

# Robowąż – nowy trend w robotyce mobilnej

mgr inż. Jakub Bartoszek

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów w Warszawie

**Streszczenie:** Opracowanie dotyczy zagadnienia sterowania ruchem wieloczłonowego, szeregowego robota mobilnego. Konstrukcja oraz schemat kinematyczny robota wzorowane są na morfologii węża. W opracowaniu w pierwszej części omówione zostały powody podjęcia tego tematu badań. W części drugiej wymienione zostały znane konstrukcje, na podstawie których opracowany został algorytm sterowania oraz wytłumaczone zostały metody podziału tych konstrukcji. W części trzeciej, dotyczącej algorytmów sterowania, opisana została ogólna budowa ciała węża oraz jego sposób poruszania się. Opisane zostały również cztery główne sposoby poruszania się węży ze względu na ich możliwości lokomocyjne oraz możliwości implementacji. W dalszej części tego rozdziału omówiony został proponowany algorytm sterowania. Przedstawione zostały wyniki badań symulacyjnych oraz konstrukcja mechaniczna.

**Słowa kluczowe:** algorytm sterowania, wieloczłonowy robot mobilny, robot o morfologii węża

Robotyka mobilna od wielu lat stara się rozwiązać problem przemieszczania się robotów mobilnych w różnych środowiskach. Dotychczas stosowane i najbardziej popularne rozwiązania zakładają dostosowywanie rodzaju napędu do podłoża oraz warunków, w jakich robot będzie pracował. Różnice wynikające ze struktury podłoża mają w takim przypadku znaczący wpływ na wybór sposobu poruszania się. W dniu dzisiejszym do najczęściej spotykanych rozwiązań należą napędy kołowe oraz gąsienicowe. Ze względu na liczne wady tych rozwiązań w niektórych zastosowaniach coraz intensywniej prowadzone są badania nad alternatywnymi sposobami zaczerpniętymi ze świata biologicznego. Do najpopularniejszych należą roboty kroczące oraz szeregowo konstrukcje wieloczłonowe wzorowane na morfologii węża.

## 1. Wprowadzenie

Węże są zwierzętami posiadającymi niezwykle zdolności lokomocyjne. Nie posiadając nóg są w stanie pokonywać nieraz przeszkody o znacznej wysokości i poruszać się bez problemu na podłożu, które dla człowieka i maszyn przez niego konstruowanych jest znacznym utrudnieniem. Ich morfologia pozwala im w łatwy sposób dostosowywać się do otoczenia i sytuacji, w której się znajdują. Samo ciało węża pełni rolę mechanizmu przemieszczania się, elementu zawierającego napęd i sterownik nadzorujący pracę całości oraz chwytaka pozwalającego oddziaływać na otoczenie np. dusić ofiarę. Mnogość funkcji jakie posiada ciało węża oraz jego względnie prosta konstrukcja niezmienną od milionów lat świadczą o zasadności szukania rozwiązań

analogicznych do tych opracowanych przez naturę. Wizja nowych zastosowań dla coraz szybciej rozwijających się robotów wieloczłonowych, które potrafią dotrzeć tam, gdzie klasycznie poruszające się roboty nie były w stanie jest inspiracją dla wielu badaczy pracujących w ośrodkach badawczych na całym świecie.

W przeważającej części przypadków konstrukcje robotów wężopodobnych składają się z połączonych szeregowo ze sobą identycznych modułów. W zależności od liczby wymiarów przestrzeni, w której robot się porusza, moduły te posiadają różną konstrukcję (zawierają różną ilość napędów). Ogromna liczba stopni swobody w przypadku konstrukcji działających w trójwymiarowej przestrzeni oraz składającej się z większej ilości modułów wymaga zastosowania skomplikowanych algorytmów sterowania oraz sterowników o dużej mocy obliczeniowej.

## 2. Znane konstrukcje

Konstrukcje oparte na morfologii węża są przedmiotem badań od kilkudziesięciu lat. Jako pierwszy badania nad lokomocją węży przeprowadził Gray [8] (w 1946). Pierwszą konstrukcją opartą na jego badaniach była konstrukcja stworzona przez Hirose [11] w 1972 roku. Ostatnie lata zaowocowały pojawieniem się coraz bardziej skomplikowanych i zbliżonych do biologicznego wzorca konstrukcji.

Jednym z możliwych podziałów opracowywanych konstrukcji i wyników badań jest podział ze względu na liczbę wymiarów przestrzeni, w której robot się porusza. W przypadku robotów działających w dwuwymiarowej przestrzeni [3, 7, 9-19, 22, 26-33, 41] należy zwrócić uwagę na fakt iż w większości przypadków konstrukcje te posiadają swobodne koła umożliwiające im właściwy ruch bez potrzeby odrywania ciała od podłoża. W przypadku ruchu w trójwymiarowej przestrzeni [6, 21, 24, 25, 36, 37, 40] zarówno algorytmy sterowania, jak i sama konstrukcja mechaniczna są dużo bardziej skomplikowane, ponieważ konieczne jest wyznaczenie odpowiednich punktów podparcia oraz ich przemieszczanie wzdłuż ciała węża.

Innym proponowanym podziałem jest podział ze względu na zastosowanie kół w konstrukcji mechanicznej lub ich brak. Zamocowanie swobodnych kół umożliwia zwiększenie oddziaływania sił związanych z ruchem „ciała węża” w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu.

Większość z publikowanych opracowań dotyczy ruchu w pustym otoczeniu i na zupełnie płaskim podłożu o znanym współczynniku tarcia. Jedynie kilka proponowanych rozwiązań problemu poruszania robota tego typu uwzględnia możliwość występowania przeszkód w jego otoczeniu [2, 4, 5, 20, 34, 35, 38, 39, 42]. Algorytmy te wymagają odpowiednio przystosowanej konstrukcji mechanicznej posiadającej czujniki pozwalające określić wartość zewnętrznej siły przeciwdziałającej wychyleniu członu

roboty w typowy sposób (dla danej fazy ruchu wybranego algorytmu). Algorytm sterowania musi być zmodyfikowany w taki sposób, aby umożliwiał omińnięcie lub wykorzystanie napotykanego przeszkód. Przez wykorzystanie rozumiane jest takie ułożenie „ciała” robota względem przeszkody, aby możliwe było odepchnięcie się od niej.

### 3. Rodzaje ruchu

W ruchu węża największą rolę odgrywa kręgosłup wraz ze specyficznymi mięśniami przymocowanymi do niego oraz tarczki brzuszne. Zarówno mięśnie kręgosłupa, jak i sam kręgosłup pozwalają mu wykonywać obroty względem wszystkich trzech osi kartezjańskiego układu współrzędnych związanego z ciałem węża. Natomiast tarczki brzuszne zwane również wentralnymi ułożone w specyficzny sposób na brzuchu węża pozwalają mu „zaczepić się” o podłoże w niektórych fazach ruchu. Nie występują one jednak u wszystkich gatunków węży, co ma duży wpływ na ich sposób poruszania się.

Większość węży poruszania ma umiejętność poruszania się w więcej niż jeden sposób lub w sposób będący połączeniem dwóch innych. Jednakże dominujący rodzaj ruchu jest ściśle zależny od budowy węża (jego cech fizycznych) oraz środowiska, w którym żyje. W literaturze można spotkać opisy czterech różnych sposobów poruszania się węży:

- 1) Ruch wijący (Serpentine movement),
- 2) Ruch akordeonowy (Concertina movement),
- 3) Ruch prostoliniowy (Rectilinear movement),
- 4) Ruch skośny kroczący (Side Winding movement).

Pierwszy z wymienionych jest najbardziej charakterystyczny dla węży, tzn. jest on najczęściej rozpoznawany jako ruch węża i najczęściej wskazywany jako sposób poruszania się węży. Jest on również ze względu na swoje właściwości najczęściej badany i analizowany z pośród wymienionych. W ruchu tym ciało węża w kolejnych fazach przyjmuje kształt złożony z pętli, których liczba oraz amplituda zależą od rodzaju podłoża, po którym się porusza. Model ruchu opracowany na potrzeby badań zakłada sinusoidalną zmianę krzywizny ciała węża.

Do głównych zalet tego sposobu poruszania się należy zaliczyć możliwość osiągania znacznych prędkości oraz wiele stopni swobody odpowiedzialnych za kształt ciała węża w kolejnych fazach ruchu. Do głównych wad należy zaliczyć problem z poruszaniem się po idealnie płaskich i śliskich powierzchniach, takich jak np. szkło.

Drugi ze wspomnianych sposobów poruszania w dużym uproszczeniu da się opisać za pomocą trzech następujących po sobie faz ruchu. W fazie pierwszej wąż skręca ciało, powodując powstanie pętli – tak jak miało to miejsce w ruchu poprzednim. W fazie drugiej następuje przesunięcie przedniej części ciała do przodu. Następnie, w ostatniej fazie ruchu, wąż przesuwa do przodu tylną część ciała i ponownie układa je w pętli, co prowadzi do powtórzenia całego cyklu. Niezwykle istotne w tym rodzaju ruchu są tarczki brzuszne, które umożliwiają zablokowanie przedniej części ciała w trzeciej fazie ruchu i przesunięcie jego tylnej części. Taki sposób poruszania się umożliwia ruch nawet po bardzo śliskich powierzchniach. Jest on jednak dość skomplikowany do zamodelowania

i nie pozwala uzyskać płynnego przemieszczenia „głowy” węża.

Trzecia metoda poruszania się jest zazwyczaj mylnie przypisywana larwom motyli i polega na liniowym przemieszczaniu ciała węża. Dużą rolę w ruchu tym odgrywają ruchome tarczki brzuszne pozwalające zaprzeć się o podłoże i przenieść ciało do przodu. To najbardziej popularny ruch wśród większych węży i trudno go odtworzyć w mechanicznych konstrukcjach. Jednocześnie jest on również najbardziej zaawansowanym rozwiązaniem pozwalającym na przemieszczenie węża w miejscach o przekroju poprzecznym niewiele większym od przekroju samego węża.

Ostatni – czwarty sposób poruszania się jest wykorzystywany przez większość gatunków węży występujących na pustyniach lub w innych miejscach, gdzie podłoże składa się głównie z drobnego i sypkiego piasku. Ruch ten jest zbliżony do ruchu krocącego. Polega na skośnym przesuwaniu ciała za pomocą pętli podpartych najczęściej w dwóch punktach, co znacznie ogranicza powierzchnie kontaktu z podłożem. Dużym minusem tego ruchu jest ilość potrzebnej do niego przestrzeni, co w zasadzie eliminuje to rozwiązanie z zastosowań, w których przestrzeń ruchu jest w jakikolwiek ograniczona. Jego zaletą jest jednak łatwość zamodelowania.

### Proponowany algorytm sterowania

W proponowanym algorytmie sterowania wykorzystane zostały wyniki badań oraz opis matematyczny ruchu węża sformułowany przez Hirose [11]. Zakłada on, że ciało węża jest ciągłą krzywą poruszającą się jedynie w kierunku równoległym do ułożenia ciała. Krzywa ta definiowana jest za pomocą równań (1) i (2).

$$x(s) = \int_0^s \cos(a \cos(b\sigma) + c\sigma) d\sigma \quad (1)$$

$$y(s) = \int_0^s \sin(a \cos(b\sigma) + c\sigma) d\sigma \quad (2)$$

gdzie:

$x(s)$ ,  $y(s)$  – współrzędne punktów wzdłuż krzywej,  
 $s$  – odległość od początku krzywej (głowy węża),  
 $a$ ,  $b$ ,  $c$  – stałe współczynniki.

Alternatywny opis matematyczny został zaproponowany przez Ma [23]. W modelu tym uwzględnione zostały charakterystyczne cechy mięśni węża. Ma udowodnił, iż opis matematyczny zaproponowany przez niego pozwala uzyskać lepsze rezultaty niż algorytmy oparte na opisie sformułowanym przez Hirose. Niestety, jest on również bardziej skomplikowany, co znacznie utrudnia jego wykorzystanie.

Proponowany algorytm bazujący na opisie matematycznym Hirose jest modyfikacją jego znanych implementacji. Modyfikacja ta polegała na przeniesieniu ruchu do przestrzeni trójwymiarowej. Główna zasada działania algorytmu polega na rozłożeniu ruchu trójwymiarowego na dwa osobne w prostokątnych względem siebie płaszczyznach równoległych do kierunku ruchu. Dla każdej z płaszczyzn ruch opisany jest za pomocą innego wzoru. W płaszczyźnie poziomej ruch opisuje równanie (3), natomiast ruch w płaszczyźnie pionowej (4).

$$\Theta_{xi} = A \left( \frac{i+1}{N} \right) \sin \left[ (2\pi v t) - (i\phi) \right] \quad (3)$$

$$\Theta_{yi} = \frac{A}{7} \left( \frac{i+1}{N} \right)^2 \sin \left[ (4\pi v t) - (i\phi) \right] \quad (4)$$

gdzie:

$\Theta_{xi}, \Theta_{yi}$  – sterowanie dla  $i$  – tego napędu,

$i$  – numer napędu,

$N$  – liczba napędów,

$A$  – maksymalna amplituda oscylacji,

$v$  – częstotliwość oscylacji

$\phi$  – przesunięcie fazowe w sterowaniu dla kolejnych napędów,

$t$  – czas ruchu.

Jak łatwo można zauważyć, ruch w płaszczyźnie pionowej odbywa się z dwukrotnie większą częstotliwością oraz mniejszą amplitudą oscylacji. Wynika to z przebiegu funkcji sinus oraz faktu, iż największą prędkość postępową robot uzyskuje w chwili, gdy jego poszczególne człony poruszają się w stronę osi OX pokrywającej się z osią symetrii węża w momencie, gdy sterowanie dla wszystkich napędów równe jest 0. Dwukrotne zwiększenie częstotliwości oscylacji w płaszczyźnie pionowej pozwala unieść ciało węża ponad podłoże we właściwych fazach ruchu. Powodem unoszenia poszczególnych członów jest konieczność zapewnienia odpowiednio dużej siły wypadkowej skierowanej równoległe do kierunku ciała węża i pokrywającej się z kierunkiem jego ruchu.

Parametry mające wpływ na działanie algorytmu sterowania, a przez to również na zachowanie robota (tj. jego prędkość oraz kierunek ruchu) zostały przyjęte jako stałe wartości w całym okresie działania algorytmu. W dalszych pracach planowane jest zastąpienie ich wartościami zmieniającymi się dynamicznie w zależności od sytuacji oraz ułożenia modułów względem siebie.

Ponadto parametry zawarte we wzorach opisujących ruch robota są ściśle zależne od parametrów konstrukcyjnych modelu robota. Największy wpływ mają parametry dynamiczne zastosowanych silników oraz długość każdego z modułów.

### Badania symulacyjne algorytmu sterowania

W celu dobrania właściwych wartości dla parametrów odpowiedzialnych za jakość sterowania oraz kształt ułożenia ciała węża w kolejnych fazach ruchu przeprowadzone zostały doświadczenia w środowisku Matlab. W trakcie symulacji zostały wykorzystane parametry konstrukcyjne prototypu robota opisanego w dalszej części opracowania. Ich użycie pozwala na wykorzystanie wygenerowanych wartości w późniejszym czasie w sterowaniu prototypem. Uzyskane wyniki pozwalają jasno stwierdzić, że właściwy dobór parametrów ma kluczowe znaczenia dla algorytmu sterowania opisanego równaniami (3) oraz (4). W skrajnych przypadkach dla parametrów nie różniących się rzędem wartości uzyskano wyniki, które w rzeczywistym eksperymencie doprowadziłyby do uszkodzenia prototypu robota.

W tab. 1 przedstawione zostały wyniki z badań symulacyjnych przeprowadzonych w celu zbadania wpływu

wartości parametrów na ruch ciała robotycznego węża. Pierwszy z parametrów którego wpływ został zbadany to częstotliwość oscylacji wyrażona w [Hz]. Drugim parametrem jest przesunięcie fazowe sterowania pomiędzy kolejnymi napędami. Ostatni parametr to maksymalna amplituda oscylacji, jaka może wystąpić jedynie w ostatnim module robota. Na wykresach przedstawiony został ruch w dwóch prostopadłych płaszczyznach równoległych do kierunku ruchu. Wartości opisujące osie wykresów zostały wyrażone w [cm]. W celu zaprezentowania kierunku zmian ułożenia ciała węża na wykresach przedstawiony został ruch w kolejnych chwilach czasu. Kolorem czerwonym zostało zaznaczone ułożenie ciała węża w chwili  $t = 0$  ms, natomiast kolorem zielonym w chwili  $t = 100$  ms.

Jak możemy zaobserwować, znaczne zmniejszenie wartości przesunięcia fazowego w symulacjach c) i d) doprowadziło do całkowicie nienaturalnego zachowania symulowanego robota. Podobny efekt uzyskany został w przypadku dwukrotnego zwiększenia amplitudy oscylacji zaprezentowanego na wykresie h).

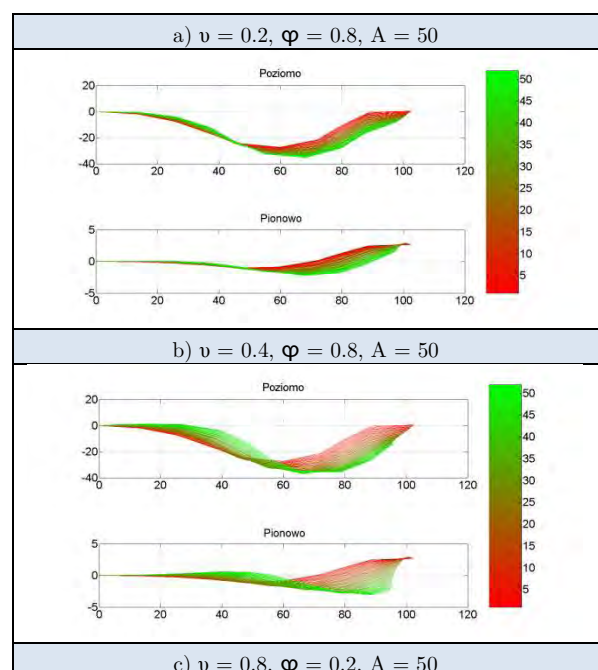
Znaczne zwiększenie przesunięcia fazowego skutkuje zwiększeniem ilości drgań oraz znacznym zmniejszeniem ich amplitudy. W przypadku tym robot wykonuje szybkie, niewielkie ruchy, a jego prędkość jest bliska zeru.

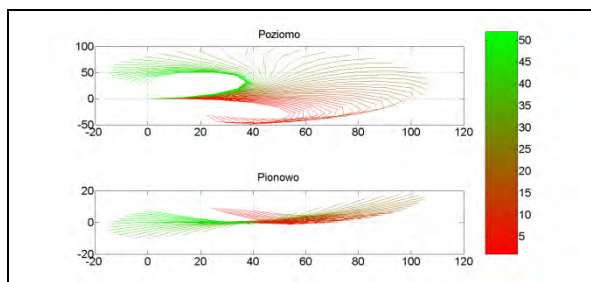
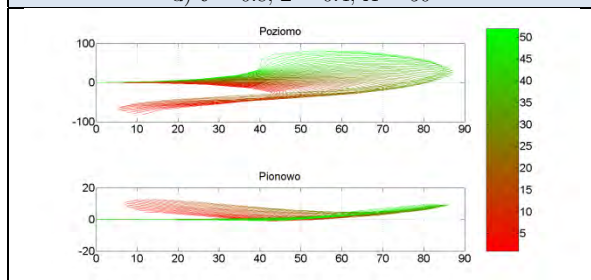
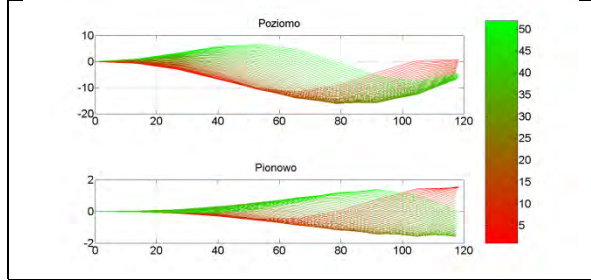
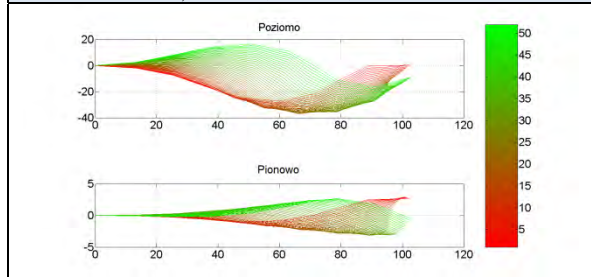
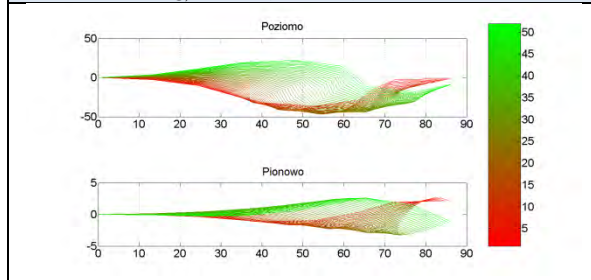
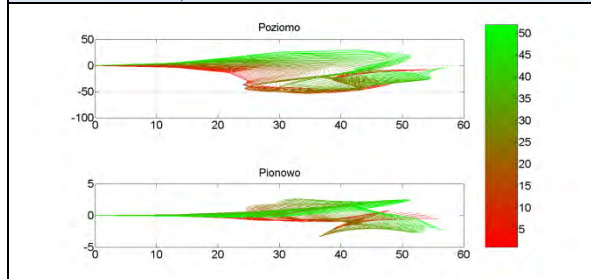
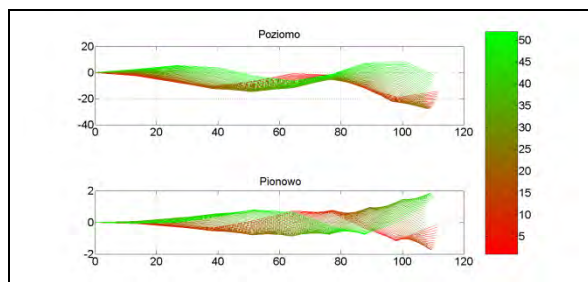
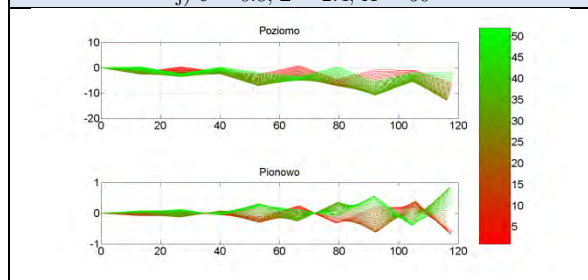
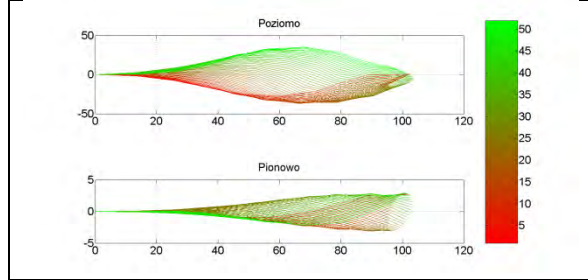
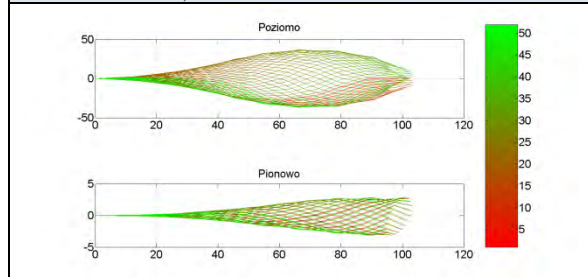
Zwiększenie częstotliwości oscylacji powoduje problemy związane z szybkością napędów, co w zasadzie skutkuje pomijaniem większości sygnałów sterowania.

Najlepsze efekty uzyskane zostały w przypadku częstotliwości oscylacji równej około 0,8 Hz, przesunięciu fazowym równym 0,8 rad oraz amplitudzie równej pomiędzy 20 a 50 cm.

**Tab. 1.** Tabela zawierająca wyniki symulacji dla różnych parametrów ruchu

**Tab. 1.** A table containing the results of simulations for different movement parameters



d)  $v = 0.8$ ,  $\beta = 0.4$ ,  $A = 50$ e)  $v = 0.8$ ,  $\beta = 0.8$ ,  $A = 20$ f)  $v = 0.8$ ,  $\beta = 0.8$ ,  $A = 50$ g)  $v = 0.8$ ,  $\beta = 0.8$ ,  $A = 70$ h)  $v = 0.8$ ,  $\beta = 0.8$ ,  $A = 100$ i)  $v = 0.8$ ,  $\beta = 1.2$ ,  $A = 50$ j)  $v = 0.8$ ,  $\beta = 2.4$ ,  $A = 50$ k)  $v = 1.2$ ,  $\beta = 0.8$ ,  $A = 50$ l)  $v = 2.4$ ,  $\beta = 0.8$ ,  $A = 50$ 

## Konstrukcja mechaniczna

W celu potwierdzenia słuszności poczynionych w trakcie projektowania algorytmu sterowania założeń skonstruowany został prototyp robota. Wyniki z przeprowadzonych eksperymentów dostępne są w Internecie pod adresem <http://www.youtube.com/user/osmpiap> [1].



Rys. 1. Konstrukcja mechaniczna prototypu robota  
Fig. 1. Mechanical design of the prototype robot

Konstrukcja ta składa się z 9 identycznych modułów połączonych szeregowo. Każdy z modułów ma dokładnię 13.5 cm długości i zawiera w sobie 2 napędy zamontowane pod kątem 90° względem siebie. Jako napędy wykorzystane zostały serwomechanizmy AX-12+. Sterownie ruchem robota odbywa się za pośrednictwem opisanego w części 3.1 algorytmu zaimplementowanego na komputerze klasy PC.

Widoczne na Rys. 1 koła zostały zamontowane w celu zwiększenia siły tarcia co znacznie poprawiło właściwości całego robota.

#### 4. Wnioski

W opracowaniu tym opisany został algorytm sterowania szeregowym, wieloczołowym robotem mobilnym – robowędzem. Wnioski pozyskane w trakcie badań symulacyjnych oraz eksperymentów pozwalają stwierdzić iż stosowany w robotach tego typu sposób ich sterowania jest obiecujący i w przyszłości może znacznie poprawić ich zdolność do pokonywania skomplikowanych przeszkód oraz poruszania się w miejscach dziś niedostępnych.

W przyszłych badaniach koniecznym jest skupienie się na wyznaczeniu funkcji pozwalających na dynamiczną zmianę parametrów algorytmu sterowania w trakcie ruchu robota. Planowane również są kolejne testy eksperymentalne mające na celu lepsze dopracowanie jego konstrukcji mechanicznej i poprawienie właściwości lokomocyjnych.

#### Bibliografia

1. PIAP's YouTube Channel, <http://www.youtube.com/user/osmpiap>.
2. Z. Bayraktaroglu, P. Blazevic, *Understanding snakelike locomotion through a novel push - point approach*, „J. Dyn. Syst. – Trans. ASME” 127 (1), 2005, 146-152.
3. F. Chernousko, *Modeling of snake - like locomotion*, „Appl. Math. Comput.” 164 (2), 2005, 415-434.
4. G.S. Chirikjian, J. Burdick, *The kinematics of hyper - redundant robot locomotion*, „IEEE Trans. Robot. Autom.” 11 (6), 1995, 781-793.
5. H. Date, Y. Takita, *Adaptive locomotion of a snake like robot based on curvature derivatives* [w] *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, 2007, 3554-3559.
6. H. Date, Y. Takita, *Control of 3d snake-like locomotive mechanism based on continuum model* [w] *Proc. ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences*, 2005.
7. I. Grabc, *Control of creeping snake-like robot* [w] *Proc. 7<sup>th</sup> Int. Workshop on Advanced Motion Control*, 2002, 513-526.
8. J. Gray, *The mechanism of locomotion in snakes*, „J. Exp. Biol.” 23 (2), 1946, 101-120.
9. R. Hatton, H. Choset, *Approximating displacement with the body velocity integral*, „Proc. Robotics: Science and Systems”, 2009.
10. G.P. Hicks, *Modeling and control of a snake-like serial-link structure*, Ph. D. dissertation, 2003.
11. S. Hirose, *Biologically Inspired Robots: Snake-Like Locomotors and Manipulators*, Oxford: Oxford University Press, 1993.
12. M. Ishikawa, *Iterative feedback control of snake - like robot based on principal fiber bundle modeling*, „Int. J. Advanced Mechatronic Systems” 1 (3), 2009, 175-182.
13. T. Kane, D. Lecison, *Locomotion of snakes: A mechanical 'explanation'*, „Int. J. Solid Struct.” 37 (41), 2000, 5829-5837.
14. S. Kelly, R.M. Murray, *Geometric phases and robotic locomotion*, „J. Robotic Systems” 12 (6), 1995.
15. P. Krishnaprasad, D. Tsakiris, *G-snakes: Nonholonomic kinetic chains on lie groups* [w] *Proc. 33<sup>rd</sup> IEEE Conf. Decision and Control*, 3, 1994, 2955-2960.
16. J. Li, J. Shan, *Passivity control of underactuated snake-like robots* [w] *Proc. 7<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2008, 485-490.
17. P. Liljeback, *Fundamental properties of snake robot locomotion*, [w] *Proc. IEEE / RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, 2010, 2876-2883.
18. P. Liljeback, *A simplified model of planar snake robot locomotion* [w] *Proc. IEEE / RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, 2010, 2876-2883.
19. P. Liljeback, K.Y. Pattersen, O. Stavdahl, J.T. Gravdahl, *Controllability and stability analysis of planar snake robot locomotion*, „IEEE Trans. Automatic Control” 56 (6), 2011, 1365-1380.
20. P. Liljeback, K.Y. Pettersen, O. Stavdahl, J.T. Gravdahl, *Hybrid modelling and control of obstacle - aided snake robot locomotion*, „IEEE Trans. Robotics” 26 (5), 2010, 781-799.
21. P. Liljeback, O. Stavdahl, K.Y. Pettersen, *Modular pneumatic snake robot: 3D modelling, implementation and control*, „Modeling, Identification and Control” 29 (1), 2008, 21-28.
22. S. Ma, *Analysis of creeping locomotion of a snake-like robot*, „Adv. Robotics 15 (2), 2001.
23. S. Ma, *Analysis of snake movements forms for realization of snake-like robots* [w] *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation 4*, 1999, 3007-3013.
24. S. Ma, Y. Ohmameuda, K. Inoue, *Dynamic analysis of 3-dimensional snake robots* [w] *Proc. IEEE / RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, 2004, 767-772.
25. S. Ma, Y. Ohmameuda, K. Inoue, B. Li, *Control of a 3 - dimensional snake-like robot* [w] *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation 2*, 2003, 2067-2072.
26. S. Ma, N. Tadokoro, *Analysis of creeping locomotion of a snake-like robot on a slope*, „Autonomous Robots” 20, 2006, 15-23.
27. F. Matsuno, K. Mogi, *Redundancy controllable system and control of snake robots based on kinematic model* [w] *Proc. IEEE Int. Conf. Control Applications 5*, 2000, 4791-4796.
28. F. Matsuno, H. Sato, *Trajectory tracking control of snake robots based on dynamic model* [w] *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotic and Automation*, 2005, 3029-3034.
29. V. Mehta, S. Brennan, F. Gandhi, *Experimentally verified optimal serpentine gait and hyperredundancy*

- of a rigid-link snake robot, „IEEE Trans. on Robotics” 24 (2), 2008, 348-360.
30. M. Nilsson, *Serpentine locomotion on surfaces with uniform friction* [w] *Proc. IEEE / RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, 2004, 1751-1755.
  31. J.P. Ostrowski, J. Burdick, *The mechanics and control of undulatory robotic locomotion*, Ph. D. dissertation, 1996.
  32. P. Prautsch, T. Mita, *Control and analysis of the gait of snake robots* [w] *Proc. IEEE Int. Conf. Control Applications*, 1999.
  33. M. Saito, M. Fukaya, T. Iwasaki, *Serpentine locomotion with robotic snakes*, „IEEE Contr. Syst. Mag.” 22 (1), 2002, 64-81.
  34. Y. Shan, Y. Koren, *Design and motion planning of a mechanical snake*, „IEEE Trans. Syst. Man Cyb.” 23 (4), 1993, 1091-1100.
  35. Y. Shan, Y. Koren, *Obstacle accommodation motion planning*, „IEEE. Trans. Robot. Autom.” 11 (1), 1995, 36-49.
  36. A. Shapiro, A. Greenfield, H. Choset, *Frictional compliance model development and experiments for snake robot climbing* [w] *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 2007 574-579.
  37. M. Tanaka, F. Matsuno, *Modeling and control of a snake robot with switching constraints*, Sice Annual Conference, 2008.
  38. I. Tanev, T. Ray, A. Buller, *Automated evolutionary design, robustness, and adaptation of sidewinding locomotion of a simulated snake-like robot*, „IEEE Trans. on Robotics” 21 (4), 2005, 632-645.
  39. A.A. Transeth, R.I. Leine, C. Glocker, K.Y. Pettersen, P. Liljebäck, *Snake robot obstacle aided locomotion: Modeling, simulation and experiments*, „IEEE Trans. Rob.” 24 (1), 2008, 88-104.
  40. A.A. Transeth, R.I. Leine, C. Glocker, K.Y. Pettersen, *3D snake robot motion: Non-smooth modeling, simulations and experiments*, „IEEE Trans. on Robotics” 24 (2), 2008, 361-376.
  41. J. Ute, K. Ono, *Fast and efficient locomotion of a snake robot based on self - excitation principle* [w] *Proc. 7<sup>th</sup> Int. Workshop on Advanced Motion Control*, 2002, 532-539.
  42. H. Yamada, S. Hirose, *Study on the 3d shape of active cord mechanism* [w] *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 2006, 2890-2895.

### Robosnake – New Trend In Mobile Robotics.

**Abstract:** This elaborations covers an issue of motion control, of serial mobile robot. Design and kinematic diagram of the robot are modeled on the morphology of the snake. The first part discusses the reasons for this research topic. The second section lists the known structures on which the control algorithms has been developed. The method of the division of these structures have been explained. In the third part, concerning the control algorithms, has been described the overall structure of the snake and its way of moving. Also the four main snakes locomotion methods has been described due to their motion capabilities and possibilities of implementation. Further in this chapter the proposed control algorithm is being discussed. The results of simulation and mechanical design are presented.

**Keywords:** control algorithm, serial mobile robot, snake morphology

#### mgr inż. Jakub Bartoszek

Otrzymał tytuł mgr inż. Robotyki na Politechnice Śląskiej w Gliwicach w 2010 roku. W chwili obecnej pracuje jako programista i specjalista badawczo-techniczny w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów. Większość z licznych zainteresowań oraz prowadzonych dotychczas prac badawczych porusza zagadnienie z dziedziny sztucznej inteligencji (autonomicznego sterowania ruchem).

e-mail: [jbartoszek@piap.pl](mailto:jbartoszek@piap.pl)

