

Rafał OSYPIUKZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY,
INSTYTUT AUTOMATYKI PRZEMYSŁOWEJ**Platforma Hexa jako system aktywnego otoczenia –
konstrukcja mechaniczna i sterowanie**

Dr inż. Rafał OSYPIUK

W latach 1994 - 1999 studiował Automatykę i Robotykę na Politechnice Szczecińskiej. W roku 2004 w tej samej dyscyplinie obronił pracę doktorską i został zatrudniony na stanowisku adiunkta w Instytucie Automatyki Przemysłowej. W ramach obecnie realizowanego grantu MNiSW "Wsparcia międzynarodowej mobilności naukowców" współpracuje z Institute for Robotics and Process Control w Braunschweig. Głównym obszarem jego badań są odporne systemy sterowania pozycją oraz siłą dla manipulatorów przemysłowych.



e-mail: rafal.osypiuk@zut.edu.pl

Streszczenie

W artykule zaprezentowano aktuator sztywności bazujący na platformie Hexa, który dedykowany jest do zadań sterowania momentem i siłą w aplikacjach z wykorzystaniem manipulatorów przemysłowych. Podejście to jest interesującą alternatywą dla znanych z literatury i obciążonych istotnymi wadami podatnościami pasywnymi i aktywnymi. W pracy zwrócono szczególną uwagę na konstrukcję mechaniczną platformy, do napędu której wykorzystano tanie serwa firmy Hitec, przeznaczone do zastosowań w robotyce. Omówiono proces projektowania platformy zaczynając od strony mechanicznej, poprzez napędy, elektronikę, a kończąc na otwartej architekturze sterowania.

Słowa kluczowe: Manipulator Hexa, zamknięty łańcuch kinematyczny, hybrydowe sterowanie pozycja/siła, podatność pasywna i aktywna, otwarte architektury sterowania.

**Hexa platform as active environment system –
mechanics and control****Abstract**

In the paper the idea of using variable stiffness actuator was presented. The actuator is based on the Hexa platform (fig. 2) and is dedicated to force/torque control in the industrial manipulator applications. In view of high stiffness of the robots and usually high stiffness of the environment the passive and active compliant devices have to be used, e.g. to protect system against violent force changes. Many serious problems and disadvantages could be found during application of the known compliant systems [8]. These problems could be reduced by using of the variable stiffness actuator. The proposed actuator is an alternative solution and could be used on the manipulator side [9] or on the environment side [10, 11]. Description of using the passive and active compliance elements could be found in chapter 2. Details of mechanic end electric construction of variable stiffness actuator with low cost robotic servos from Hitec are presented in chapter 3. Hardware interface (Fig. 3) is shown in the chapter 4 with main properties of the MiRPA (Middleware for Robotic and Process Control Applications) open control architecture system. Using of the MiRPA in rapid control prototyping systems is described in chapter 5. In the Fig. 6 the complete force control setup is presented. Experimental tests demonstrate that the assembly time of the robot tasks is shorter than in classic systems without variable stiffness actuator.

Keywords: Hexa manipulator, closed kinematic chain, hybrid force/position control, passive and active compliance, open control architectures in robotics.

1. Wstęp

Pierwotne przeznaczenie robotów przemysłowych związane było przede wszystkim z wyręceniem człowieka od zadań powtarzalnych, wymagających dużej dokładności czy polegających na manipulacji znacznymi masami [1]. Ten ważny element automatyki, jakim jest robot przemysłowy postrzegany jest jednak coraz częściej jako w pełni autonomiczna jednostka o zaawanso-

wanych zdolnościach interakcji z otoczeniem. Aby zrealizować inteligentny system decyzyjny, układ sterowania manipulatora wyposażony jest często w „zmysły” jakimi dysponuje człowiek np. dotyk (czujniki momentów i sił 3D) [2], czy wzrok (sprzężenie wizyjne: kamery cyfrowe) [3].

Badania nad efektywnymi metodami sterowania siłą i momentem dla ogólnego przypadku manipulacji o 6-ciu stopniach swobody doprowadziły do powstania równoległej platformy Hexa. W artykule zwraca się szczególną uwagę na jej konstrukcję mechaniczno-elektryczną oraz sposób sterowania z wykorzystaniem otwartej architektury MiRPA (Middleware for Robotic and Process Control Applications), bazującej na klasycznym komputerze PC. Omawiane są również najważniejsze problemy siłowej interakcji manipulatora z otoczeniem oraz sens i korzyści płynące z zastosowania proponowanego aktuatora sztywności.

2. Podatność pasywna i aktywna

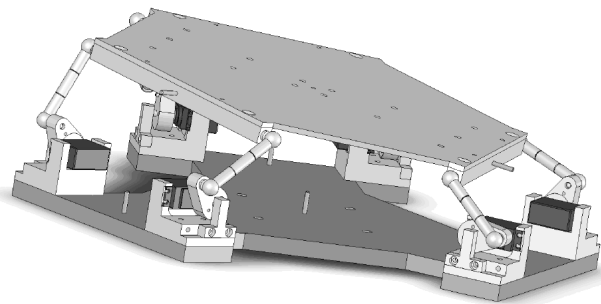
Znaczny postęp w technologii mechanicznej sprawia, iż manipulatory przemysłowe posiadają coraz większe sztywności członów, co w nieograniczonej przestrzeni jest niewątpliwą zaletą, która przekłada się m.in. na poprawę dokładności pozycjonowania. Problem pojawia się jednak, gdy robot zostaje wyposażony w czujnik momentów i sił dla celów kontrolowanego oddziaływania z otoczeniem np. w zadaniach autonomicznego montażu. W takich sytuacjach najczęściej wysoka sztywność otoczenia z jaką dochodzi do kontaktu jest powodem generowania wysokich sił, które mają m.in. negatywny wpływ na konstrukcje mechaniczną manipulatora i ograniczają dopuszczalne prędkości w chwili nawiązania kontaktu [4]. W związku z powyższym pomiędzy sztywnym manipulatorem i najczęściej również sztywnym otoczeniem wprowadza się systemy pasywnej lub aktywnej podatności.

W metodach pasywnych stosowane są układy mechaniczne, bazujące na elementach sprężystych. W takich rozwiązaniach nie ma interakcji pomiędzy architekturą sterowania manipulatora, a podatnością. I tu pojawia się jedna z najważniejszych wad tych rozwiązań tj. brak informacji o dokładnym położeniu przedmiotu w przestrzeni [4]. Ponieważ dokładność pozycjonowania w większości przypadków aplikacji jest sprawą nadrzędną, ważną rolę odgrywają systemy aktywnej podatności [2, 5, 6], które są wyposażone w czujniki sprzęgnięte z systemem sterowania robota. Jednym z przykładów komercyjnych może być manipulator DLR lightweight z czujnikiem momentu w każdym członie, ochroną przed kolizją i układem bezpiecznego reagowania [7]. Chociaż systemy aktywnej podatności, bazujące najczęściej na hybrydowym sterowaniu pozycja/siła są dużo bardziej atrakcyjne od rozwiązań pasywnych wykorzystujących sterowanie impedancją, to z uwagi na problemy zachowania stabilności [8] stanowią duże wyzwanie projektowe. Ponadto należy pamiętać, że nawet stosując metody aktywnej podatności pomiędzy manipulatorem a otoczeniem wymagana jest zawsze obecność pasywnych rozwiązań dla bezinwazyjnej fazy nawiązania kontaktu [8].

Nieco bardziej złożonym rozwiązaniem, jednak eliminującym konieczność stosowania układów pasywnych jest wykorzystanie tzw. aktuatorów sztywności tj. zewnętrznych aktywnych systemów manipulacyjnych instalowanych po stronie robota [9] lub po stronie otoczenia [10, 11]. Opisująca tutaj platforma Hexa stanowi drugie rozwiązanie i jak wykazały badania eksperymentalne gwarantuje znaczne skrócenie czasów montażu na stanowisku zrobotyzowanym.

3. Budowa mechaniczno - elektryczna platformy Hexa

Początek robotyki równoległej sięga roku 1947, w którym to pojawiły się pierwsze podstawowe założenia manipulatora o zamkniętym łańcuchu kinematycznym [12]. Była to hexagonalna platforma Gough (mylnie nazywana platformą Stewarta [13]), której prototyp powstał w 1955 roku [14]. Platforma Gough z założenia napędzana jest aktuatorami hydraulicznymi liniowymi, co ma bezpośrednie przełożenie m.in. na prostotę konstrukcji mechanicznej, dużą sztywność oraz jej wysoka obciążalność. W robotyce napędy pryzmatyczne ustępują jednak miejsca napędom obrotowym co ma związek m.in. z wymogami konstrukcyjnymi i ostatecznymi kosztami produkcji seryjnej. I tak w roku 1983 pojawiła się idea architektury delta [15] o 6-ciu stopniach swobody z napędami obrotowymi, której modyfikacja [16] doprowadziła do powstania znanej struktury równoległej Hexa. To właśnie ta struktura kinematyczna została wybrana do budowy aktywnego otoczenia o 6-ciu stopniach swobody.



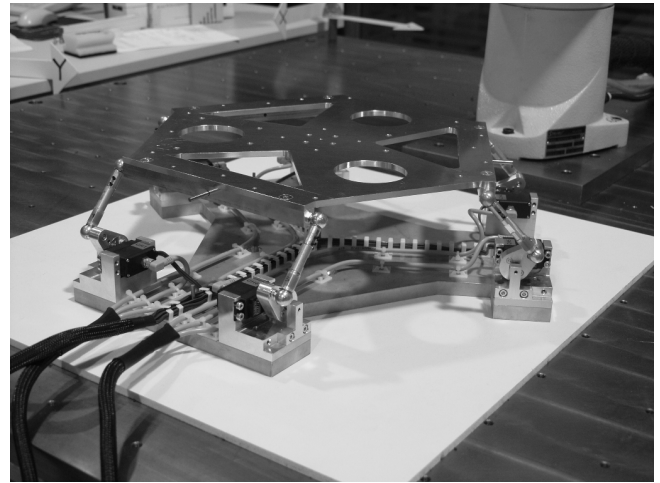
Rys. 1. Model CAD platformy Hexa
Fig. 1. Rendered CAD model of the Hexa platform

Punktem wyjścia w procesie projektowania platformy Hexa były założenia konstrukcyjne, wynikające z charakteru jej późniejszego zastosowania. A były to przede wszystkim: niewielka przestrzeń robocza (kilka centymetrów dla ruchów translacyjnych; kilkadziesiąt stopni dla ruchów rotacyjnych); 6-stopni swobody; możliwie wysoka dynamika; zadowalająca dokładność (niekrytyczna w zastosowanej aplikacji sterowania siłą); niski koszt realizacji.

Właściwa struktura kinematyczna ma niewątpliwie wpływ m.in. na uproszczenie opisu matematycznego (kinematyka, dynamika, itd.) [13] oraz na łatwość sterowania w całej przestrzeni roboczej manipulatora [13]. Należy pamiętać, że w przypadku łańcuchów kinematycznych zamkniętych sensowne wydaje się sterowanie tylko w układzie kartezjańskim. Istotne jest więc, aby już w fazie projektowej rozmieścić napędy, dobrać długości członów oraz wielkość ruchomej platformy w stosunku do bazy robota, w taki sposób, aby uniknąć osobliwości [17] w całej jego przestrzeni roboczej. Na rys. 1 przedstawiono model CAD manipulatora Hexa, który posłużył do wstępnej oceny poprawności kinematycznej budowanego systemu.

Ponieważ dla zapewnienia jak najmniej gwałtownych zmian siły w fazie nawiązania kontaktu, dynamika sterowanego otoczenia powinna być jak największa, istotne jest aby m.in. ruchome masy w platformie Hexa były możliwie małe, gwarantując jednocześnie założoną sztywność konstrukcji. Wszystkie elementy składowe manipulatora zostały wykonane z aluminium łącznie z platformą bazową oraz platformą ruchomą. Ponadto dla platformy ruchomej zastosowano metodę elementów skończonych w pakiecie COSMOS (SolidWorks) dla maksymalnej redukcji masy przy dopuszczalnych naprężeniach (rys. 2).

Niewielki obszar roboczy oraz brak restrykcyjnych wymogów co do dokładności i powtarzalności pozycjonowania sprawiło, że do napędu Hexa zastosowano tanie serwa HSR-5995TG firmy Hitec.

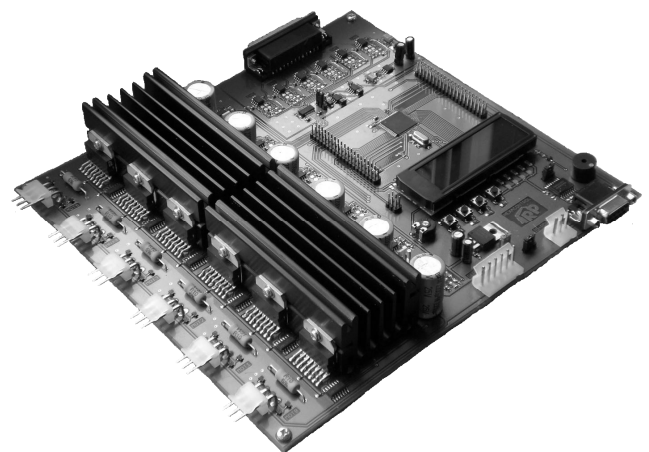


Rys. 2. Platforma Hexa na stanowisku zrobotyzowanym
Fig. 2. Hexa platform in robotic workcell

Jest to rozwiązanie dedykowane do zastosowań w robotyce i bazuje na wysokodynamicznym silniku coreless, tytanowej przekładni oraz precyzyjnym potencjometrze umiejscowionym w osi obrotowej serwa. Przy napięciu znamionowym 7.4 V gwarantuje ono prędkość obrotową na poziomie $60^{\circ}/0,12$ s oraz wartość momentu obrotowego i trzymającego odpowiednio: 30 kg cm i 39 kg cm. W tym miejscu należy podkreślić, iż dla celów implementacji własnych algorytmów sterowania, elektronika firmowa w serwach została usunięta i zastąpiona indywidualnymi rozwiązaniami (rys. 3).

4. Sprzęgnięcie napędów z systemem sterowania robota

Pomiędzy systemem sterowania, a manipulatorem wymagana była obecność modułu sprzęgającego, który zapewnił dopasowanie sygnałów oraz monitorował poprawną pracę systemu. Zastosowane w serwach napędy DC wysterowywane były przy pomocy przebiegów PWM o częstotliwości 25 kHz. Zastosowanie tak krótkiego okresu modulacji (poza przedziałem słyszalności) bez utraty momentu, było możliwe dzięki bardzo dużej dynamice silników bezrdzeniowych. Dla zagwarantowania bezpiecznej pracy platformy wbudowano ponadto redundantny system kontroli położenia, dzięki czemu chroniono przekładnie serwo napędów w momentach niepoprawnej pracy układu sterowania.



Rys. 3. Moduł dopasowania sygnałów sterujących
Fig. 3. Hi-End unit

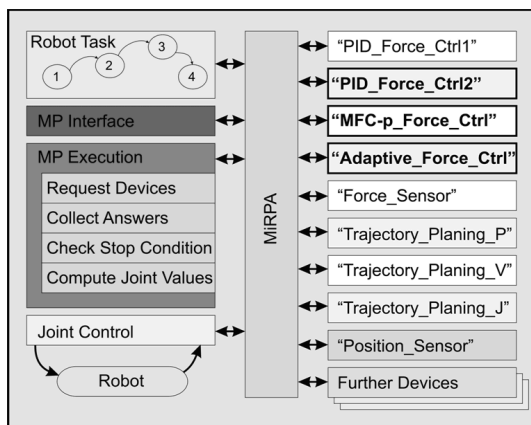
Ważnym aspektem konstrukcji płyty głównej (rys. 3) była jej modułowa budowa, która miała umożliwić późniejsze przejście z software-owego na hardware-owy system sterowania. W ten sposób wbudowano 2x40 pinowe porty umożliwiające bezpośredni dostęp do zmiennych procesowych.

Po zakończeniu badań nad aktywnym otoczeniem, manipulator równoległy będzie stanowić element dydaktyczny w ramach programu *Systemy sterowania w robotyce*. Chcąc odłączyć niezbędne komputery (rys. 5) i zapewnić większą mobilność, zbudowano również hardware-ową architekturę sterowania bazującą na 32-bitowych mikrokontrolerach ARM [18].

5. Otwarty system sterowania MiRPA

Manipulator to wysokodynamiczny obiekt MIMO (Multiple Input Multiple Output), który z uwagi na złożone algorytmy sterujące (generator trajektorii, kinematyka, regulatory itd.) oraz wysokie częstotliwości próbkowania wymaga systemów o dużych mocach obliczeniowych. Już od kilkunastu lat powyższe wymagania są w stanie spełnić klasyczne komputery PC wyposażone w systemy operacyjne czasu rzeczywistego (np. VxWorks stosowany przez KUKA i Stäubli). W ten sposób zyskują na znaczeniu rozwiązania typu middleware, polegające na ukryciu złożoności aplikacji i jej infrastruktury poprzez zastosowanie m.in. protokołów na wyższych warstwach, zapewniających komunikację pomiędzy procesami. Przykładem może być tutaj otwarta, software-owa architektura sterowania CORBA (Common Object Request Broker Architecture) [19], czy OROCOS (Open Robot Control Software) [20]. Obie szeroko wykorzystywane w rozwiązaniach uniwersyteckich, przy czym pierwsza z nich stanowi jedną z najczęściej stosowanych w robotyce mobilnej.

Do sterowania platformą Hexa wykorzystano również bazującą na PC otwartą architekturę MiRPA (Middleware for Robotic and Process Control Applications) [21] pracującą pod systemem operacyjnym czasu rzeczywistego QNX¹, opracowaną przez Institute for Robotics and Process Control w Braunschweig.



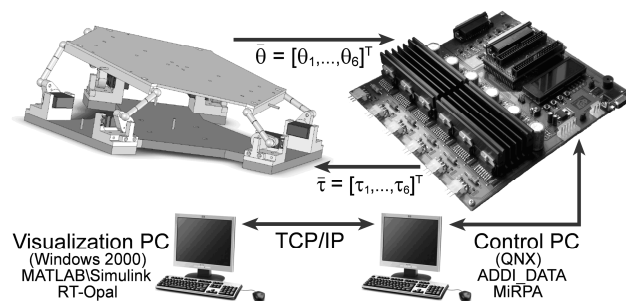
Rys. 4. Architektura sterowania bazująca na PC
Fig. 4. PC based control system architecture

System ten powstał w zamyśle jego zastosowania w rozwiązaniach komercyjnych i spełnia tym samym twarde wymogi dotyczące czasu rzeczywistego. MiRPA to middleware o modułowej budowie (rys. 4), bazujący na wymianie informacji (message-driven). Wszystkie zainstalowane moduły mogą być dynamicznie meldowane/odmeldowywane i posiadają tylko jednego partnera tzw. object-server. W ten sposób nowe komponenty sterowania mogą zostać dodane w prosty sposób, bez ingerencji w jądro systemu. Istotnym ułatwieniem w zadaniach szybkiego prototypowania jest obecność interfejsu z pakietem Matlab/Simulink dającego nieograniczone możliwości implementacji własnych

¹ Architektura sterowania MiRPA ma również implementację pod systemem operacyjnym Linux-RTAI, wykonaną na zlecenie firmy Volkswagen

algorytmów. Do najistotniejszych własności systemu MiRPA należą:

- Model komunikacji - Client/server
- Model komunikacji - Publisher/subscriber
- Funkcjonalność Routera
- Możliwość stosowania modułów redundantnych
- Monitorowanie jakości pracy systemu
- Metoda centralnego unikania zawieszenia systemu
- Wysokie osiągi dla systemu pojedynczego oraz wielokrotnego (multiple node systems)



Rys. 5. Przepływ informacji w układzie sterowania
Fig. 5. Information flow in the control system

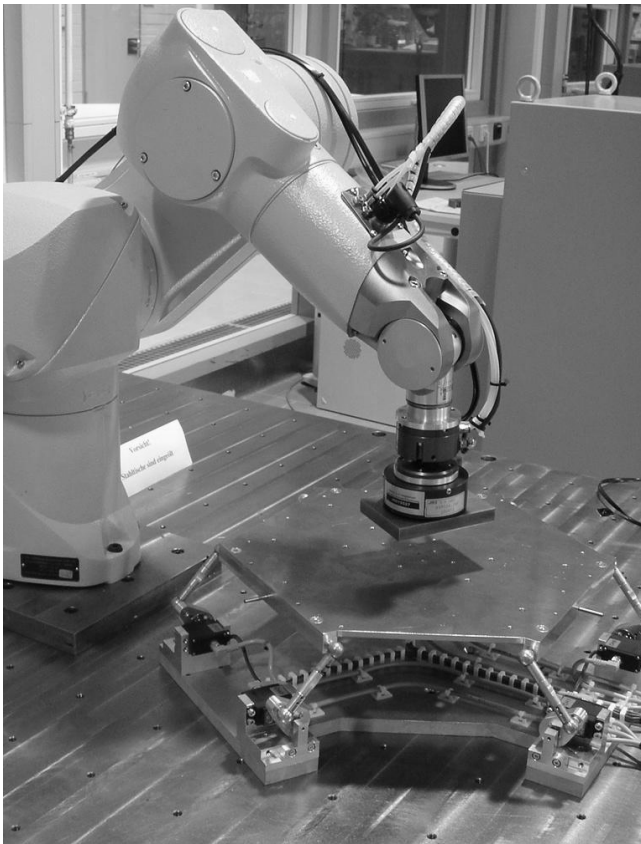
Na rys. 5 przedstawiono ogólny przepływ informacji w omawianym układzie sterowania. Główny komputer wyposażony w systemem MiRPA, komunikuje się poprzez karty I/O ADDI_DATA ze sterowanym procesem. Z częstotliwością 1kHz przeliczane jest zadanie odwrotnej kinematyki, interpolatory wartości zadanych oraz 6-cio kanałowa regulacja pozycji PD. Komputer sterujący połączony jest poprzez protokół TCP/IP z kolejnym komputerem wyposażonym w środowisko Matlab/Simulink oraz RT-Opal. W ten sposób użytkownik dysponuje z jednej strony narzędziem szybkiego prototypowania, a z drugiej systemem do wizualizacji zmiennych procesowych.

6. Stanowisko eksperymentalne

Podczas realizacji zadań montażu manipulator wchodzi w kontakt z przedmiotami o różnej sztywności. Zmiana sztywności otoczenia to zmiana wzmocnienia w pętli regulacji siły. Ta wartość może zmieniać się kilkaset-krotnie, co ma dramatyczny wpływ na czas regulacji [6]. Stosując proponowaną platformę o 6-ciu stopniach swobody „symulujemy” elastyczności w taki sposób, że manipulator „odczuwa” stałą sztywność otoczenia, niezależnie od tego, czy dochodzi do kontaktu ze stałą, czy elementem gumowym. To mechatroniczne rozwiązanie, daje prawie 100% odporność na zmiany sztywności otoczenia, co gwarantuje istotne skrócenie czasów montażu.

Rys. 6 przedstawia kompletne stanowisko eksperymentalne z systemem aktywnego otoczenia, złożone z przemysłowego manipulatora Stäubli RX60, platformy Hexa o 6-ciu stopniach swobody oraz czujnika momentów i sił firmy JR3. Obydwa manipulatory wyposażone są w niezależne architektury MiRPA, które umożliwiają swobodny przepływ informacji między procesami. Wyjaśnienia wymaga jeszcze sposób sterowania powyższego systemu jako całości. Otóż manipulator wyposażony jest w hybrydowe sterowanie pozycja/siła [4] i nie posiada informacji zwrotnej z aktywnego otoczenia. Platforma Hexa „emuluje” podatność na dwa sposoby: pasywnie tj. bez informacji o oddziaływanej sile oraz aktywnie ze sprzężeniem od siły i pozycji manipulatora. Pierwsze rozwiązanie osiągane jest poprzez regulację stałwartościową i wybór odpowiedniego wzmocnienia w pętlach sterowania pozycją, dzięki czemu istnieje możliwość definiowania sztywności platformy w szerokich granicach. W drugim rozwiązaniu do generowania trajektorii ruchu Hexy wykorzystywana jest informacja o wartościach sił kontaktowych i położeniu manipulatora

ra. Przypadek ten z punktu widzenia techniki regulacji jest dużo bardziej złożony, głównie z uwagi na warunki stabilności.



Rys. 6. Stanowisko eksperymentalne
Fig. 6. Experimental setup

7. Wnioski

Przedstawiona tutaj metoda aktywnego otoczenia może stanowić interesujące uzupełnienie znanych z literatury i obciążonych wadami podatności pasywnych i aktywnych. Poprzez zastosowanie powyższego systemu, zmianie ulega wypadkowa sztywność manipulatora w przestrzeni kartezjańskiej, co gwarantuje m.in. niezmiennie czasy regulacji siły, ostatecznie znacznie skracając czas montażu na stanowisku zrobotyzowanym.

Chociaż opisywany system posiada wiele zalet w odniesieniu do rozwiązań stosowanych dotychczas, to nie znaczy, że jest on pozbawiony wad. Pierwsza i najważniejsza to złożoność mechatroniczna tego urządzenia i jego koszt wytworzenia. Ponadto stosując aktywne otoczenie w wersji z informacją o położeniu manipulatora i oddziałującej sile, pojawia się problem sterowania dwóch procesów sprzężonych dynamicznie, co z punktu widzenia zachowania stabilności nie jest rzeczą trywialną. Należy również pamiętać, że budując aktuator sztywności nigdy nie uda się w 100% zbliżyć do naturalnej podatności materiału. Jest to związane z koniecznością przyspieszania mas, co musiałoby nastąpić w nieskończenie krótkim czasie. Zjawisko to jest tym bardziej widoczne im większa jest prędkość najazdu manipulatora na aktywne otoczenie.

Pomimo powyższych wad wydaje się jednak, iż rozwój efektywnych systemów sterowania siłą będzie zmierzał w kierunku aktuatorów sztywności, co już potwierdzić można m.in. najnowszymi projektami badań uniwersyteckich [9].

Działanie platformy Hexa oraz jej wykorzystanie w znanym procesie peg-in-hole, można znaleźć na stronach internetowych [22, 23].

Prezentowana tutaj praca jest wynikiem kooperacji z Institute for Robotics and Process Control w Braunschweig. Dziękuję w tym miejscu ww. jednostce za udostępnienie laboratorium oraz za pomoc w szybkiej realizacji projektu budowy manipulatora równoległego i wsparcie w zagadnieniach mechaniki, elektroniki oraz programowania.

8. Literatura

- [1] Spong M. W., Hutchinson S., Vidyasagar M.: Robot Modeling and Control. Wiley & Sons, ISBN: 0471649908, 2005.
- [2] Siciliano B., Villani L.: Robot Force Control. Springer, ISBN: 978-0-7923-7733-7, 2000.
- [3] Haralick R. M., Shapiro L. G.: Computer and Robot Vision. Addison-Wesley, Volume II, ISBN: 0201569434, 2002.
- [4] Craig J. J.: Introduction to robotics: mechanics and control. Prentice-Hall, ISBN: 0201543613, 2003.
- [5] Winiarski T., Zieliński C.: Implementation of Position-Force Control in MRROC++. In: 5th International Workshop on Robot Motion and Control, Ro-MoCo'05. Proceedings, June 23–25, 2005, pp. 259–264.
- [6] Osypiuk R., Finkemeyer B.: Hybrid Model Based Force-Position Control: Theory and Experimental Verification. Robotica, Cambridge University Press, UK, Vol. 24, Issue 06, pp. 775–783, 2006.
- [7] De Luca A., Albu-Schäffer A., Haddadin S., Hirzinger G.: Collision Detection and Safe Reaction with the DLR-III Lightweight Manipulator Arm. Inter. Conf. On Intelligent Robots and Systems, pp.1623-1630, 2006.
- [8] Wang W., Loh R. N. K., Gu E. Y.: Passive compliance versus active compliance in robot-based automated assembly systems. Industrial Robot, Vol. 25, No. 1, pp. 48–57, 1998.
- [9] Denkena B., Wedler A., Hackbarth A., Hackelöer F., Friederichs O. J.: Hexapoder Roboter mit McKibben Muskeln als Ausgleichs- und Dämpfungseinheit für den Einsatz von Robotern in der Produktion. Robotik 2008, VDI, München, Germany, 2008.
- [10] Osypiuk R., Kroger T.: A Low-cost Hexa Platform for Efficient Force Control Systems Using Industrial Manipulators. Solid State Phenomena, vol. 147-149, pp. 1-6, 2009.
- [11] Osypiuk R.: Hexa Platform as Active Environment System, International Workshop on Robot Motion and Control, Czerniejewo, Poland, 2009.
- [12] Gough V.E.: Contribution to discussion of papers on reearch in automobile stability, control and tyre performance, Proc. AutoDiv. Inst. Mech. Eng., pp. 392-395, 1956.
- [13] Merlet J.P.: Parallel Robots, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [14] Gough V.E., Whitehall S.G.: Universal tire test machine, Proc. 9th Int. Technical Congress F.I.S.I.T.A., Vol 117, No. 1, pp. 117-135, 1962.
- [15] Hunt H.H.: Structural kinematics of in parallel actuated robot arms. Journal of Mechanismus, Transmissions and Automation in Design, pp. 705-712, 1983.
- [16] Pierrot F., Dauchez P., Fournier A.: Fast parallel robots. Journal of Robotic Systems, Vol. 8, No. 6, pp. :829–840, 1991.
- [17] Hesselbach J., Bier C., Campos A., and Löwe H.: Direct kinematic singularity detection of a hexa parallel robot. In Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3249–3254, 2005.
- [18] Fedus A.: Projekt i konstrukcja równoległego manipulatora o 6-ciu stopniach swobody. Politechnika Szczecińska, Praca dyplomowa, 2008.
- [19] <http://www.omg.org/technology/documents/formal/components.htm/>
- [20] <http://www.orocos.org/>
- [21] Finkemeyer B.: Robotersteuerungsarchitektur auf der Basis von Aktionsprimitiven. Fortschritte in der Robotik, Volume 8, Shaker-Verlag, 2004.
- [22] <http://www.rob.cs.tu-bs.de/research/projects/hexa/>
- [23] <http://www.rob.cs.tu-bs.de/research/projects/active/>