

Przykłady Małej Architektury w oparciu o System Arm-Z

Ela Zawadzka, Jacek Szklarski

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

Janusz Kobaka

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Instytut Geodezji i Budownictwa, ul. Michała Oczapowskiego 2, 10-719 Olsztyn

Machi Zawadzki

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

Streszczenie: Arm-Z to koncepcja hiperredundantnego manipulatora robotycznego opartego na sekwencji szeregowo połączonych identycznych modułów. Każdy moduł ma tylko jeden stopień swobody (1-DOF) – skręt względem poprzedniego. Moduły systemu Arm-Z mogą być masowo produkowane i łatwo wymieniane w przypadku awarii. Sterowanie Arm-Z jest stosunkowo trudne, dlatego zwykle wymaga stosowania metod inteligencji obliczeniowej. W artykule przedstawiono kilka koncepcji kinetycznych obiektów małej architektury opartych na Arm-Z: spiralną kolumnę o regulowanej wysokości, system nadążania słonecznego, kinetyczną rzeźbę bioniczną i kinetyczny zraszacz/fontannę. Prezentowane koncepcje są zasadniczo nisko-technologiczne (“low-tech”). W każdym przypadku moduł bazowy jest przymocowany do podstawy (podłoża). Dla prostoty napęd jest przykładany bezpośrednio do pierwszego modułu, a następnie przenoszony za pomocą wewnętrznych przekładni na kolejne moduły. Każdy moduł jest wyposażony w zestaw cylindrycznych i stożkowych kół zębatych z zębami prostymi o profilu spiralnym (do połączeń między modułami).

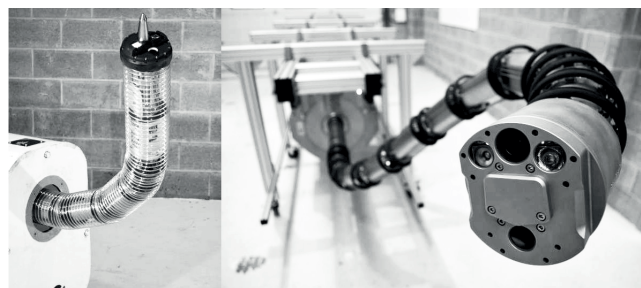
Słowa kluczowe: systemy modułowe, Arm-Z, manipulator, hiperredundancja, mała architektura

1. Wprowadzenie

Jak przedstawiono w [1], za pomocą względnie prostych przystających modułów można tworzyć skomplikowane trójwymiarowe kształty rurowe. Analogiczny system parametrycznego projektowania do tworzenia trójwymiarowych węzłów matematycznych, składających się tylko z jednego typu modułu został przedstawiony w [2]. Arm-Z to zrobotyzowany manipulator oparty na tej samej koncepcji, która została przedstawiona w [3].

Biologiczne węże są niezwykle dobrze przystosowane do różnych rodzajów środowiska. Wynika to głównie z wysokiej redundancji “mechanizmu węża”. W przypadkach nieregularnych środowisk roboty inspirowane biologią przewyższają tradycyjne roboty wyposażone w koła, nogi lub gąsienice. Badania nad robotami wężopodobnymi prowadzone są od kilku dekad. Ten rodzaj lokomocji był badany już w latach czterdziestych

dwudziestego wieku [4]. Pięćdziesiąt lat później opracowano ścisły model matematyczny tej lokomocji. Pod koniec lat dziewięćdziesiątych lokomotory i manipulatory przypominające trąbę słonia zostały wprowadzone w [5]. Ruch wężowy daje tego typu manipulatorom pewną przewagę nad konwencjonalnymi manipulatorami robotycznymi w różnych, szczególnie nieznanymi środowiskach. Tego typu manipulatory robotyczne mogą być wyposażone w różnego rodzaju głowice robocze służące np. do nadzoru, czyszczenia, spawania itp. Rysunek1 pokazuje dwa takie przykłady.



Rys. 1. Roboty z ramieniem wężowym, seria II, system X125. Po lewej: manipulator z głowicą do cięcia laserowego. Po prawej: manipulator z kamerą inspekcyjną i latarką (źródło: Oliver Crispin Robotics Ltd. www.ocrobotics.com)

Fig. 1. Oliver Crispin Robotics Ltd. Snake arm robots, series II, X125 System. On the left: sleeved and integrated manipulator with a laser cutting head. On the right: unsleeved, integrated manipulator with inspection camera and light tool (Source: <http://www.ocrobotics.com>)

Autor korespondujący:

Ela Zawadzka, zawadzka@ippt.pan.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 04.01.2024 r., przyjęty do druku 04.04.2024 r.



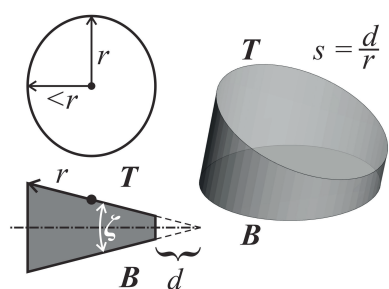
Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

Konwencjonalne manipulatory przemysłowe mają niewielką liczbę stopni swobody (DOF), zwykle sześć. Z drugiej strony, bioniczne ramiona robotyczne przypominające węża lub trąbę słonia mają dużą (nadmiarową) liczbę stopni swobody. Manipulator Arm-Z ma tyle stopni swobody, ile wynosi liczba modułów minus jeden. W związku z tym Arm-Z można sklasyfikować jako, tak zwany manipulator hiperredundantny [6]. Odwrotny problem kinematyczny typowego manipulatora przemysłowego można rozwiązać łatwo [7], dlatego jego sterowanie jest względnie proste. Z drugiej strony, ponieważ manipulatory hiperredundantne są wysoce nieliniowe, ich sterowanie nie jest bynajmniej łatwe i wymaga zastosowania technik sztucznej inteligencji [8–10]. Więcej informacji na temat tego typu manipulatorów można znaleźć w [11].

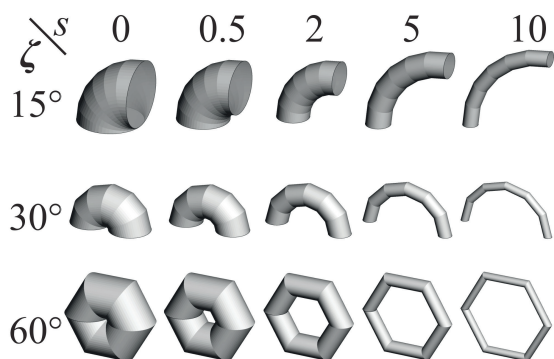
2. Koncepcja systemu Arm-Z

Arm-Z to koncepcja jednogłęziowego trójwymiarowego manipulatora rurowego 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**), co ilustruje Rys. 2.

Wygodnie jest używać dodatkowego parametru $s = d/r$, co ilustruje Rys. 3.



Rys. 2. Wizualizacja modułu Arm-Z opisywanego trzema parametrami geometrycznymi: r , d oraz ζ
 Fig. 2. Visualization of the Arm-Z module defined by three geometric parameters: r , d and ζ



Rys. 3. Przykłady prostych konfiguracji modułów dla różnych parametrów ζ i s
 Fig. 3. A table with simple sequences of modules with various angles ζ and slenderness s .

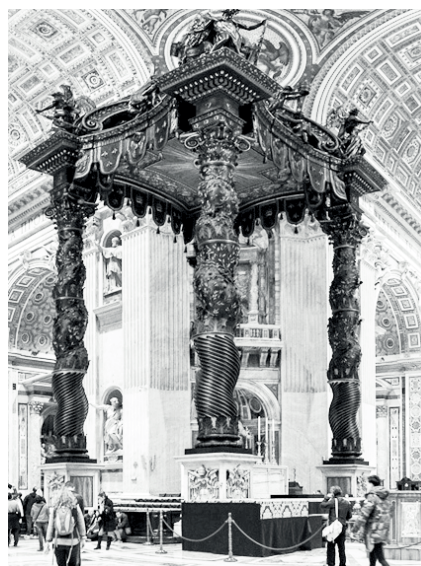
Ogólny kształt Arm-Z jest funkcją liczby modułów, parametrów geometrycznych modułu i sekwencji względnych skrętów między każdą parą modułów. Na Rys. 4 przedstawiono dwa moduły przy kolejnych skrętach od 0 do 180° w krokach co 30°.

3. Elementy Małej Architektury

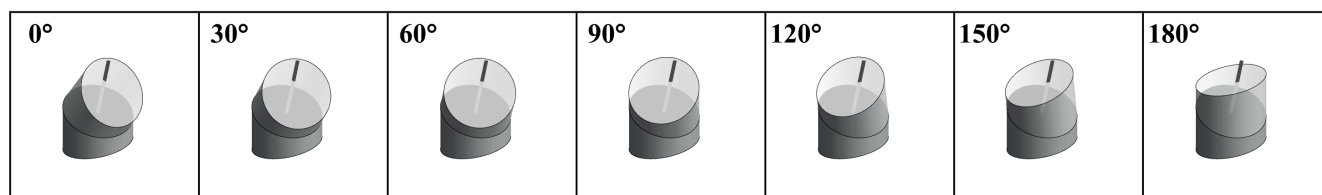
W tej sekcji przedstawiono kilka koncepcji elementów małej architektury “low-tech” opartych na systemie Arm-Z.

3.1. Spiralna kolumna o regulowanej wysokości

Słupy to wynalazek architektoniczny pozwalający na podparcie sufitów bez użycia masywnych ścian. Pierwszym zastosowaniem była pojedyncza centralna podpora dachu stosunkowo niewielkich budynków. W przypadku konstrukcji nowożytnych, wykonanych z żelbetu dzięki zastosowaniu zbrojenia można zwiększyć nośność słupów osiowo ściskanych, a więc takich, w których teoretycznie występują jedynie naprężenia ściskające, dobrze przenoszone przez beton. Wynika to ze zwiększenia odporności na wyboczenie. Co ciekawe, słupy betonowe zbrojone spiralnie mogą przenosić większe obciążenia niż zbrojone tradycyjnie. Taki rodzaj zbrojenia jest szczególnie korzystny na obszarach aktywnych sejsmicznie [12]. Ponadto tak zbrojone słupy prefabrykowane są potencjalnie bardziej ekonomiczne [13]. Plastycznie opracowany słup, podzielony na części składowe: bazę, trzon i głowicę pełni ponadto funkcję dekoracyjną i zwany jest odtąd kolumną. Takie właśnie kolumny – z funkcją estetyczną, czyli wykraczającą poza zwykle wsparcie konstrukcyjne, pojawiły się w epoce brązu (3000–1000 p.n.e.) w Minos, Asyrii i Egipcie. Tzw. ”kolumna Salomona“ ma formę spiralnie skręconą. Prawdopodobnie najbardziej znanymi przykładami są wielkie brązowe kolumny kompozytowe podpierające baldachim w Bazylice Świętego Piotra autorstwa Gian Lorenzo Berniniego (Rys. 5).



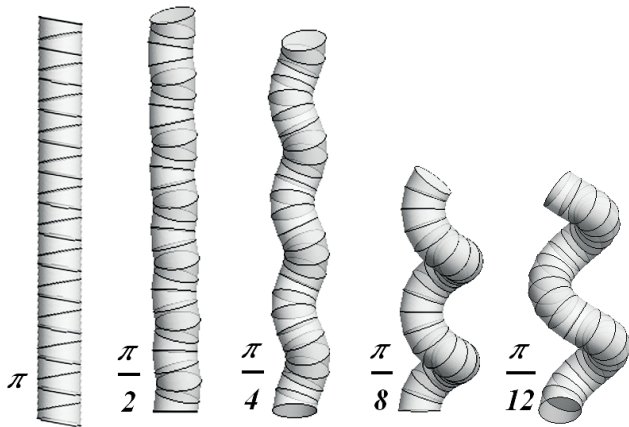
Rys. 5. Historyczny przykład kolumn spiralnych: Baldachim w Bazylice św. Piotra (G. Bernini 1634 r.)
 Fig. 5. Historical example of spiral columns: Bernini's Baldachin in St. Peter's Basilica (A.D. 1634)



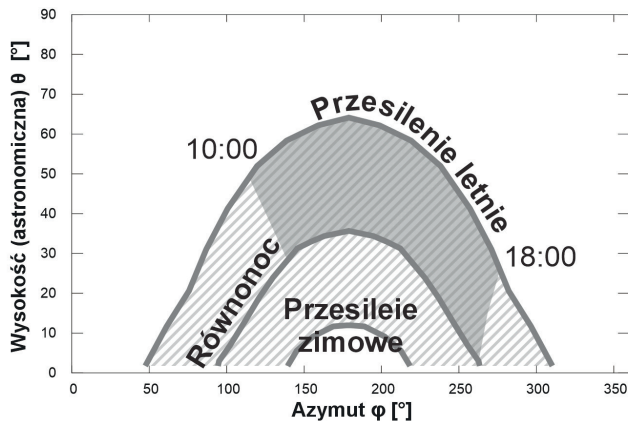
Rys. 4. Dolny moduł jest przymocowany do podstawy i nie obraca się. Oś obrotu jest prostopadła do dolnej powierzchni górnego modułu
 Fig. 4. The bottom module is fixed to the base and does not rotate. The axis of rotation is perpendicular to the bottom face of the top module.

Na Rys. 6 pokazano koncepcję kinetycznej kolumny spiralnej Arm-Z: od prostej rury do silnie skróconej spirali, co osiągnięto przez zwiększanie względnego skrętu między każdą parą modułów.

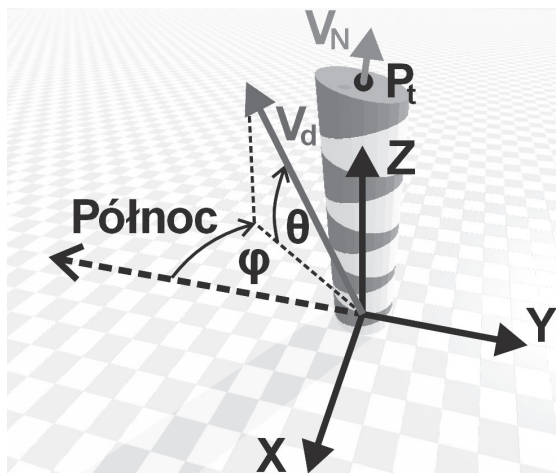
Ponieważ względny kąt obrotu dla każdego modułu jest taki sam, system wymaga tylko najprostszego sterowania



Rys. 6. Pięć przykładów kinetycznych kolumn spiralnych Arm-Z sterowanych przez względny skręt (taki sam dla każdego modułu, wartości kątów są pokazane dla każdego przypadku)
 Fig. 6. Five examples of Arm-Z kinetic spiral columns controlled by relative twists (same for each unit, the values are shown for each case)



Rys. 7. Pozycje Słońca w ciągu roku. Kolorem szarym zaznaczono rozważane okresy śledzenia
 Fig. 7. The Sun positions during a year. Gray hatch indicates the considered tracking periods



Rys. 8. Układ współrzędnych, nazewnictwo i parametry optymalizacji sterowania Arm-Z trackerem
 Fig. 8. The coordinate system, nomenclature and controlling parameters of the Arm-Z

(wł./wył.). System taki można stosunkowo łatwo zrealizować przez bezpośredni napęd skrętny na pierwszy moduł oraz przenoszenie napędu na każdy kolejny moduł za pomocą prostej wewnętrznej przekładni.

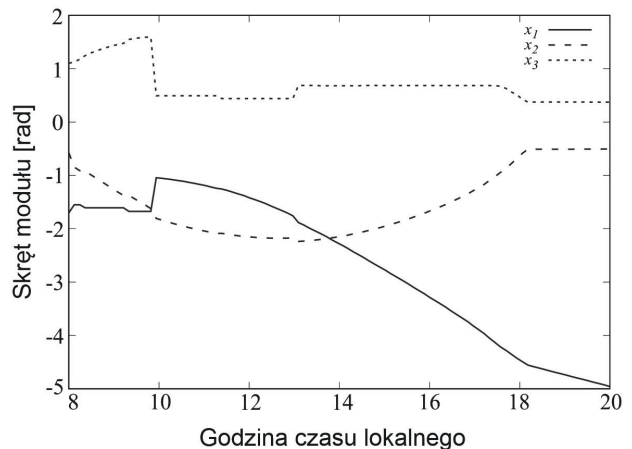
3.2. System nadążania słonecznego

Prototyp modułowego systemu nadążania słonecznego (ang. solar tracker) w oparciu o Arm-Z został opisany w naszym poprzednim artykule [14]. Celem takiego urządzenia jest efektywne zbieranie energii słonecznej lub jako aktywna osłona przeciwsłoneczna. Na Rys. 7 pokazano kierunek Słońca, za którym podąża Arm-Z tracker w okresie letnim, od przesilenia do równonocy jesiennej, w godzinach od 10:00 do 18:00.

Pozycjonowanie Arm-Z w przestrzeni oraz ilustracja parametrów śledzenia są pokazane na Rys. 8. V_d to kierunek padania promieni słonecznych, V_N to wektor skierowany od końcówki Arm-Z, P_t to pozycja tejże końcówki, $V_d(\varphi, \theta)$ jest funkcją kąta azymutu φ i wysokości astronomicznej θ .

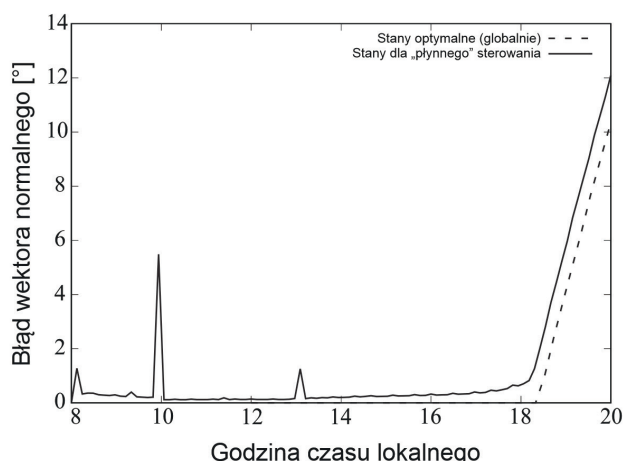
Śledzenie Słońca jest tutaj sformułowane jako minimalizacja kąta między wektorami V_N i V_d . Rozwiązanie tego problemu przy użyciu metody podwójnego wyżarzania [15, 16] zostało zaproponowane w [14]. Autorzy wykazali tam, że Arm-Z z tylko czterema modułami (trzy skrętne i jeden przymocowany do podstawy) jest w stanie ustawić swoją końcówkę w prawie wszystkich wymaganych kierunkach.

W celu przeprowadzenia realistycznych symulacji, manipulator został zaimplementowany w pakiecie Bullet Physics SDK [17]. Jest to szeroko stosowane narzędzie do wykrywania kolizji w czasie rzeczywistym i symulacji fizycznych dla wirtualnej rzeczywistości (VR), robotyki, uczenia maszynowego itp. W celu sterowania manipulatorem, dynamika odwrotna została rozwiązana za pomocą dwóch metod numerycznych: klasycznego rekurencyjnego algorytmu Newtona-Eulera (RNEA) [18] oraz za pomocą podwójnego wyżarzania [15, 16]. Jak się okazało, ta druga metoda działała lepiej (pod względem średnich błędów) niż RNEA. Wyłuczeniem może być fakt, że system jest wysoce nieliniowy i nawet niewielkie zmiany w położeniu modułów przy podstawie mogą głęboko wpłynąć na położenie końcówki. W celu płynnego sterowania manipulatorem, prędkości i kierunki skrętów trzech modułów zostały zoptymalizowane metodą podwójnego wyżarzania w sposób, w którym znaczne odchylenia od bieżącego stanu zostały "ukarane". Umożliwiło to osiągnięcie dość płynnego ruchu manipulatora. Wyniki (prędkości kątowe poszczególnych modułów) pokazano na Rys. 9.



Rys. 9. Względne obroty trzech modułów skrętnych: x_1, x_2, x_3 dla 4-jednostkowego Arm-Z podążającego za Słońcem 1 lipca między 8:00 a 20:00
 Fig. 9. The relative rotations of the three twisting modules: x_1, x_2, x_3 for a 4-unit Arm-Z following the Sun on July 1st between 8:00 and 20:00

Na Rys. 10 przedstawiono błędy kątowe w tym samym okresie śledzenia Słońca, co na Rys. 9.



Rys. 10. Błędy, czyli różnice między wektorem V_N a pożądanym kierunkiem V_d dla globalnie optymalnych stanów i dla „gładkiego” scenariusza działania

Fig. 10. The errors, that is the differences between vector V_N and desired direction V_d for globally optimal states and for „smooth” action scenario

W artykule [14] zaprezentowano prototyp takiego systemu nadążania słonecznego w prostej technologii „low-tech” Arm-Z. Został on wyposażony w przekładnie pozwalające na przełączanie obrotów każdej jednostki (lewo/prawo) wokół własnej osi i przekazywanie obrotów do następnej jednostki. Przekładnia została wyposażona w tzw. przełącznik rewersyjny. Specjalny przełącznik dźwigniowy prawo/lewo został umieszczony z boku każdej jednostki (Rys. 11).

Ciekawe byłoby również zainstalowanie na końcówce Arm-Z trackera większego elementu zbierającego energię słoneczną i/lub zaciemniającego, jak pokazano na Rys.12.



Rys. 11. Po lewej: zdjęcie wstępnego 4-modułowego Arm-Z. Po prawej: komputerowy model 4-modułowego trackera słonecznego Arm-Z

Fig. 11. On the left: a photograph of preliminary 4-module Arm-Z. On the right: a computer model of a 4-module Arm-Z solar tracker

W przypadku większych takich elementów można również zsynchronizować więcej manipulatorów Arm-Z, jak pokazano na tym samym rysunku.

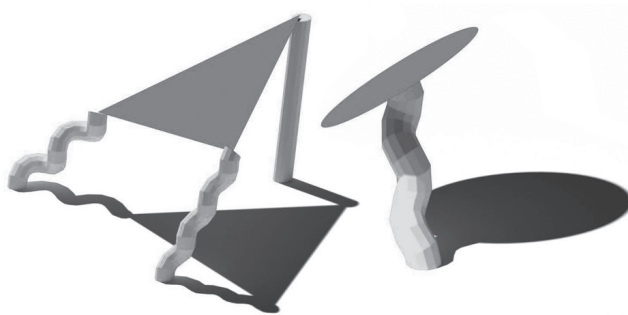
3.3. Kinetyczna rzeźba bioniczna

Arm-Z z kilkunastoma modułami może wykonywać biomiczny ruch przypominający ruch wodorostów pod wodą lub „robaków”. Na Rys. 13 przedstawiono wybrane kroki czasowe losowego ruchu 12-modułowego Arm-Z.

Interaktywną demonstrację tego ruchu Arm-Z można znaleźć w [19]. Koncepcja ta wymagałaby jednak albo współzależnej kontroli każdego modułu, albo losowego (do pewnego stopnia) obrotu względnego każdego modułu. Obecnie każdy przypadek wydaje się sporym wyzwaniem technologicznym.

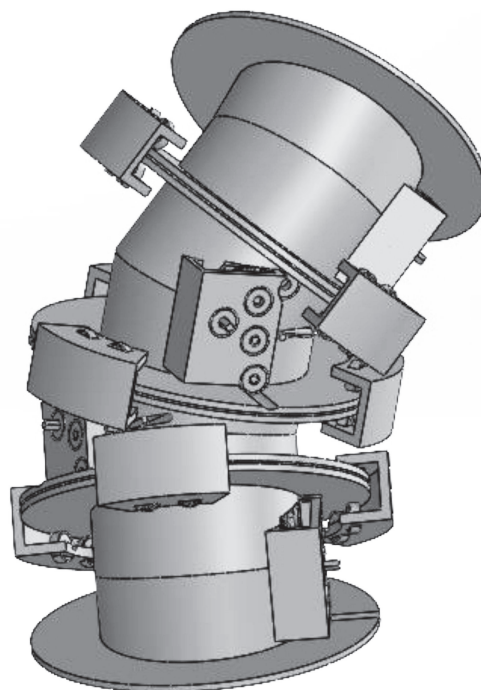
3.4. Kinetyczny zraszacz/fontanna

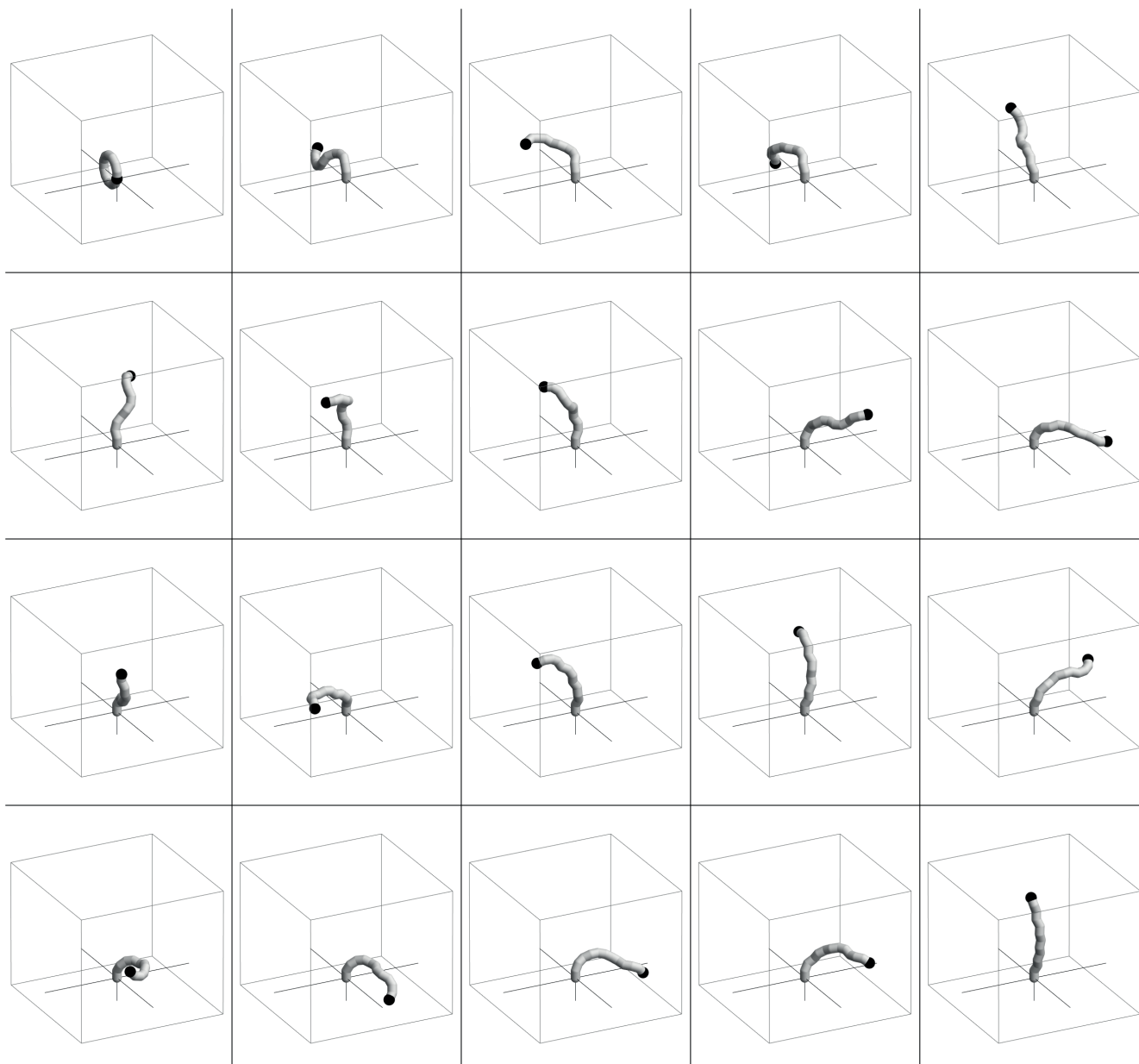
W trakcie prac nad Arm-Z, jednym z rozwiązań budowy prototypu było umieszczenie układu napędowo-przekładniowego przy zewnętrznej części obudowy i pozostawienie środka modułu pustego, jak pokazano na Rys. 14.



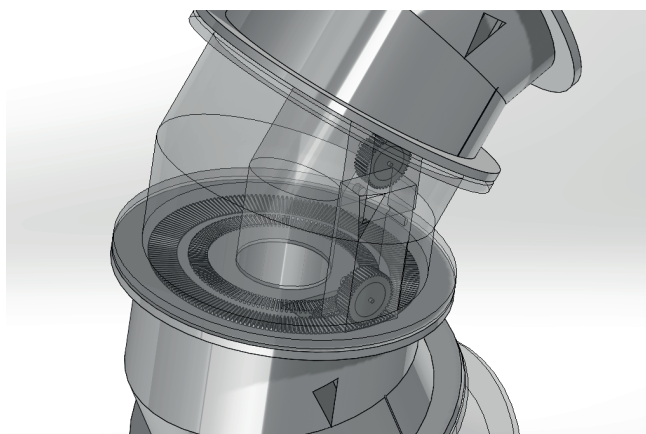
Rys. 12. Po lewej: membrana rozciągnięta między trzema zsynchronizowanymi Arm-Z. Po prawej: pojedynczy Arm-Z z większym elementem zaciemniającym lub fotowoltaicznym

Fig. 12. On the left: a single Arm-Z with larger shading/PV element. On the right a canopy stretched between three synchronized Arm-Zs





Rys. 13. 12-modułowy “robak” Arm-Z w losowym ruchu
Fig. 13. A 12-module Arm-Z „worm” in a random movement



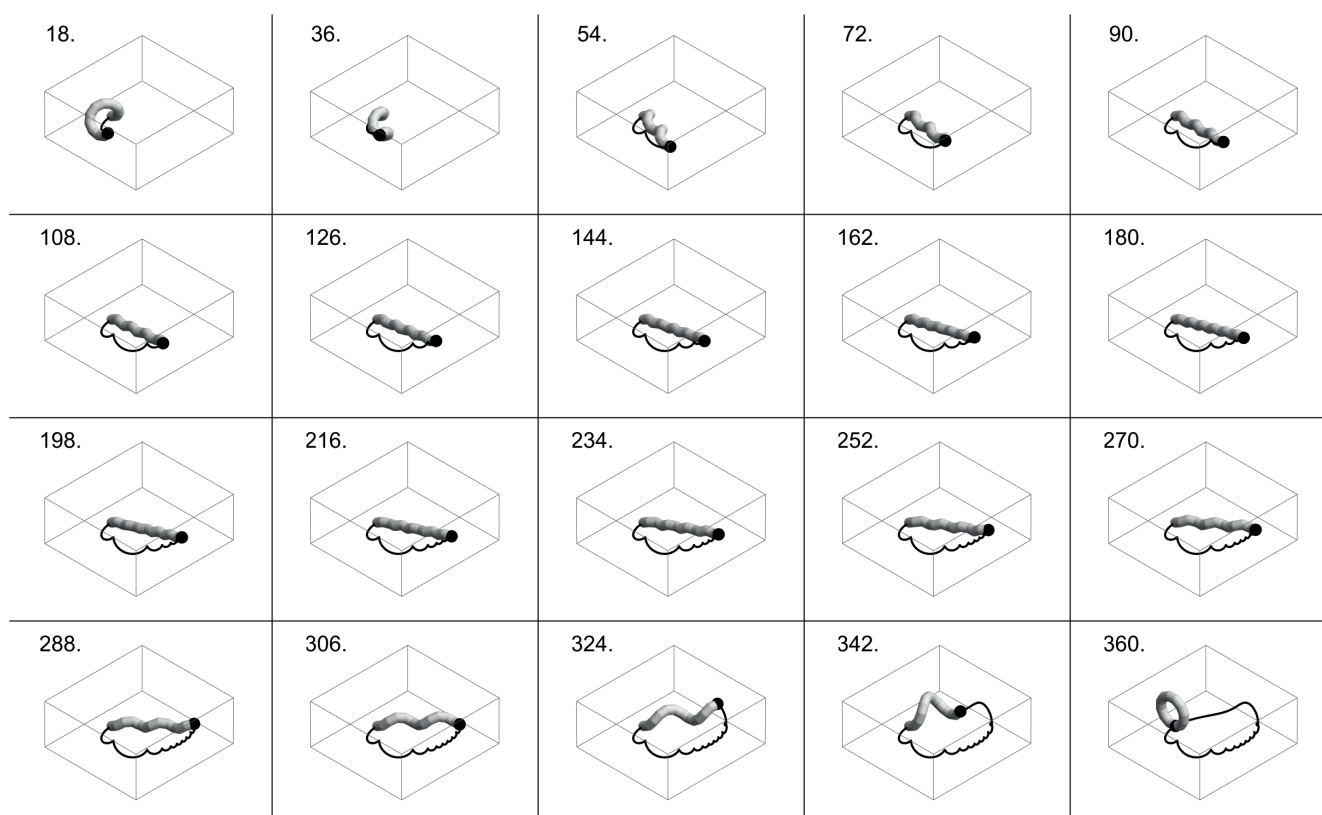
Rys. 14. Pusta przestrzeń wewnątrz każdego modułu tego typu Arm-Z pozwala na zainstalowanie przewodu doprowadzającego np. płyny, w tym wodę
Fig. 14. Hollow space inside each module of this type of Arm-Z module allows for installing a water-pipe

Zrasczac Arm-Z może działać jako proste urządzenie nawadniające wykonujące ruch okrężny, albo może wykonywać ciekawy ruch “budzącego się do życia” organizmu, czyli odwijania/zwijania, jak pokazano na Rys. 15.

Jest to szczególnie ciekawy przypadek, ponieważ jest on również stosunkowo prosty do wykonania. Z konfiguracji torusa, w której początkowo każdy kolejny moduł znajduje się pod kątem 0° względem poprzedniego, wszystkie moduły po prostu wykonują jednoczesny obrót względny o 360° , a cała struktura powraca do początkowego stanu torycznego.

4. Podsumowanie

- Arm-Z jest zasadniczo bardzo prostym systemem, jednak może wykonywać interesujące ruchy/zachowania w przestrzeni.
- Właściwości te można wykorzystać w przypadku obiektów małej architektury również w nisko-zaawansowanej, a przez to taniej, technologii “low-tech”.



Rys. 15. Wybrane stop-klatki „odwijania” 12-modułowego Arm-Z z torusa w prostą rurę i z powrotem do torusa. Względny skręt każdego modułu jest taki sam, a wartość w stopniach jest pokazana dla każdej stop-klatki. Ślad końcówki Arm-Z jest pokazany jako czarna linia
 Fig. 15. Selected time-steps of „unwinding” of a 12-module Arm-Z from torus into a straight pipe and back to torus. The relative twist is the same for each module and the value in degrees is shown for each frame. The trace of the tip of Arm-Z is shown as a black line

- W artykule zaprezentowano cztery rodzaje takich niebańnych obiektów.
- Prototypy fizyczne są obecnie w trakcie opracowywania i realizacji. Opracowanie funkcjonalnych prototypów o poziomie gotowości technologicznej (TRL) 5-6, czyli umożliwiających testy w środowisku symulującym bądź zbliżonym do rzeczywistych pozwolą na przeprowadzenie konkretnych rozmów z krajowymi producentami maszyn i urządzeń dla przemysłu i usług.
- Planowane i będące w trakcie opracowywania prototypy będą częścią oferty dla obszaru Automatykacji w Budownictwie Sieci Badawczej Łukasiewicz – Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów PIAP.

Podziękowania

Opisane tu badania stanowią część projektu „Arm-Z: ekstremalnie modułarny 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. Fuhs W., Stachel H., *Circular pipe-connections*. “Computers & Graphics”, Vol. 12, No. 1, 1988, 53–57, DOI: 10.1016/0097-8493(88)90007-6.
2. Zawidzki M., Nishinari K., *Modular pipe-z system for threedimensional knots*. “Journal of Geometry and Graphics”, Vol. 17, No. 1, 2013, 81–87.
3. 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.
4. 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.
5. Hirose S., *Biologically Inspired Robots: Snake-Like Locomotors and Manipulators*. Oxford University Press, 1993.
6. 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.
7. Murray R.M., Li Z., Sastry S.S., *A mathematical introduction to robotic manipulation*. CRC press, 1994.
8. 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.
9. Melingui A., Escande C., Benoudjit N., Merzouki R., Mbeye 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.
10. 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.
11. 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.

12. Yin S.Y.-L., Wang J.-C., Wang P.-H., *Development of multi-spiral confinements in rectangular columns for construction automation*. “Journal of the Chinese Institute of Engineers”, Vol. 35, No. 3, 2012, 309–320, DOI: 0.1080/02533839.2012.655528.
13. Havlásek P., Jirásek M., Bittnar Z., *Modeling of precast columns with innovative multi-spiral reinforcement*. Proceedings of the *fib* Symposium 2019, 2301–2307.
14. Zawidzka E., Szklarski J., Kiński W., Zawidzki M., *Prototype of the Arm-Z Modular Solar Tracker*. [In:] Conference on Automation, Springer, 2022, 273–282, DOI: 10.1007/978-3-031-03502-9_28.
15. Xiang Y., Sun D.Y., Fan W., Gong X.G., *Generalized simulated annealing algorithm and its application to the Thomson model*. “Physics Letters A”, Vol. 233, No. 3, 1997, 216–220, DOI: 10.1016/S0375-9601(97)00474-X.
16. Virtanen P., et al., *SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python*. “Nature Methods”, Vol. 17, 2020, 261–272, DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.
17. Coumans E., Bai Y., *Pybullet, a python module for physics simulation for games, robotics and machine learning*. <http://pybullet.org>, 2016–2021.
18. Luh J.Y.S., Walker M.W., Paul R.P.C., *On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators*. “Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control”, Vol. 102, No. 2, 1980, 69–76, DOI: 10.1115/1.3149599.
19. Zawidzki M., *Arm-Z Manipulations*, 2014. URL <http://demonstrations.wolfram.com/ArmManipulations/>. An interactive demonstration

Examples of Urban Furniture Based on Arm-Z System

Abstract: Arm-Z is a conceptual hyperredundant robotic manipulator composed on linearly joined number of identical modules. Each of them has one-degree-of-freedom (1-DOF) - the relative twist. Since modules are congruent, Arm-Z presents potential economical advantages and enhanced robustness. The modules can be mass produced and easily replaceable. The control of Arm-Z, however, is difficult and not intuitive. Therefore it most often requires the use of computational intelligence techniques. This article presents selected concepts for kinetic street furniture based on Arm-Z: a helical column of adjustable height, a sun tracking shade or solar energy harvesting device, bio-mimicing sculpture, sprinkler or fountain. All these ideas are based on low-tech approach. For this purpose, the initial unit in the chain is fixed to the solid foundation. For simplicity, the drive is applied directly to the first unit and transferred by the means of internal gears to the following modules. All of them are equipped with a set of cylindrical and bevel gears with straight teeth with involute profile (for connecting the modules).

Keywords: modular systems, Arm-Z, manipulator, hyper-redundancy, small architecture

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 modułarnym 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@piap.lukasiewicz.gov.pl

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 Modułarnych. 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.

**dr Jacek Szklarski**

jszklar@ippt.pan.pl

ORCID: 0000-0003-1541-9878

Kierownik Pracowni Systemów Inteligentnych w IPPT PAN. Doktorat w dziedzinie nauk fizycznych uzyskał na Uniwersytecie w Poczdamie. Aktualnie jego główne obszary zainteresowań to wizja maszynowa i zastosowanie metod sztucznej inteligencji w robotyce.

**dr inż. Janusz Kobaka**

janusz.kobaka@uwm.edu.pl

ORCID: 0000-0002-3596-3187

Od 07/2021 post-doc w projekcie NCN „Wydobycie regolitu na powierzchni Księżyca w warunkach obniżonej grawitacji”. 03.2021–05.2021 adiunkt na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie. 10.2018–02.2021 adiunkt na Politechnice Koszalińskiej. 10.2007–09.2018 kierownik Laboratorium Techniki Budowlanej Politechniki Koszalińskiej. 03.2004–09.2007 specjalista inżynierjno-techniczny w Laboratorium Techniki Budowlanej PK..

