-465, 1998.
- [5] Stewart D.: *A Platform with six degrees of freedom*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part I, Journal of Systems and Control Engineering, Vol. 180, No. 3, str. 371-386.
- [6] Baczynski M., Baczynski J.: *The kinematics problems of 9 DOF cable driven robotic crane*. Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics, Cardiff, Wielka Brytania, 2009.
- [7] Baczynski M., Baczynski J.: *The 9-DOF cable driven manipulator as the teleoperator assistant*. Proceedings of the XIV IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje, 2009.