

Prototyp ekstremalnie modularnego hiperredundantnego manipulatora Arm-Z

Ela Zawidzka, Machi Zawidzki

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, ul. Adolfa Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa

Wojciech Kiński

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa

Streszczenie: Arm-Z to koncepcja hiperredundantnego manipulatora robotycznego składającego się z przystających modułów o jednym stopniu swobody (1-DOF) i realizującego (prawie) dowolne ruchy w przestrzeni. Zasadnicze zalety Arm-Z to: ekonomizacja (dzięki masowej produkcji identycznych elementów) oraz odporność na awarie (po pierwsze – zepsute moduły mogą być łatwo zastąpione, po drugie – nawet gdy jeden lub więcej modułów ulegnie awarii – manipulator taki może ciągle wykonywać, prawdopodobnie w stopniu ograniczonym, zakładane zadania). Podstawową wadą systemu Arm-Z jest jego nieintuicyjne, bardzo trudne sterowanie. Innymi słowy, połączenie koncepcji nietrywialnego modułu z formowaniem praktycznych konstrukcji oraz sterowanie ich rekonfiguracją (transformacją ze stanu A do B) są bardzo złożone obliczeniowo. Mimo to, prezentowane podejście jest racjonalne, zważywszy powszechną dostępność wielkich mocy obliczeniowych w kontraście z wysokimi kosztami i „delikatnością” niestandardowych rozwiązań i urządzeń. W artykule nakreślono ogólną koncepcję manipulatora Arm-Z i zaprezentowano wstępne prace zmierzające do wykonania prototypu.

Słowa kluczowe: systemy modułowe, Arm-Z, sterowanie kształtem ogólnym, odporność na awarie

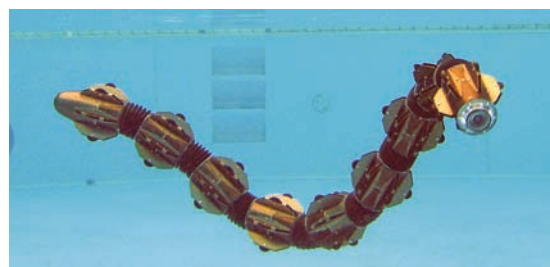
1. Wprowadzenie

Biologiczne węże są doskonale przystosowane do życia w różnych środowiskach. Zawdzięczają to głównie dużej redundancji „mechanizmu wężowego” wynikającej z nadmiarowej liczby stopni swobody [1]. W wielu przypadkach środowisk nieregularnych, inspirowane biologią roboty osiągają lepsze rezultaty niż roboty konwencjonalne: na kołach, gąsienicach czy nogach.

Badania nad robotami wężowymi trwają od kilku dekad. Ten rodzaj lokomocji był analizowany już w latach 40. XX wieku [2], zaś rygorystyczny model matematyczny powstał pół wieku później. Shigeo Hirose z Tokijskiego Instytutu Technologicznego wprowadził tak zwany „aktywny mechanizm ciągnowy” ACM (ang. *active chord mechanism*), a pierwszy udany lokomotor ACM III powstał w latach 1972–75. W latach 90. skonstruowano manipulator oparty na tym mechanizmie [3]. Od tej pory powstała pewna liczba robotów wężowych [4]; większość

rozwiązań przewidziano do pełzania po gruncie [5–9]; niektóre do pływania [10, 11]; zaś jeszcze mniej zarówno do pływania jak i pełzania [12, 13]. Na Rys. 1 przedstawiono ziemnowodnego robota wężowego zaprojektowanego do realizacji inspekcji oraz misji poszukiwawczo-ratunkowych w niebezpiecznych środowiskach.

Podobnie do swoich biologicznych odpowiedników, manipulatory typu wąż lub trąba słonia, dzięki specyficznemu rodzajowi ruchu mogą mieć pewne przewagi nad konwencjonalnymi manipulatorami robotycznymi. Główną zaletą jest możliwość operowania w skomplikowanych geometrycznie środowiskach, niedostępnych innymi metodami. W zależności od zadania, różnego rodzaju głowice robocze mogą być instalowane na koń-



Rys. 1. Zdjęcie modularnego ziemnowodnego robota wężowego ACM-R5H z 2010 r. wykonane w Tokijskim Instytucie Technologicznym
Fig. 1. Photograph of a modular amphibious snake robot ACM-R5H (Tokyo Institute of Technology)

Autor korespondujący:

Machi Zawidzki, zawidzki@MIT.edu

Artykuł recenzowany

nadesłany 01.01.2023 r., przyjęty do druku 07.02.2023 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

cówkach takich manipulatorów, np. do: spawania, czyszczenia, monitorowania, etc. Generalnie sześć stopni swobody (6-DOF) pozwala na wykonanie każdego rodzaju ruchu w przestrzeni trójwymiarowej: przesunięcie wzdłuż trzech osi kartezjańskich X, Y i Z oraz trzy obroty: pochylenie, przechylenie i odchylenie. Konwencjonalne manipulatory przemysłowe mają małą liczbę stopni swobody, zwykle właśnie sześć. Co ciekawe, np. ludzkie ramię jest systemem redundantnym, gdyż ma siedem stopni swobody (7-DOF): trzy w ramieniu, jeden w łokciu i trzy w nadgarstku. Powstało kilka robotów naśladujących ludzkie ramię: robot PA-10 wykonany w zakładach Mitsubishi, lekki robot DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), etc. Robot DEXTER wykonany we włoskiej firmie Scienza Macchinale jest przykładem manipulatora o ośmiu stopniach swobody (8-DOF). Układy o większej liczbie swobody nazywane są redundantnymi, zaś termin hiperredundantny używany jest do manipulatorów o bardzo dużej, teoretycznie nieskończonej liczbie stopni swobody [14, 15].

Te ostatnie są klasyfikowane do dwóch grup:

- manipulatory o sztywnych "kręgowych" elementach, np. węzowe,
- "bezkęgowe" ciągle manipulatory imitujące ramiona ośmiornicy lub trąbę słońca.

Ulepszoną metodę rozwiązywania zadania kinematyki odwrotnej dla przestrzennych robotów hiperredundantnych w oparciu o koncepcję "krzywizny kręgosłupa" w połączeniu z analizą modalną redundancji przedstawiono w [16].

Model kinematyczny manipulatora inspirowany macką ośmiornicy, gdzie platformy Stewarta o sześciu stopniach swobody (6-DOF) stanowią ogniwa dyskretnego wielosegmentowego układu [17]. Zadanie kinematyki odwrotnej dla manipulatora będącego połączonym łańcuchem ogniw polega na określeniu pozycji wszystkich ogniw w funkcji położenia i orientacji końcówki manipulatora. Znalezienie rozwiązania kinematyki odwrotnej w postaci jawnej jest praktycznie proste, gdyż umożliwia znalezienie wszystkich możliwych rozwiązań szybciej niż metodami numerycznymi [18]. Zadanie kinematyki odwrotnej dla typowego manipulatora przemysłowego może być rozwiązane stosunkowo łatwo [19], przeto sterowanie takim manipulatorem jest względnie proste. Tymczasem manipulatory hiperredundantne to systemy wysoce nieliniowe, ich sterowanie jest bardzo trudne i zwykle wymaga stosowania metod inteligencji obliczeniowej [20–22]. Sposób rozwiązywania problemu kinematyki odwrotnej w postaci jawnej dla płaskiego manipulatora redundantnego zaproponowano w [23]. Metoda ta wykorzystuje pochodną Fréchet'a pewnej funkcji celu wprowadzonej do wyrugowania niewyznaczalności systemu. Niemniej model tam przedstawiony nie uwzględniał żadnych ograniczeń w zakresie ruchów manipulatora w połączeniach, co jest ogromnym uproszczeniem. Ponadto zadanie rozwiązano dla płaskiego manipulatora o zaledwie trzech stopniach swobody. W przypadku manipulatorów hiperredundantnych analityczny już opis kinematyki prostej

"eksploduje" wraz ze zwiększaniem liczby stopni swobody, nie wspominając zadania odwrotnego, które ze swojej natury jest jakościowo trudniejsze. Zatem przedstawione tam podejście nie ma praktycznego zastosowania dla manipulatorów hiperredundantnych. Podobne rozwiązania zawarto w pracach [24, 25]. W artykule [26] przedstawiono metodę analizy sterowania trajektorią planarnego manipulatora przy użyciu pseudoinwersji Moore'a-Penrose'a. Zaś w artykule [27] przedstawiono metodę rozwiązywania problemu kinematyki odwrotnej dla manipulatorów redundantnych przez wykorzystanie algorytmu opartego na kombinacji zapętłonej pseudoinwersji oraz wielokryterialnego algorytmu genetycznego.

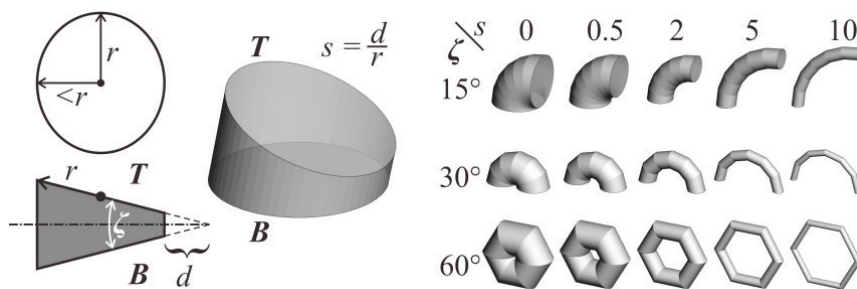
Metodę heurystyczną do przeszukiwania grafowego w celu wyznaczenia bezkolizyjnej trajektorii pięcio-ogniowego redundantnego manipulatora opisano w [28]. Inny algorytm optymalizujący ruch hiperredundantnego robota przez wyznaczenie arbitralnej ścieżki dla czoła lokomotora oraz wszystkich kolejnych ogniw, tak by unikać kolizji z danymi przeszkodami przedstawiono w [29].

Alternatywną metodę tzw. "tunelowania", zastosowano do omijania przeszkód przez płaski manipulator hiperredundantny [14]. W kolejnym artykule [30], ci sami autorzy przedstawili różne robotyczne mechanizmy hiperredundantne (łącznie z systemem o 30-stu stopniach swobody) wraz z możliwymi zastosowaniami. W pracy [31] sformułowano dynamikę hiperredundantnych manipulatorów jako problem mechaniki ośrodków ciągłych. Zaletą tego podejścia jest łatwe zrównoleglenie obliczeń. Więcej na temat tego typu manipulatorów można znaleźć w [31].

2. Koncepcja Arm-Z

Idea Arm-Z w największym skrócie, opiera się na czterech przesłankach:

- Rura to prosty i względnie łatwy do wykonania element konstrukcyjny, szczególnie efektywny w przypadku zginania wieloosiowego. Zachodzi ono w elementach uniwersalnych, to jest takich, w których kierunek zginania nie może być z góry założony.
- Konstrukcje rurowe w swojej naturze, pozwalają na tworzenie kanałów komunikacyjno-transportowych (Rys. 1).
- Modularność to racjonalny sposób ekonomizacji konstrukcji. Pozwala na masową produkcję stosunkowo skomplikowanych identycznych elementów przy względnie niskiej cenie. Ponadto modularność pozytywnie wpływa na odporność konstrukcji na awarie. Zużyty lub zepsuty element może być stosunkowo łatwo wymieniony przez identyczny odpowiednik.
- Responsywność, adaptowalność, rekonfigurowalność, szybka instalacja i dynamiczne sterowanie to poważne wyzwania nowoczesnej architektury, budownictwa i inżynierii w wiecznie zmieniającym się środowisku. Współczesne konstrukcje



Rys. 2. Po lewej: wizualizacja modułu Arm-Z opisywanego trzema parametrami geometrycznymi: r , d oraz ζ . Po prawej: przykłady prostych konfiguracji modułów dla różnych parametrów ζ i s

Fig. 2. On the left – visualization of the Arm-Z module defined by three geometrical parameters: r , d and ζ . On the right – examples of simple Arm-Z configurations for various values of parameters ζ and s

nie tylko muszą spełniać wymagania nośności i bezpieczeństwa, ale powinny również w sposób inteligentny dostosowywać się do zmiennego środowiska oraz zmiennych wymagań użytkowników.

Arm-Z to koncepcja jednogłęziowego trójwymiarowego manipulatora rurowego o dowolnym kształcie wykonanego z jednego rodzaju modułu. Moduł Arm-Z określa kilka parametrów: wielkość r , odsunięcie d , i kąt ζ między powierzchniami dolną (**B**) i górną (**T**). Wygodnie jest stosować dodatkowy parametr $s = d/r$. Rysunek 2 ilustruje te parametry.

Zatem globalny kształt manipulatora Arm-Z zależy od: liczby modułów, geometrycznych parametrów każdego modułu oraz względnych obrotów między modułami. Połączenie między każdym modułem ma jeden stopień swobody (1-DOF) – względny obrót. Projekt połączenia o dwóch stopniach swobody (2-DOF) dla trójwymiarowych robotów hiperredundantnych, zoptymalizowanego pod kątem zwartości, wytrzymałości oraz zakresu ruchów przedstawiono w [32]. Z kolei projekt mechaniczny dla zwartego połączenia o trzech stopniach swobody (3-DOF) z przeznaczeniem dla lokomotorów węzłowych przedstawiono w [33]. Sterowanie manipulatorem hiperredundantnym jest trudne i dalece nieintuicyjne. W artykule [34] zwrócono uwagę, że stosowanie technik rzeczywistości wirtualnej oraz naturalnego języka ułatwia sterowanie takimi robotami.

3. Koncepcja prototypu

W trakcie trwania projektu wykonano szereg atrap i wstępnych prototypów, co ilustruje Rys. 3.

Głównym założeniem przy projektowaniu funkcjonalnego prototypu Arm-Z była przede wszystkim prostota konstruk-

cji, ograniczenie do minimum liczby podzespołów oraz możliwość wytworzenia jak największej liczby części składowych przy wykorzystaniu technologii addytywnych oraz możliwość programowania kąta wychylenia (ζ) każdego modułu. Uwzględniając wszystkie założenia powstał prototyp, który widoczny jest na Rys. 4.

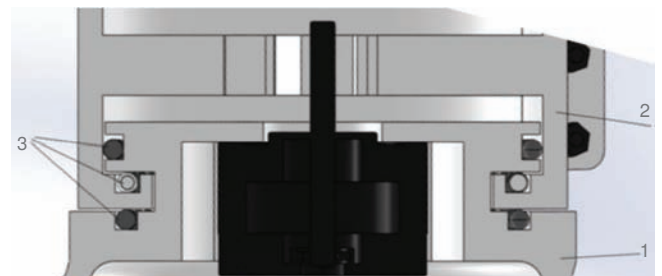
W celu zapewnienia łatwego montażu przeniesienia napędu ogniwa Arm-Z wewnątrz każdego ogniwa, korpus został podzielony na dwie części, które skręcane są za pomocą śrub M3. Umożliwia to łatwy dostęp do zamontowania silnika krokowego wewnątrz członu składowego Arm-Z, zębatego koła na osi silnika oraz wypełnienie bieżni kulkami łożyskowymi. Zastosowanie kulek zmniejsza opory ruchu ogniwa względem siebie (wzdłużnie i poprzecznie). Sposób ułożyskowania widoczny jest na Rys. 5.

Korpus modułu Arm-Z został zaprojektowany z myślą o wytwarzaniu na drukarkach 3D w technologii FDM/FFF. Proces produkcji polega na nanoszeniu warstwa po warstwie roztopionego materiału termoplastycznego dostarczanego najczęściej w formie drutu do głowicy [35]. Rozwiązanie to pozwala na łatwy sposób produkcji modułów, które wedle potrzeby można modyfikować (np. zmieniając kąt nachylenia pojedynczego członu). Dzięki zastosowaniu technologii przyrostowych użytkownik ma również możliwość programowania wewnętrznej struktury wytwarzanego obiektu, w której można konfigurować m.in. zmianę stopnia wypełnienia wytwarzanego modelu. Pozwala to ograniczyć docelową masę gotowego wyrobu nawet o 40 % w porównaniu z częścią wytworzoną konwencjonalnymi metodami (obróbka skrawaniem, metoda wtryskowa). Trójwymiarowy model prototypu Arm-Z uwzględnia tolerancję wymiarową rzędu 0,1 mm, która określa niedoskonałości podczas wytwarzania na maszynach w technologii FDM/FFF spowodowane m.in.



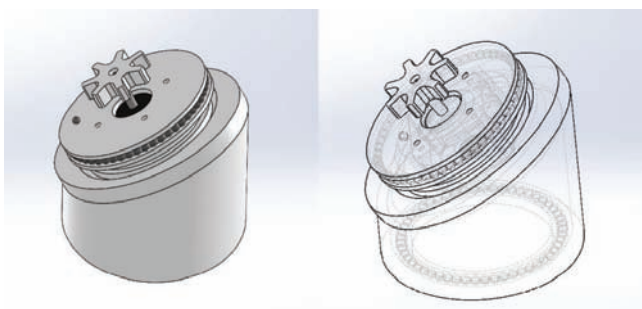
Rys. 3. Po lewej: atrapa Arm-Z ilustrująca ogólną koncepcję systemu. Po prawej – wczesny prototyp wyposażony w wewnętrzny układ przekładni umożliwiający wykonywanie prostych ruchów

Fig. 3. On the left – a photograph of a mock-up illustrating the concept of the Arm-Z manipulator. On the right – an early prototype showing the internal gear system allowing for simple movements



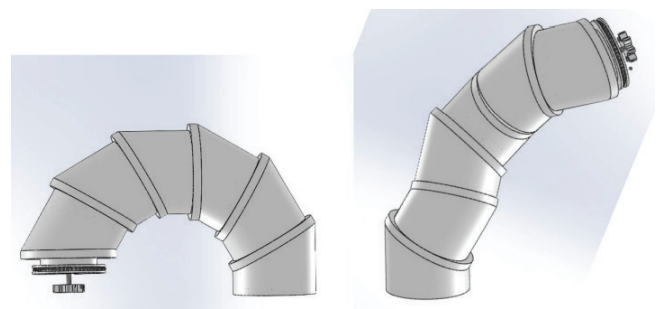
Rys. 5. Sposób ułożyskowania modułów Arm-Z (widok-przekrój), gdzie: 1 – człon A; 2 – człon B; 3 – kulki łożyskowe [opracowanie własne]

Fig. 5. The bearing system of the Arm-Z module: 1 – module A, 2 – module B, 3 – ball bearing



Rys. 4. Wizualizacja modułu Arm-Z. Dzięki przezroczystości pokazano: korpus modułu, połączenie śrubowe M3x15, kulki łożyskowe 4 mm, silnik krokowy typu NEMA17 oraz koło zębate [opracowanie własne]

Fig. 4. A visualization of the Arm-Z module. Transparency shows the internal structure: the casing, M3x15 bolted joint, 4 mm ball bearing, NEMA17 step-motor and custom tooth wheel



Rys. 6. Sześciocłonowy manipulator Arm-Z z modułami o kącie nachylenia (ζ) 30° w dwóch wybranych konfiguracjach [opracowanie własne]

Fig. 6. A visualization of a six-module Arm-Z manipulator ($\zeta = 30^\circ$) in two configurations

skurczem. W ten sposób ograniczane są problemy występujące na etapie montażu fizycznego modelu.

Sterowanie poszczególnymi członami Arm-Z odbywa się za pomocą silników krokowych zainstalowanych wewnątrz każdego z ogniw, sterowanych przez układ Arduino. Moment obrotowy każdego z silników (około 0,4 Nm) oraz liczba 200 kroków na obrót w połączeniu z inteligentnym sterownikiem silnika krokowego (wyposażonego w obsługę mikrokroków) pozwala na płynne regulowanie zmiany kąta obrotu każdego z ogniw z dokładnością do jednego stopnia. Szacowana masa całkowita jednego kompletnego ogniwka to około 500 g (uwzględnia masę silnika krokowego 200 g). Sterowanie odbywa się z poziomu programu przez wywołanie odpowiednich komend języka G-CODE dla poszczególnych silników krokowych. Dodatkowym atutem prototypu Arm-Z jest możliwość budowy manipulatora przez łączenie ogniw o różnych kątach nachylenia, co zwiększa jego zastosowanie. Rysunek 6 prezentuje manipulator Arm-Z zbudowany z sześciu członów.

W artykule [36] przedstawiono wyniki prac z wykonania łącznika, będącego kołem omnikierunkowym (szwedzkim) o zmiennej sztywności, w technice druku 3D z polimeru z pamięcią kształtu SMP (ang. *shape memory polymer*). Pogłębiona analiza pod kątem projektu mechanicznego, kinematyki oraz weryfikacji eksperymentalnej prototypu hiperredundantnego robota ciągnowego została przedstawiona w [37]. Zaś konstrukcja lekkiego (ażurowego) manipulatora sterowanego za pomocą dielektrycznych polimerowych aktuatorów została przedstawiona w [38].

4. Podsumowanie

- Prototyp wielozłonowego manipulatora Arm-Z cechuje się prostą i zwartą konstrukcją.
- Programowalny, trójwymiarowy model pozwala na dowolną konfigurację członów pod względem średnicy, długości modułu czy też kąta pochylenia (ζ).
- Dzięki modułowej konstrukcji w łatwy sposób można zaprojektować manipulator, spełniający zadane kryteria pracy manipulatora. Koszt oraz możliwość wytworzenia większości części za pomocą drukarki 3D pozwala na szybkie prototypowanie różnych manipulatorów Arm-Z.
- Uwzględniając możliwość ponownego przetopu materiału z wytworzonych wcześniej modułów przedstawiona koncepcja prototypu Arm-Z wpisuje się w gospodarkę obiegu zamkniętego, co idealnie przekłada się na dzisiejsze trendy "no waste".
- Czas wytworzenia części przy wykorzystaniu "desktopowych" drukarek 3D nie powinien być dłuższy niż 10 h na jeden moduł.
- W dalszych krokach planowana jest budowa fizycznego modelu manipulatora, opierającego się na opisanym prototypie, w celu weryfikacji i walidacji trójwymiarowego modelu.

Podziękowania

Opisane badania stanowią część projektu „Arm-Z: ekstremalnie modularny hiperredundantny ekonomiczny manipulator – opracowanie metod sterowania oraz analiza efektywności” finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w ramach programu OPUS 17, kontrakt nr 2019/33/B/ST8/02791.

Bibliografia

1. Zawidzki M., Nagakura T., *Arm-Z: a modular virtual manipulative*. [In:] H-P. Schröcker, editor, 16th International Conference on Geometry and Graphics, 2014, 75–80.
2. Gray J., *The mechanism of locomotion in snakes*. „Journal of Experimental Biology”, Vol. 23, No. 2, 1946, 101–120, DOI: 10.1242/jeb.23.2.101.
3. Hirose S., *Biologically Inspired Robots: Snake-Like Locomotors and Manipulators*. Oxford University Press, 1993.
4. Ijspeert A.J., Crespi A., *Online trajectory generation in an amphibious snake robot using a lamprey-like central pattern generator model*. Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2007), 262–268, DOI: 10.1109/ROBOT.2007.363797.
5. Chirikjian G.S., Burdick J.W., *Design and Experiments with a 30 DOF Robot*. [In:] Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1993, 113–119, DOI: 10.1109/ROBOT.1993.291862..
6. Klaassen B., Paap K.L., *GMD-SNAKE2: a snake-like robot driven by wheels and a method for motion control*. Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 99CH36288C), Vol. 4, 1999, 3014–3019, DOI: 10.1109/ROBOT.1999.774055.
7. Miller G., *Snake robots for search and rescue*, [In:] Neurotechnology for Biomimetic Robots, 2002, DOI: 10.7551/mitpress/4962.003.0023.
8. Choi H.R., Ryew S.M., *Robotic system with active steering capability for internal inspection of urban gas pipelines*. „Mechatronics”, Vol. 12, No. 5, 2002, 713–736, DOI: 10.1016/S0957-4158(01)00022-8.
9. Tsakiris D.P., Sfakiotakis M., Menciassi A., La Spina G., Dario P., *Polychaete-like undulatory robotic locomotion*. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005, 3018–3023. IEEE, DOI: 10.1109/ROBOT.2005.1570573.
10. Melsaac K.A., Ostrowski J.P., *A geometric approach to anguilliform locomotion: modelling of an underwater eel robot*. Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 99CH36288C), Vol. 4, 1999, 2843–2848, DOI: 10.1109/ROBOT.1999.774028.
11. Wilbur C., Vorus W., Cao Y., *A Lamprey-Based Undulatory Vehicle*. [In:] Neurotechnology for Biomimetic Robots, 2002, DOI: 10.7551/mitpress/4962.003.0024.
12. Yamada H., *Development of amphibious snake-like robot ACM-R5*. Proceedings of the 36th International Symposium on Robotics (ISR 2005), Tokyo, 2005, 433–440.
13. Crespi A., Badertscher A., Guignard A., Ijspeert A.J., *AmphiBot I: an amphibious snake-like robot*. „Robotics and Autonomous Systems”, Vol. 50, No. 4, 2005, 163–175, DOI: 10.1016/j.robot.2004.09.015.
14. Chirikjian G.S., Burdick J.W., *An obstacle avoidance algorithm for hyper-redundant manipulators*. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1990, 625–631, DOI: 10.1109/ROBOT.1990.126052.
15. Ning K., Wörgötter F., *A novel concept for building a hyper-redundant chain robot*. „IEEE Transactions on Robotics”, Vol. 25, No. 6, 2009, 1237–1248, DOI: 10.1109/TRO.2009.2032968.
16. Fahimi F., Ashrafiuon H., Nataraj C., *An improved inverse kinematic and velocity solution for spatial hyper-redundant robots*. „IEEE Transactions on Robotics and Automation”, Vol. 18, No. 1, 2002, 103–107, DOI: 10.1109/70.988980.
17. Lafmejani A.S., Doroudchi A., Farivarnejad H., He X., Aukes D., Peet M.M., Marvi H., Fisher R.E., Berman S., *Kinematic modeling and trajectory tracking control of an octopus-inspired hyper-redundant robot*. „IEEE Robotics and Automation Letters”, Vol. 5, No. 2, 2020, 3460–3467, DOI: 10.1109/LRA.2020.2976328.
18. Siciliano B., Khatib O., Kröger T., *Springer handbook of robotics*, Vol. 200, Springer, 2008.
19. Murray R.M., Li Z., Sastry S.S., *A mathematical introduction to robotic manipulation*. CRC press, 1994.

20. Rolf M., Steil J.J., *Efficient exploratory learning of inverse kinematics on a bionic elephant trunk*. „IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems”, Vol. 25, No. 6, 2014, 1147–1160, DOI: 10.1109/TNNLS.2013.2287890.
21. Melingui A., Escande C., Benoudjit N., Merzouki R., Mbede J.B., *Qualitative approach for forward kinematic modeling of a compact bionic handling assistant trunk*. „IFAC Proceedings Volumes”, Vol. 47, No. 3, 2014, 9353–9358, DOI: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.01758.
22. Falkenhahn V., Hildebrandt A., Neumann R., Sawodny O., *Dynamic control of the bionic handling assistant*. „IEEE/ASME Transactions on Mechatronics”, Vol. 22, No. 1, 2017, 6–17, DOI: 10.1109/TMECH.2016.2605820.
23. Galicki M., *A closed solution to the inverse kinematics of redundant manipulators*. „Mechanism and Machine Theory”, Vol. 26, No. 2, 1991, 221–226, DOI: 10.1016/0094-114X(91)90085-I.
24. Jacak W., *A discrete kinematic model of robots in the Cartesian space*. „IEEE Transactions on Robotics and Automation”, Vol. 5, No. 4, 1989, 435–443, DOI: 10.1109/70.88058.
25. Jacak W., *Strategies of searching for collision-free manipulator motions: automata theory approach*. „Robotica”, Vol. 7, No. 2, 1989, 129–138, DOI: 10.1017/S0263574700005439.
26. Machado J.A.T., Lopes A.M., *A fractional perspective on the trajectory control of redundant and hyper-redundant robot manipulators*. „Applied Mathematical Modelling”, Vol. 46, 2017, 716–726, DOI: 10.1016/j.apm.2016.11.005.
27. Maria da Graça Marcos, Machado J.A.T., Azevedo-Perdicóulis T.-P., *A multi-objective approach for the motion planning of redundant manipulators*. „Applied Soft Computing”, Vol. 12, No. 2, 2012, 589–599, DOI: 10.1016/j.asoc.2011.11.006.
28. Galicki M., Morecki A., *Finding collision-free trajectory for redundant manipulator by local information available*. [In:] RoManSy 9, 1993, 61–71. Springer, DOI: 10.1007/BFb0031432.
29. Menon M.S., Ravi V.C., Ghosal A., *Trajectory planning and obstacle avoidance for hyper-redundant serial robots*. „Journal of Mechanisms and Robotics”, Vol. 9, No. 4, 2017, DOI: 10.1115/1.4036571.
30. Chirikjian G.S., Burdick J.W., *Hyper-redundant robot mechanisms and their applications*. Proceedings IROS ,91: IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems ,91, DOI: 10.1109/IROS.1991.174447.
31. Chirikjian G.S., Burdick J.W., *A hyper-redundant manipulator*. „IEEE Robotics & Automation Magazine”, Vol. 1, No. 4, 1994, 22–29, DOI: 10.1109/100.388263.
32. Shamma E., Wolf A., Brown H.B., Choset H., *New joint design for three-dimensional hyper redundant robots*. Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003), Vol. 4, 2003, 3594–3599, DOI: 10.1109/IROS.2003.1249713.
33. Shamma E., Wolf A., Choset H., *Three degrees-of-freedom joint for spatial hyper-redundant robots*. „Mechanism and Machine Theory”, Vol. 41, No. 2, 2006, 170–190, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2005.04.008.
34. Martín-Barrio A., Roldán J.J., Terrile S., del Cerro J., Barrientos A., *Application of immersive technologies and natural language to hyper-redundant robot teleoperation*. „Virtual Reality”, Vol. 24, No. 3, 2020, 541–555, DOI: 10.1007/s10055-019-00414-9.
35. Cader M., Kiński W., *Effect of changing the parameters of the Multi Jet Fusion (MJF) process on the spatial objects produced*. „Problemy Mechatroniki: uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa”, Vol. 11, Nr 4, 2020, 61–72, DOI: 10.5604/01.3001.0014.5644.
36. Yang Y., Chen Y., Li Y., Chen M.Z., *3D printing of variable stiffness hyper-redundant robotic arm*. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2016, 3871–3877, DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487575.
37. Tang L., Wang J., Zheng Y., Gu G., Zhu L., Zhu X., *Design of a cable-driven hyper-redundant robot with experimental validation*. „International Journal of Advanced Robotic Systems”, Vol. 14, No. 5, 2017, DOI: 10.1177/1729881417734458.
38. Wingert A., Lichter M.D., Dubowsky S., Hafez M., *Hyper-redundant robot manipulators actuated by optimized binary-dielectric polymers*. [In:] Smart Structures and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), Vol. 4695, 2002, 415–423, DOI: 10.1117/12.475189.

Prototype of the Arm-Z Modular Hyper-Redundant Manipulator

Abstract: Arm-Z is a concept of a robotic manipulator comprised of linearly joined congruent modules with possibility of relative twist (1 DOF). The advantages of Arm-Z are: economization (mass-production) and robustness (modules which failed can be replaced, also if some fail the system can perform certain tasks). Non-intuitive and difficult control are the disadvantages of Arm-Z. In other words, the combination of non-trivial module shape with forming of practical modular structures and their control (from state A to B) is computationally expensive. However, due to availability of modern computational power, proposed here approach is rational and competitive, especially considering the high cost and sensitivity of non-standard solutions. This paper outlines the general concept of Arm-Z manipulator and presents preliminary work towards making a proof-of-the-concept prototype.

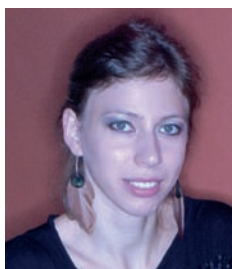
Keywords: modular system, Arm-Z, overall shape control, robustness

mgr inż. Ela Zawidzka

zawidzka@ippt.pan.pl

ORCID: 0000-0003-1243-9355

Od 10/2020 szkoła doktorska Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk. Temat badań: Metody sterowania hiperredundantnym modularnym manipulatorem. W latach 2009–2013 studium doktoranckie na Wydziale Inżynierii Materiałowej, Politechnika Warszawska. Temat badań: Stopy o wysokiej entropii. W latach 2003–2008 studia magisterskie na Wydziale Inżynierii Materiałowej PW. Temat pracy: Wytwarzanie i charakterystyka stopów z układu Ni-Zr-Ti z dodatkiem Ag, B, Cu lub Nb.



dr hab. inż. Machi Zawidzki

zawidzki@MIT.edu

ORCID: 0000-0001-8695-4400

Od 10/2022 kierownik ZBI – Dział Wsparcia Badań Aplikacyjnych w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP. Od 2/2017 adiunkt w Zakładzie Technologii Inteligentnych w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk. 7/2020 habilitacja w dziedzinie Nauk Technicznych, w dyscyplinie – Informatyka. Tytuł autoreferatu: Zastosowania metod inteligencji obliczeniowej do optymalizacji architektonicznych Systemów Ekstremalnie Modularnych. W latach 10/2007 – 09/2010 studia doktoranckie na Uniwersytecie Ritsumeikan w Japonii. Temat rozprawy: Application of Computational Intelligence to engineering design problems in Architecture – firmitatis, utilitatis, venustatis.



mgr inż. Wojciech Kiński

wojciech.kinski@piap.lukasiewicz.gov.pl

ORCID: 0000-0003-4973-7604

Specjalista ds. Szybkiego prototypowania i obliczeń numerycznych w Sieci Badawczej Łukasiewicz – PIAP. Doktorant na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie. Główne obszary naukowe to technologie przyrostowe, konstrukcja maszyn i urządzeń oraz obliczenia numeryczne.

