

**Daniel PRUSAK, Tadeusz UHL, Maciej PETKO**

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I ROBOTYKI, KATEDRA ROBOTYKI I DYNAMIKI MASZYN

**Mikrorobotyka nowy kierunek rozwoju robotyki****Mgr inż. Daniel PRUSAK**

Ukończył studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki na kierunku Automatyka i Robotyka, AGH w Krakowie. Obecnie jest doktorantem w Katedrze Robotyki i Mechatroniki WIMiR AGH. Jego zainteresowania skupiają się na szeroko pojętej mechatronice, zagadnieniach związanych z modelowaniem i konstruowaniem robotów równoległych oraz mikrorobotyce.

e-mail: [daniel.prusak@agh.edu.pl](mailto:daniel.prusak@agh.edu.pl)**Prof. dr hab. inż. Tadeusz UHL**

Jest kierownikiem Katedry Robotyki i Mechatroniki, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami dynamiki konstrukcji, a zwłaszcza analizą modalną. Jego zainteresowania obejmują także układy aktywnej redukcji drgań, układy sterowania i szeroko pojętą mechatronikę. Jest autorem 15 książek i kilkuset artykułów dotyczących wspomnianych zagadnień.

e-mail: [tuhl@agh.edu.pl](mailto:tuhl@agh.edu.pl)**Dr inż. Maciej PETKO**

Adiunkt w Katedrze Robotyki i Mechatroniki AGH. Jego zainteresowania skupiają się na mechatronice, robotyce, zagadnieniach prototypowania i implementacji algorytmów przetwarzania sygnałów, głównie w sterowaniu i diagnostyce technicznej.

e-mail: [petko@agh.edu.pl](mailto:petko@agh.edu.pl)**Streszczenie**

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z szeroko pojętą problematyką mikrorobotyki. Poruszono między innymi kwestię konstruowania mikrorobotów, problematykę pozycjonowania w skali mikro i nanometrów a także zagadnienia związane z tendencją do naśladowania natury w konstrukcjach mechanicznych, czyli biomimetyką.

**Introduction to the problems of Microrobotics****Abstract**

In the paper, introduction to micro/nano robotics, basic definitions and classification is presented. The components of the micro/nano systems and problems with scaling system and micro/nano positioning are described. Specific problems with learning from nature (biomimetics) are described as well.

**1. Wstęp**

Szybki rozwój techniki i wymagania współczesnego rynku warunkują postęp w dziedzinie miniaturyzacji maszyn i urządzeń. Mikro układy stają się dziś rzeczywistością a nie tylko futurystyczną nowinką naukową. Oferta urządzeń małej skali zawierających mikroukłady elektroniczne i mechaniczne staje się coraz szersza i dostępna komercyjnie, natomiast wymagania dotyczące miniaturyzacji stale rosną.

W bliskiej przyszłości urządzenia budowane na bazie mikro- lub nano- mechanizmów będą odgrywać decydującą rolę w wielu gałęziach gospodarki. Przewiduje się, że przemysły takie jak: elektroniczny (produkcja układów scalonych), mikrosystemów (MEMS, komunikacja, optyka, RF ID), materiałów (proszki, polimery, nanostruktury, mieszaniny), źródeł energii (ogniwa paliwowe, membrany, układy na bazie związków węgla), biotechnologiczny (lab-on-chip, modyfikacje genetyczne), medyczny (farmaceutyczny, medycyna molekularna) będą opierały się przede wszystkim na zastosowaniu mikro i nano mechanizmów. Z mikromechanizmów tworzone będą urządzenia realizujące proces technologiczny [10], wymagać to będzie umiejętności konstruowania (dobór struktury kinematycznej, dobór materiałów), zasilania oraz sterowania tego typu urządzeniami [9].

Niestety projektowanie oraz konstruowanie miniaturowych urządzeń niesie ze sobą wiele problemów, które trzeba pokonać. Aby stworzyć urządzenie o żądanych właściwościach, należy zmierzyć się z barierami technologicznymi, informatycznymi a także mentalnymi. Zwłaszcza ta ostatnia bariera często stwarza spore trudności, ponieważ często wśród konstruktorów dominuje pogląd, że aby stworzyć mikrouządzenie wystarczy po prostu wprost przeskalować duże działające. Jednakże takie podejście nie jest możliwe ze względu na trudności czysto techniczne (np. stosunkowo duże wymiary baterii) a także, co najważniejsze ze względu na zmianę charakteru i proporcji zjawisk fizycznych występujących w mikro/nano skali. Ponadto symulacje komputerowe tego typu układów, ze względu na złożoność i wzajemnie przenikanie się występujących zjawisk stają się często bardzo zaawansowane i nierzadko niemożliwe do przeprowadzenia w całości. Podczas modelowania i symulacji mikroukładów nie dziwi fakt występowania dużych błędów.

Rozpatrując zagadnienie konstruowania mikrorobotów należy stwierdzić, że konstruktor staje przed problemem pokonania nie tylko barier czysto mechaniczno-technologicznych. Występująca interdyscyplinarność tych konstrukcji powoduje, że musimy zmierzyć się również z problemami sterowania, symulacji oraz zjawisk fizykochemicznych. Zatem w tego typu projektach w procesie projektowania istotne jest mechatroniczne podejście do zagadnienia, zakładające jednocześnie projektowanie całego mikro/nano systemu ze wszystkimi jego komponentami wraz z jednoczesną analizą metod wytwarzania, założeniami sterowania i analizą występujących zjawisk fizycznych. Coraz większe znaczenie zaczyna mieć podpatrywanie rozwiązań już od dawna występujących w naturze i uczenie się ze świata przyrody, czyli tzw.: biomimetyka [11].

Celem pracy jest przedstawienie możliwości konstruowania i budowania mikrorobotów do różnych zastosowań.

**2. Definicje**

Robot jest to programowalne urządzenie, sterowane za pomocą komputera mogące wykonywać określonego typu zadania i będące w interakcji ze swoim środowiskiem.

Mając na uwadze powyższą definicję, mikrorobota możemy scharakteryzować jako robota posiadającego przynajmniej jedną z trzech następujących właściwości:

- Robot o mikrowymiarach
- Robot o mikrodokładnościach
- Robot zdolny do manipulacji obiektami o mikrorozmiarach

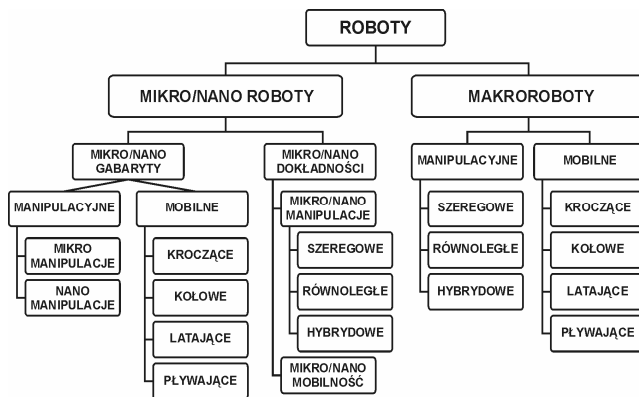
W sposób prosty można powiedzieć, że różnica pomiędzy mikro a makro robotami jest w skali operacji, które one mogą wykonywać [7, 8]. Mówiąc o urządzeniach mikroskali należy również w tym miejscu przedstawić definicję nanotechnologii.

Nanotechnologia jest to technologia wytwarzania umożliwiająca niedrogą produkcję spójnych struktur z dokładnością molekularną.

Nanorobot jest to mała maszyna zaprojektowana do wykonywania określonego zadania lub grupy zadań w sposób powtarzalny z precyzją odpowiadającą wymiarom rzędu nanometrów ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ ). Funkcjonuje ona w sposób autonomiczny i jest wyposażona we własny nanokomputer. Należy zauważyć, że obecny stan techniki pozwala na pewnego typu manipulacje i wytwarzanie struktur o wymiarach nanometrów, natomiast nie jest jeszcze na dzień dzisiejszy możliwe stworzenie nanorobota według powyższej definicji.

### 3. Podział mikrorobotów

Główny podstawowy podział robotów ze względu na cechy konstrukcyjne rozgranicza roboty na dwie kategorie (rysunek 1). Pierwsza to klasyczne rozwiązania robotów w skali makro, czyli roboty manipulacyjne i mobilne występujące na przykład w przemyśle czy sektorze usługowym, natomiast druga to mikro/nano roboty.



Rys. 1. Podział robotów ze względu na cechy konstrukcyjne

Współczesna technika nie jest jeszcze na tyle zaawansowana, żeby można było zauważyć wyraźny podział na mikro i nano roboty w związku z tym obie te kategorie umieszczone są równolegle. Tym, co zasadniczo odróżnia mikroroboty od makrorobotów jest występujący w mikrorobotach podział wewnętrzny na urządzenia o mikrogabarytach oraz urządzenia o mikrodokładnościach. Często bowiem urządzenia manipulacyjne charakteryzujące się dokładnością pracy na poziomie mikro czy nanometrów mają wymiary równe albo nawet większe od klasycznych makrorobotów. Jednocześnie należy zauważyć, że mikroroboty o mikrogabarytach niekoniecznie muszą uzyskiwać mikrodokładności podczas pracy.

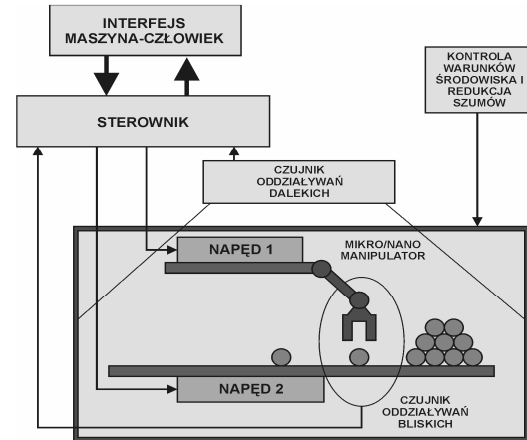
### 4. Struktura mikrosystemu

Mówiąc o mikrorobotach musimy zdawać sobie sprawę z faktu, że mówimy nie tylko o urządzeniach posiadających mikro gabaryty lub mogących pracować w mikro/nano skali, ale mówimy przede wszystkim o skomplikowanym i zaawansowanym technicznie systemie tworzącym pewną spójną całość.

System do precyzyjnej manipulacji zasadniczo możemy podzielić na dwa komponenty [1]. Pierwszy to część mechaniczna (struktura, złącza, napędy itd.), natomiast drugi to część elektryczna (sensory, sterowanie). Całość zintegrowana jest w spójną strukturę. Ogólny schemat takiego systemu przedstawiony jest na rysunku 2. Najważniejszym czynnikiem dla poprawnej pracy mikromanipulatora lub manipulatora o mikro/nano dokładności jest zapewnienie mu odpowiedniego środowiska pracy. Należy przede wszystkim odizolować całe stanowisko od drgań podłoża a następnie zapewnić odpowiednie warunki środowiskowe, czyli czystość powietrza oraz stabilność temperaturową. Istotne jest również wyeliminowanie zakłóceń elektromagnetycznych. Dopiero tak przygotowane środowisko możemy w kolejnym kroku wyposażać w urządzenia do manipulacji oraz sensory zbierające

informacje o aktualnym stanie procesu. Nad całością procesu czuwa sterownik zbierający informację o aktualnym stanie procesu i komunikujący się z interfejsem maszyna-człowiek.

Informacje na temat stanu procesu (położenie, kontakt, siła) zbierane są z dwóch typów czujników. Pierwszy obejmuje swoim zakresem działania oddziaływania bliskie, czyli siły kontaktowe i przemieszczenia, natomiast drugi oddziaływania dalekie, czyli przykładowo przemieszczenia na długie dystanse.



Rys. 2. Ogólny schemat struktury mikrosystemu

W konstruowaniu robotów zdolnych do precyzyjnej manipulacji istnieje również podejście, zakładające, że można zmniejszyć koszt i stopień skomplikowania systemu poprzez zastosowanie technologii napędów dyskretnych [2]. W takim przypadku pozbywamy się sensorów ze sprzężeniem zwrotnym zastępując je napędami zdolnymi do wykonywania ściśle określonych i powtarzalnych, dyskretnych mikro/nano kroków. Niestety takie rozwiązania często nie nadają się do pewnych typów precyzyjnej manipulacji i wybór systemu pomiędzy ciągłym ze sprzężeniem zwrotnym i dyskretnym bez sprzężenia nie zależy tylko od kosztów, ale również od warunków stosowalności. Nie mniej jednak przeważająca większość systemów precyzyjnej mikro i nano manipulacji używa napędów ciągłych i sprzężenia wizyjnego w postaci mikroskopu.

### 5. Problem mikro/nano pozycjonowania

Precyzja ruchu w zastosowaniach mikrorobotyki jest kluczowym elementem do uzyskania wymaganych parametrów ruchu. Chcąc dysponować dokładnością ruchu na określonym poziomie musimy mieć rozdzielczość ruchu, około rząd wielkości wyższą. Chcąc dysponować wysoką precyzją rzędu nanometrów należy przede wszystkim wyeliminować tarcie [3, 4]. W związku z tym wszystkie układy napędowe i transmisji ruchu zawierające takie elementy jak rolki, łożyska ślizgowe czy kulkowe się do tego celu nie nadają. Do tego typu zastosowań nadają się jedynie łożyska elektromagnetyczne, elektrostatyczne, powietrzne lub działające w oparciu o warstwę cieczy. Jeżeli wymagany jest ruch z zerowym tarcie i bez histerezy stosuje się takie rozwiązania jak membrany i elastyczne elementy przegubowe, tzw. flexures. Działają one w oparciu o elastyczną deformację elementu w granicach odkształceń sprężystych. Niestety nie zapewniają one takiego zakresu ruchu jak na przykład łożyska powietrzne, ale za to pozwalają na pracę w próżni.

### 6. Napędy mikrorobotów

Jako napędy mikrorobotów zastosowane mogą być wszystkie znane typy aktuatorów pozwalających przy odpowiedniej konfiguracji na osiągnięcie wysokich precyzji ruchu. Poniżej w tabeli 1 przedstawiono spis typowych napędów wraz z ich podstawowymi wadami i zaletami [4, 5, 6].

Najbardziej obiecującą grupą napędów i również najczęściej stosowaną w aplikacjach wymagających wysokich precyzji ruchu są napędy piezoelektryczne. Dzięki takim właściwościom jak możliwość uzyskania dużych sił, wysokiej dokładności ruchu oraz możliwość precyzyjnej jego kontroli, uzyskały one przewagę nad innymi technikami w takich obszarach jak: mikroskopia skaningowa, mikrobiologia czy mikrolitografia.

Tab. 1. Zestawienie typowych aktuatorów używanych jako napędy mikrorobotów

TYP NAPĘDU	ZALETY	WADY
Piezoelektryczne odkształceniowe	Precyzyjne pozycjonowanie rzędu części nanometra	Mały dystans, Histereza
Piezoelektryczne tarciove	Duży zakres ruchu, Wysokie przyspieszenia, Wysokie prędkości	Mała siła, Zużycie elementów ciernych
Piezoelektryczne typu stick-slip	Precyzyjny ruch, Duży zakres	Małe siły, Małe prędkości
Napędy MEMS Elektrostatyczne, Pojemnościowe, Termiczne	Mikrowymiary, Duża szybkość działania, Mała bezwładność ruchu	Mała moc, Mała sprawność, Wysoki koszt wykonania
Polimerowe elastomerowe, ICPF	Wygodne w formowaniu, Niski koszt produkcji	Małe siły, Małe odkształcenia, Wolny ruch
Magnetyczne	Niski koszt wykonania, Łatwość sterowania	Niska precyzja ruchu
Materiały z pamięcią kształtu: SMA	Elastyczność zastosowań, Względnie niski koszt	Niska dokładność, Mała sprawność, Małe odkształcenia
Napędy CNT (Carbon Nano-Tubes)	Elastyczność zastosowań, Prosta kontrola ruchu	Mała moc, Trudności w implementacji
Silniki molekularne	mikrowymiary	Problemy z implementacją
Napędy elektroteologiczne	Duże siły, Małe wymiary, Mała waga	Niska sprawność, Wysokie napięcie, Trudności w implementacji

## 7. Sensory

Aby uzyskać odpowiednie parametry ruchu niedopuszczalne jest, aby sensory wraz z układem pomiarowym wprowadzały do układu przeniesienia ruchu tarcie. Układy pomiarowe oparte o metrologię pośrednią, choć są tanie to nie zawsze nadają się do zastosowania przy precyzyjnych pomiarach [3]. Przykładami tego typu sensorów mogą być enkodery obrotowe montowane na silnikach lub sensory piezorezystancyjne montowane na elementach elastycznych. Precyzyjna kontrola ruchu na najwyższym stopniu zaawansowania wymaga stosowania metrologii bezpośredniej, czyli mierzenia ruchu w jego faktycznym miejscu występowania. Przykładami tego typu metrologii mogą być sensory pojemnościowe stosowane na przykład w stołach pozycjonujących elementy pod mikroskopem, interferometry laserowe lub bezkontaktowe optyczne enkodery przyrostowe.

Jest szereg parametrów, na które należy zwrócić jednocześnie uwagę, jeśli szukamy sensorów do zastosowania w urządzeniach mikro/nano skali. Na przykład parametry projektowe takie jak: zakres, rozdzielczość, pasmo, konsumpcja mocy, środowisko pracy, szum, waga, rozmiar, nieliniowość i koszt, w takich zastosowaniach zaczynają mieć znaczenie równorzędne. Nie można tego samego powiedzieć o sensorach dobieranych i produkowanych do makroaplikacji, w których często jako jedyne kryterium bierze się pod uwagę tylko dwie lub trzy cechy (np. zakres i rozdzielczość). Mikro urządzenia mają pod tym względem wyższe wymagania i dobór sensorów do tych aplikacji staje się przez to mniej elastyczny.

W tabeli 2 zestawione są podstawowe typy sensorów używane w urządzeniach mikro/nano skali do pomiaru podstawowych parametrów fizycznych.

Tab. 2. Zestawienie typowych sensorów stosowanych w mikro urządzeniach

SENSOR	TYP/RODZAJ
Wizyjne	-Mikroskopy optyczne -Skaningowy mikroskop elektronowy -Mikroskop skaningowy (SPM- STM, ATM)
Pozycji	-Pojemnościowe -LVDT -Interferometryczne -Działające w oparciu o obrazowanie STM
Siły i ciśnienia	-Tensometryczne -Piezorezystancyjne -Pojemnościowe
Przyspieszenia	-Akcelerometry -Zyroskopy

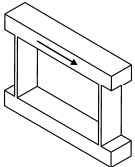
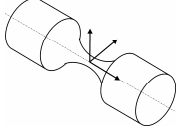
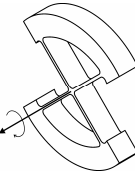
## 8. Przeguby

Do konstrukcji przegubów w mikrorobotach i urządzeniach przeznaczonych do pracy w wysokich rozdzielczościach stosuje się dwa typy elementów. Są to albo precyzyjne łożyska i prowadnice kulkowe/ślizgowe (o dokładności do mikrometra), albo do rozdzielczości rzędu nanometrów elastyczne przeguby tzw: flexures. Przeguby elastyczne charakteryzują się następującymi właściwościami dającymi im ogromną przewagę nad innymi elementami przegubowymi i powodującymi, że zwłaszcza w dziedzinie nanorozdzielczości są one niezastąpione. Podstawowe zalety tego typu przegubów są następujące:

- Brak tarcia
- Prostota w wykonaniu i relatywnie niski koszt
- Ruch jest płynny i ciągły nawet w rozdzielczości atomów
- Jest zakres liniowej zależności pomiędzy przyłożoną siłą a przemieszczeniem
- Cały mechanizm można wykonać z jednego kawałka materiału

Poniżej w tabeli 3 przedstawione są trzy przykładowe przeguby elastyczne o różnej liczbie stopni swobody i odmiennym charakterze ruchu. Przeguby takie można projektować na wiele różnych sposobów, a także łączyć w układy charakteryzujące się ściśle określonymi parametrami ruchu.

Tab. 3. Zestawienie podstawowych przegubów elastycznych wraz z ich krótką charakterystyką

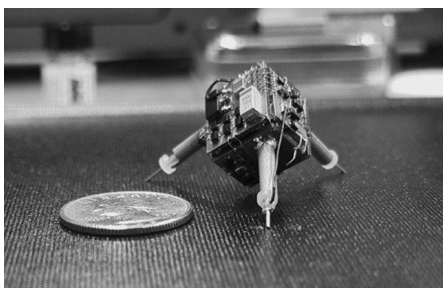
Przegub	DOF	Charakterystyka przegubu
	1	-Przegub o przemieszczeniu liniowym o jednym stopniu swobody -Charakteryzuje się względnie małą koncentracją naprężeń -Zwarta konstrukcja
	3	-Przegub sferyczny o trzech obrotowych stopniach swobody -Bardzo prosty w wykonaniu -Zwarta konstrukcja
	1	-Przegub obrotowy o jednym stopniu swobody -Charakteryzuje się względnie małą koncentracją naprężeń -Zwarta konstrukcja

## 9. Biomimetyka

Bardzo ważnym, elementem w konstruowaniu mikroelementów staje się naśladowanie natury, czyli tzw. biomimetyka. Okazuje się, że natura może być dla nas nauczycielem pokazując w świecie przyrody sposoby, z jakimi poradziła sobie z pewnymi problemami [11]. Przykładem niech będzie liczba nóg zwierząt. Otóż duże zwierzęta posiadają cztery nogi, człowiek dwie, natomiast wraz ze zmniejszeniem wymiarów liczba nóg rośnie. Insekty mogą mieć sześć, osiem i więcej nóg. Liczbę nóg ogranicza energochłonność tego sposobu lokomocji. Okazuje się, że poruszanie się za pomocą większej niż cztery liczby nóg staje się nieekonomiczne energetycznie dla istot dużych. Podobnie jest z konstrukcją skrzydeł ptaków i owadów. Inną sprawą jest podglądanie konstrukcji wymyślonych przez naturę jak na przykład trąba słonia, sieć neuronowa, czy algorytmy genetyczne. Technika projektowania i budowania na bazie wzorców z natury niesie wiele korzyści i możliwości i może w przyszłości stać się znaczącym kierunkiem badań w dziedzinach dotąd jej nie wymagających.

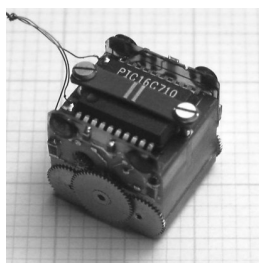
## 10. Konstrukcje

Poniżej zaprezentowane zostaną przykłady dwóch interesujących konstrukcji z zakresu mikrorobotyki. Pierwsza to mikrorobot chodzący NanoWalker przedstawiony na rysunku 3 [12]. Jest to robot o gabarytach nieprzekraczających 30mm potrafiący poruszać się po specjalnie przygotowanej powierzchni z prędkością 200mm/s wykonujący do 40000 kroków/s i dysponujący rozdzielczością ruchu rzędu 5nm. Napędzany jest aktuatorami piezoelektrycznymi zasilanymi specjalnie ukształtowaną falą napięciową i sterowany jest autonomicznie. Przyszłościowo wyposażony w sondę skanującą może być zastosowany do skanowania dużych obszarów i zadań mikromanipulacyjnych.



Rys. 3. NanoWalker – mikrorobot kroczący

Drugim przykładem jest mikrorobot mobilny Jemmy mieszczący się w sześcianie o objętości 1 cm<sup>3</sup> [13]. Napędzany jest dwoma silnikami prądu stałego o średnicy 3 mm sterowanymi przez zabudowany mikrokontroler PIC. Wyposażony jest też w 4 pasywne czujniki podcierwieni.



Rys. 4. Mikrorobot Jemmy o objętości 1 cm<sup>3</sup>

Przedstawione konstrukcje to jedynie mały wycinek mikrorobotyki, jednak dają pewne wyobrażenie o możliwościach technicznych już istniejących oraz wskazują na pewne tendencje i kierunki rozwoju.

## 11. Podsumowanie

Wchodząc w zagadnienia związane z mikrorobotyką wchodzimy w obszar w którym występuje nowa jakość problemów. Mimo iż w skali mikro/nano obowiązują te same prawa fizyki, co w makroświecie, to proporcje zjawisk są drastycznie różne. Przykładowo typowe efekty skalowania urządzeń do małych rozmiarów powodują, że siły grawitacji i siły bezwładności stają się mniejsze w stosunku do sił elektrostatycznych, Van der Waalsa oraz sił związanych z naprężeniami powierzchni. Ponadto dynamika występująca w mikroskali zaczyna mieć właściwości bardziej nieliniowe i staje się dużo szybsza.

Mimo występujących utrudnień dążenie do miniaturyzacji robotów i urządzeń niesie ze sobą istotne korzyści. Są to na przykład oszczędność miejsca, zmniejszenie poboru energii, polepszenie właściwości użytkowych i parametrów urządzeń oraz zwiększenie obszaru zastosowań. Wobec takich zalet warto konstruować tego typu układy.

Na koniec należy zwrócić uwagę na ostatni już aspekt mikrorobotyki. Jest to dwukierunkowa interakcja pomiędzy mikro/nano biotechnologią a robotyką. Z jednej strony robotyka czerpie wzorce z przyrody i naśladuje już sprawdzone przez naturę rozwiązania, a z drugiej strony przyroda może być wspomagana poprzez mikroroboty, w których znajdzie narzędzie do manipulacji, operacji i leczenia organizmów żywych na poziomie dotąd niewyobrażalnym dla człowieka. Synergia mikroukładów z otoczeniem naturalnym daje ogromne możliwości rozwoju i obustronne korzyści zarówno dla techniki jak i dla natury.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Edukacji i Nauki w ramach projektu badawczego nr: 3 T11A 016 30

## 12. Literatura

- [1] Culpepper M.L., Shih-Chi Chen: Modeling and design of a digitally actuated compliant mechanism for Cartesian micro/nano-manipulators, *Journal of Precision Engineering* 2004.
- [2] Chirikjian, G.S.: A binary paradigm for robotic manipulators, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 1994, San Diego, CA, pp. 3063-70.
- [3] Vorndran S.: Why nanopositioning is more than just nano-meters, *Polytec PI*, 2003.
- [4] Thielicke E., Obermeier E.: Microactuators and their technologies, *Mechatronics* 10 (2000) p. 431-455.
- [5] Morita T.: Miniature Piezoelectric motors, *Sensors and Actuators A* (103), 2003, p.291-300.
- [6] Bar Cohen Y. Editor: *Automation, Miniature Robotics and Sensors for Non Destructive Testing and Evaluation* April 99.
- [7] Kladitis P.E., Bright V. M.: Prototype microrobots for micro-positioning and micro-unmanned vehicles, *Sensors and Actuators* (80) 2000, pp. 132-137.
- [8] Fatikow, S., Seyfried, J., Fahlbusch ST., Buerkle A., Schmoedel F.: A flexible Microrobot – based microassembly station.
- [9] J. Seyfried, S. Fatikow, St. Fahlbusch, A. Buerkle and F. Schmoedel: "Manipulating in the Micro World: Mobile Micro Robots and their Applications", *Int. Symposium on Robotics (ISR)*, Montreal, Canada, May 14-17, 2000.
- [10] A. Burkle and S. Fatikow: Computer Vision Based Control System of a Piezoelectric Microrobot, *Proc. of Int. Conf. on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation*, Vienna, Austria, February 17-19, 1999, pp. 104-109.
- [11] Janine Benyus *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*, Collective Heritage Institute, London, 2004.
- [12] <http://www.nano.poly.mtl.ca>
- [13] <http://diwww.epfl.ch>