

**I Krajowa Konferencja Naukowa**  
**Szybkie prototypowanie**  
**Modelowanie - Wytwarzanie - Pomiary**  
 Rzeszów - Pstrągowa, 16 - 18 września 2015



Organizatorzy:



CENTRUM NAUKOWO TECHNICZNE

KLASTER SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA  
RAPIDROM

## Wyzwania w projektowaniu i modelowaniu robotów modułowych na przykładzie cybernetycznych komórek ArtCell

### Challenges in MSR Robots Design and Numerical Modeling Based On “ArtCell” – Cybernetic Cell Example

MICHAŁ MAŃKA<sup>1\*</sup>  
 MARIUSZ GIERGIEL<sup>1</sup>  
 JACEK FECZKO<sup>1</sup>  
 PAWEŁ KRÓL<sup>1</sup>  
 ANDRZEJ PIETRZYK<sup>2</sup>

DOI:10.17814/mechanik.2015.12.570

W prezentowanym artykule przedstawione zostaną wstępne wyniki projektu dotyczącego Cybernetycznej Sztucznej Komórki (zwanej dalej ArtCell - ang. Cybernetic Artificial Cell) oraz powstały na jej podstawie model koncepcyjny robota modułowego. Prezentowane modele stworzone w środowisku LMS Virtual.Lab Motion (VLM) obrazują zasadę działania oraz budowę zarówno pojedynczych komórek jak również całego systemu. Środowisko VLM pozwala na zamodelowanie i połączenie pojedynczych komórek w złożony system przy pomocy złączy zarówno kinematycznych jak i dynamicznych, które mogą być w dowolnym momencie aktywowane i dezaktywowane co pozwoli na dynamiczną zmianę struktury robota w trakcie symulacji.

**SŁOWA KLUCZOWE:** roboty modułowe, symulacja co-symulacja, modelowanie, wirtualne prototypowanie

*In the paper results of initial work on the project of Cybernetic Artificial Cell (ArtCell) is presented including presentation of the conceptual models created in LMS Virtual.Lab Motion (VLM) environment. Presented numerical models describe concept of behavior of single cell as well as behavior of the whole modular systems. LMS Virtual.Lab Motion environment is the unique tool for modeling of modular robots. It allows for modeling structures which may be altered during simulations by connecting and disconnecting some elements*

**KEYWORDS:** modular self-reconfigurable robots, simula-

*tion, co-simulation, modeling, virtual prototyping*

#### Wprowadzenie

Samo-rekonfigurowalne roboty modułowe (ang. Modular self-reconfigurable robots - MSR) są układami złożonymi z grupy identycznych elementów. Każdy z modułów składa się z napędu lub napędów, układu sterowania i czujników, tak iż jest zdolny do łączenia się z innymi modułami w celu realizacji zadanych operacji. Systemy złożone z grupy modułów MSR są zdolne do adaptacji do różnych warunków środowiskowych lub też zadań bez potrzeby stosowania dodatkowych narzędzi oraz bez udziału operatora.

Pierwsze prace związane z robotami MSR rozpoczęły się pod koniec lat osiemdziesiątych dwudziestego wieku jednakże ich gwałtowny rozwój rozpoczął się wraz z rozwojem systemów CAD/CAE oraz podejścia interdyscyplinarnego w projektowaniu maszyn i urządzeń [1]. Obecnie w wielu ośrodkach badawczych na świecie trwają intensywne badania nad układami tego typu [2-8] jednakże jak dotąd urządzenia te nie znalazły jeszcze zastosowania przemysłowego. Potencjalnie mogą one znaleźć zastosowanie szczególnie w przypadkach gdzie wymagane są urządzenia zdolne do szerokiej adaptacji zarówno ze względu na wykonywane zadania jak również środowisko pracy [2]. Takie wymagania stawiają między innymi przemysł kosmiczny, wydobywczy czy też roboty wykorzystywane w ratownictwie.

Wyzwania związane z opracowaniem i powstaniem robotów MSR związane są nie tylko z opracowaniem technologii niezbędnych do ich budowy ale także z opracowaniem odpowiednich metod i narzędzi do ich projektowania i wirtualnego prototypowania. W przeciwieństwie do robotów obecnej generacji, których struktura jest z góry znana i prak-

\* dr inż. Michał Mańka (mmanka@agh.edu.pl)  
 1 AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie  
 2 CyberCell Technology, Kraków

tycznie niezmienna w trakcie realizacji zadań, roboty modułowe mogą zmieniać swoją strukturę dostosowując ją do aktualnych wymagań związanych z realizowanymi zadaniami. W celu po-prawnego zamodelowania tego typu zachowania systemy CAD/CAE wykorzystywane do wirtualnego prototypowania muszą być zdolne do dynamicznego tworzenia nowych a rozłączania już istniejących złącz zgodnie z sygnałami sterującymi generowanymi przez układ sterowania. Co więcej oprogramowanie takie musi też być wyposażone w narzędzia pozwalające na zamodelowanie zaawansowanych systemów sterowania niezbędnych w tego typu systemach. W artykule przedstawione zostaną wstępne wyniki badań nad projektem cybernetycznej komórki (ang. Cybernetic Artificial Cell - ArtCell). W ramach prezentowanych prac powstały modele numeryczne zarówno pojedynczej komórki jak również prostych systemów tego typu układy opartych w środowisku LMS Virtual.Lab Motion (VLM). W kolejnych rozdziałach zostanie przedstawione to środowisko jak również sama koncepcja cybernetycznej komórki ArtCell. Końcowe rozdziały będą przedstawiały wyniki symulacji oraz kierunki dalszych prac.

### Cybernetyczna komórka ArtCell

Można wymienić trzy główne zalety samo-rekonfigurowalnych robotów modułowych w stosunku do tradycyjnych konstrukcji. ELASTYCZNOŚĆ, roboty złożone z szeregu identycznych elementów i zdolne do samodzielnej zmiany konfiguracji mogą w znacznie większym stopniu niż tradycyjne roboty adaptować się do aktualnych wymagań środowiska lub procesu. Robot modułowy lub też grupa robotów może, przykładowo, w jednej formie przemieszczać się na miejsce pracy i dopiero po dotarciu do celu przebudować się do postaci wymaganej do realizacji danego zadania. Drugą zaletą tego typu konstrukcji jest ich ODPORNOŚĆ na uszkodzenie. W przypadku tradycyjnych robotów, jeśli uszkodzeniu ulegnie jeden z członów robota to urządzenie nie może dalej poprawnie pracować lub jego funkcjonalność jest w znacznym stopniu ograniczona. W przypadku samo-rekonfigurowalnych robotów modułowych uszkodzenie jednej z komórek nie wyklucza jego dalszej pracy. W takiej sytuacji struktura robota może zostać poddana rekonfiguracji do postaci, w której uszkodzony element nie jest wykorzystywany lub też uszkodzenie nie wpływa na proces realizowany przez robota. Kolejną z potencjalnych zalet tego typu urządzeń jest ich niski KOSZT. Współczesne roboty muszą być dostosowywane do wymagań klienta i do konkretnych zastosowań, co powoduje, że ich produkcja w najlepszym razie jest produkcją małoseryjną. W przypadku robotów MSR, w większości przypadków, produkowany będzie jeden typ komórek. Spowoduje to, że wytwarzanie układów tego rodzaju będzie znacznie bardziej opłacalne a czas oczekiwania odbiorcy na gotowe urządzenie będzie znacząco zredukowany w stosunku do obecnie produkowanych struktur [2].

Postęp w dziedzinie robotyki powoduje, że znajdują one coraz szersze zastosowanie w dzisiejszym świecie. Roboty można spotkać przede wszystkim w miejscach gdzie wykonywana jest praca powtarzalna lub też nie-bezpieczna dla zdrowia i życia dla człowieka. O ile w pierwszym przypadku, robotów wykonujących pracę powtarzalną (na przykład w zakładach przy liniach montażowych), zmiana konfiguracji takiego urządzenia zwykle ogranicza się do wymiany efektora/narzędzia i w tym przypadku zasadność zastosowania robotów modułowych jest ograniczona. To w przypadku pracy w środowisku niebezpiecznym dla człowieka lub też takim, w którym warunki pracy i parametry procesu podlegają silnym zmianom, zastosowanie robotów modułowych staje się jak najbardziej zasadne. Przykładami sytuacji lub

też miejsc i procesów, w których takie roboty mogą być szczególnie przydatne są np.: roboty biorące udział w akcjach ratunkowych przeprowadzanych w zawałonych budynkach czy kopalniach. W takich przypadkach ludzie niejednokrotnie są uwięzieni w miejscach, do których dostęp jest mocno ograniczony ze względu na uszkodzenia konstrukcji. W chwili obecnej proces poszukiwania ocalałych odbywa się głównie bazując na pomocy psów ratowniczych zdolnych do wskazania miejsca gdzie osoby poszkodowane mogą się znajdować. Inną metodą jest zastosowanie czułych mikrofonów kierunkowych lub też kamer termowizyjnych zdolnych do wykrycia śladów życia osób zagrzebanych pod gruzami. Niestety wszystkie te metody są metodami powierzchniowymi i ograniczone są pod względem zasięgu/głębokości możliwego wykrycia osób poszkodowanych. Samo zlokalizowanie poszkodowanego nie oznacza, że możliwe jest jego uratowanie gdyż kolejnym problemem jest dotarcie do niego przez niejednokrotnie niestabilne gruzowisko, w którym każdy niewłaściwy ruch może prowadzić do kolejnej katastrofy. W przypadku zastosowania robota modułowego mógłby on adaptować swoją strukturę w zależności od potrzeb, poczynawszy od struktury wężopodobnej do przeciskania się poprzez wąskie przejścia, poprzez struktury zdolne do pokonywania dużych uskoków czy wspinięcia się na przeszkodę, po struktury zdolne do manipulacji obiektami w celu usunięcia przeszkód lub też zdolne do wstępnego zabezpieczenia miejsca w którym poszkodowana osoba przebywa do czasu dotarcia ekipy ratunkowej.

Inną grupą docelową jest przemysł kosmiczny. Obecnie koszt wyniesienia na orbitę okołoziemską każdego kilograma ładunku sięga od kilkuset do kilku tysięcy dolarów, co powoduje, znaczne ograniczenia w dostępności części zamiennych lub też liczby urządzeń, które mogą być wysłane w kosmos. W takim przypadku zastosowanie systemu, który mógłby być łatwo adaptowalny do różnych zadań byłoby jak najbardziej pożądane. Ponadto środowisko pracy w takim przypadku jest ekstremalnie niekorzystne nie tylko dla człowieka, ale także dla maszyn i urządzeń co powoduje, że ich awaryjność jest stosunkowo wysoka, co w połączeniu z ograniczoną dostępnością części zastępczych powoduje że problem ten jest jeszcze bardziej istotny. Poza budową manipulatorów zdolnych do pracy w przestrzeni, w przyszłości możliwe będzie również zbudowanie z pojedynczych komórek humanoidalnego Awatara zdolnego do przeprowadzania skomplikowanych operacji bez potrzeby bezpośredniego zaangażowania w to kosmonautów.

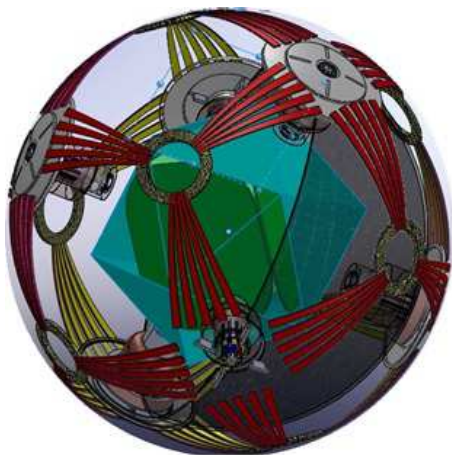
Poza tymi dwoma dziedzinami roboty modułowe mogą znaleźć także zastosowanie: w wojskowości, telekomunikacji, medycynie czy też w wielu innych dziedzinach.

Obecnie szereg, zarówno prywatnych jak i uniwersyteckich ośrodków badawczych [2-9] na świecie prowadzi prace nad systemami tego typu, co świadczy o dużym potencjale aplikacyjnym takich układów. Jednakże większość tych prac skoncentrowana jest na opracowaniu robotów modułowych zdolnych do tworzenia struktur dwuwymiarowych (2D), co znacząco ogranicza możliwość ich zastosowań [9]. Ponadto znaczna liczba obecnie opracowanych konstrukcji posiada tylko jeden stopień swobody w każdym z modułów co również znacząco wpływa na właściwości powstałego systemu.

W prezentowanym w niniejszym artykule rozwiązaniu każda z komórek będzie posiadała co najmniej kilka stopni swobody co pozwala na osiągnięcie poziomu ruchliwości niespotykanej dotąd w robotach modułowych. Pomysł cybernetycznej komórki ArtCell został opracowany i opatentowany [10,11] przez Pana Andrzeja Pietrzyka obecnie wła-

ściela i prezesa firmy CyberCell Technology zajmującej się rozwijaniem i wdrażaniem do produkcji tego rozwiązania.

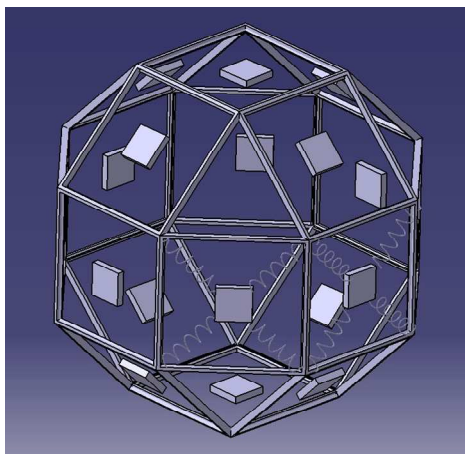
Koncepcja opracowanej cybernetycznej komórki została przedstawiona na **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania..**



Rys. 1. Koncepcja cybernetycznej komórki ArtCell

Każda z cybernetycznych komórek ma kształt kuli na powierzchni której umieszczone zostały specjalne zamki elektromechaniczne mające na celu zapewnić zarówno połączenie mechaniczne pomiędzy poszczególnymi modułami jak również przesył sygnałów sterujących i zasilania. Każdy z zamków jest umieszczony w taki sposób że możliwy jest jego ruch po powierzchni kuli. Ruch ten odbywa się poprzez zastosowanie tzw. sztucznych mięśni wykonanych z materiałów inteligentnych. Odpowiedni skurcz poszczególnych aktuatorów lub ich grup pozwoli na zmianę pozycji lub też orientacji każdego zamka a w przypadku gdy do zamka podłączony jest kolejny moduł zmianę jego położenia względnego. W ten sposób może być realizowany ruch całej struktury złożonej z komórek ArtCell bez potrzeby posiadania tradycyjnych łącz postępowych czy obrotowych.

W obecnie badanych wirtualnych prototypach powierzchnia każdej komórki ArtCell została uproszczona i zamodelowana poprzez wielobok na którego bokach znajdują się zamki wraz ze sztucznymi mięśniami. Taka konstrukcja pozwala na uproszczenie łączenia się ze sobą poszczególnych komórek i lepsze pozycjonowanie zamków, jak pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Uproszczony wirtualny prototyp komórki ArtCell w środowisku LMS Virtual.Lab Motion

Każda z komórek ArtCell posiadać będzie również moduły zasilania i sterowania. Bateria umieszczona w każdej z cybernetycznych komórek pozwoli na przeprowadzenie procesu łączenia się z innymi komórkami bez potrzeby doprowadzenia zasilania zewnętrznego. Kolejnymi elementami każdej z komórek jest moduł sterowania wraz z interfejsami komunikacyjnymi. W pierwszych prototypach nadrzędny system sterowania będzie znajdował się na niezależnym komputerze klasy PC a komendy do poszczególnych komórek będą przesyłane poprzez interfejsy komunikacyjne. W przypadku procesu łączenia się komórek w trakcie budowania lub też zmiany struktury mechanicznej będzie to komunikacja bez-przewodowa. W momencie podłączenia do już istniejącej struktury komórka ArtCell zainicjalizuje komunikację przewodową poprzez zamki a system bezprzewodowy zostanie wyłączony w celu oszczędzania energii. W kolejnych wersjach proponowanego rozwiązania przewiduje się zastąpienie jednostki nadrzędnej systemem rozproszonym złożonym z sterowników poszczególnych komórek i podłączonych ze sobą przy pomocy przewodowych systemów komunikacyjnych. Takie podejście pozwoli na uzyskanie wysokiej niezawodności systemu (brak pojedynczej jednostki centralnej która mogłaby ulec awarii) a także "inteligencji", mocy obliczeniowej struktury wraz ze wzrostem liczby podłączonych komórek.

Osobnym zagadnieniem przy opracowywaniu tego typu systemu jest budowa układu sterowania. Do głównych zadań tego układu będą zależały dwa zadania; przekształcenie modelu 3D na strukturę złożoną z cybernetycznych komórek oraz sterowanie ruchem poszczególnych komórek.

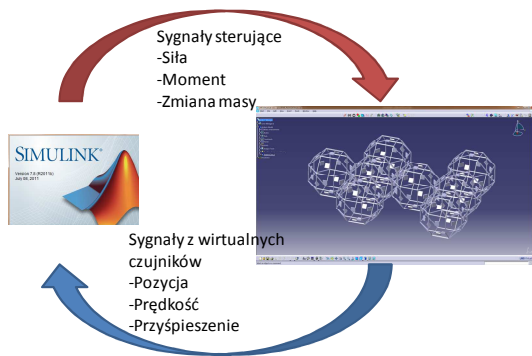
Struktura układu powstałego z komórek ArtCell może być zdefiniowana na dwa sposoby. Po pierwsze, jako źródło modelu może być wykorzystany trójwymiarowy model zapisany w postaci pliku CAD. Takie rozwiązanie pozwoli na fizyczne prototypowanie wirtualnych modeli stworzonych w środowiskach CAD. Drugim możliwym źródłem są modele 3D uzyskane przy pomocy skanerów 3D z rzeczywistych obiektów. Taka metoda pozwoli na rekonstrukcję struktury nawet w odległym miejscu, a w przypadku zastosowania techniki "motion capture" możliwe byłoby również odwzorowanie ruchu takiego układu. W obu przypadkach uzyskane modele 3D muszą podlegać procesowi dyskretyzacji, której celem jest określenie kształtu struktury zbudowanej z poszczególnych modułów.

Drugim zadaniem układu sterowania będzie sterowanie poszczególnymi komórkami ArtCell zarówno w procesie budowy modelu fizycznego jak również sterowania poszczególnymi napędami w komórkach w celu uzyskania skoordynowanego ruchu całego układu.

### Środowisko Virtual.Lab Motion

Obecnie na rynku dostępnych jest wiele różnych systemów do projektowania wirtualnego prototypowania układów mechatronicznych zaliczających się do programów typu CAD/CAE. Spośród nich na szczególną uwagę zasługują środowisko LMS Virtual.Lab Motion oferowane przez Siemens Business Group. Środowisko to jest zaawansowanym systemem do modelowania dynamiki układów mechanicznych wykorzystującym metodę brył sztywnych (ang. Multibody Dynamics). Jednakże w przeciwieństwie do większości systemów tego typu jest środowiskiem zdolnym do przeprowadzania nie tylko symulacji ale również co-symulacji. Proces co-symulacji jest to proces w którym podczas symu-

lacji złożonego układu mechatronicznego biorą udział dwa lub więcej narzędzia numeryczne. W trakcie co-symulacji w każdym kroku obliczeń następuje wymiana danych pomiędzy oboma środowiskami (Rysunek 3). W przypadku środowiska Virtual.Lab Motion proces co-symulacji może być przeprowadzony między innymi wraz ze środowiskiem Matlab/Simulink (M/S). W takim przypadku w środowisku VLM budowany jest model dynamiczny układu natomiast w środowisku M/S model układu sterowania. Takie podejście pozwala z jednej strony na zbudowanie złożonego modelu dynamiki (VLM) a z drugiej zaawansowanego układu sterowania (M/S) co pozwala na przeprowadzenie symulacji złożonego układu mechatronicznego.



Rys. 3. Proces co-symulacji na przykładzie LMS Virtual.Lab Motion i Matlab/Simulink

W każdym kroku symulacji sygnały z wirtualnych czujników umieszczonych na wirtualnym prototypie wykorzystywane są jako wejścia układu sterowania w modelu sterownika stworzonym w środowisku M/S. Następne obliczone sygnały sterujące są wysyłane jako wejścia na elementy wykonawcze układu dynamiki zamodelowanego w środowisku VLM, proces ten powtarzany jest w każdym kroku symulacji.

### Budowa modelu dynamicznego cybernetycznej komórki ArtCell

#### ■ Model pojedynczej komórki

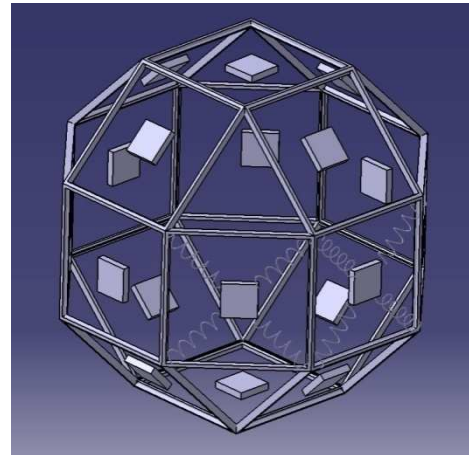
W celu przeprowadzenia symulacji funkcjonalnych koncepcji cybernetycznej komórki ArtCell został stworzony model dynamiczny w środowisku LMS Virtual.Lab Motion.

Każda z komórek składa się z 18 aktywnych ścian z zamkami elektromechanicznymi, w kształcie kwadratów (Rysunek 4). Pozostałe 8 trójkątnych ścian stanowią elementy nieaktywne. Na każdej ze ścian aktywnych zostały umieszczone zamki elektromechaniczne, których położenie jest sterowane poprzez 4 liniowe elementy sprężysto tłumiące z możliwości przyłożenia siły wymuszającej (TSDA), stanowiące modele aktuatorów wykonanych z materiałów inteligentnych np. EAP. Ruch każdego zamka odbywa się poprzez synchroniczne kurczenie się elementów TSDA. Taka konfiguracja pojedynczego modułu powoduje że posiada on aż 72 napędy co jest znaczącą liczbą w porównaniu do innych układów tego typu.

#### ■ Model grupy komórek

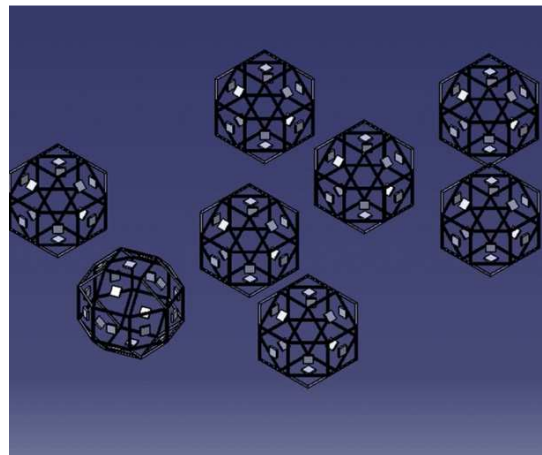
W celu przeprowadzenia symulacji działania grupy połączonych ze sobą modułów ArtCell zbudowany został model złożony z 8 modułów przedstawionych w poprzednim rozdziale. Pierwszym krokiem przygotowania symulacji było umieszczenie wszystkich komórek jako złożenia (ang. sub-

assembly) w pojedynczym modelu, jak to zostało przedstawione na rysunku 5.



Rys. 4. Model pojedynczej komórki ArtCell stworzony w środowisku LMS Virtual.Lab Motion

Następnie zdefiniowana została grawitacja oraz kontakt z podłożem (niewidocznym na wizualizacji) oraz pomiędzy poszczególnymi cybernetycznymi komórkami.



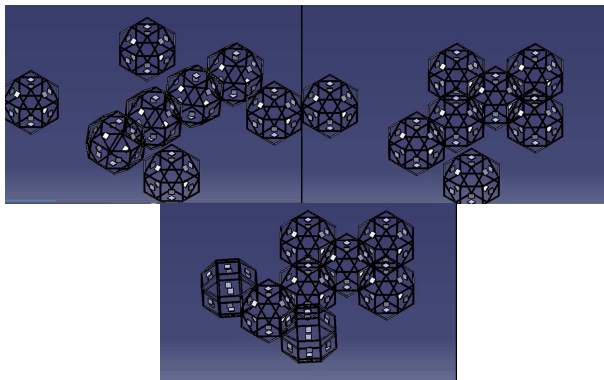
Rys. 5. Model grupy komórek ArtCell w środowisku LMS Virtual.Lab Motion

W celu zamodelowania oddziaływania elektromagnetycznego pomiędzy zamkami w momencie tworzenia połączeń tymczasowych pomiędzy poszczególnymi zamkami zostały zdefiniowane elementy siłowe (TSDA), które były aktywowane w zależności od potrzeb przez układ sterowania. Zdefiniowane oddziaływanie pomiędzy poszczególnymi zamkami jest proporcjonalne do odległości pomiędzy nimi, w momencie kontaktu następuje jego gwałtowny wzrost. Taka definicja pozwala na poprawne odwzorowanie oddziaływania siły generowanej przez elektromagnesy jak również połączenia mechanicznego pomiędzy dwoma zamkami, które odbywa się w momencie ich kontaktu.

### Proces symulacji i uzyskane wyniki

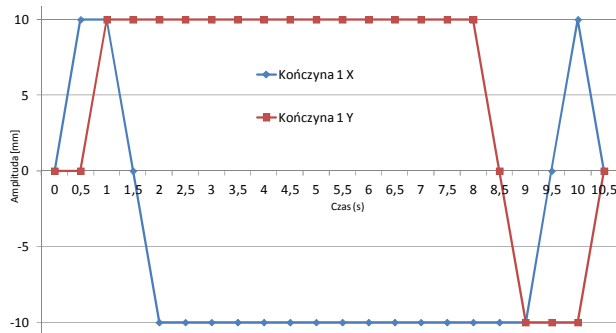
W trakcie wstępnych badań przeprowadzone zostały dwie symulacje. W pierwszej przebadano proces "składania" się robota modułowego z pojedynczych komórek ArtCell. W kolejnej przebadana została możliwość wykonywania prostych ruchów przez powstałego robota.

W trakcie pierwszej symulacji kolejne zamki były uruchamiane w celu przeprowadzenia procesu automatycznego montażu robota modułowego. Jak strukturę testową wybrano prosty model posiadający 4 kończyny złożony z 8 komórek. W trakcie procesu składania najpierw aktywowane zostały komórki mające stanowić rdzeń modelu, następnie komórki stanowiące jego kończyny, co pokazuje rysunek 6.



Rys. 6. Kolejne etapy automatycznego montażu robota modułowego

Drugą symulacją było zamodelowanie ruchu powstałego robota modułowego. Odbywało się to poprzez wygenerowanie sekwencji ruchów poszczególnych kończyn. Każda z kończyn poruszała się w dwóch osiach po trajektorii przedstawionej na rysunku 7. Wykonana sekwencja ruchu pozwoliła na przemieszczenie się robota o jeden krok.



Rys. 7. Trajektoria ruchu poszczególnych "kończyn" robota MSR

## Podsumowanie

W trakcie przedstawionych w prezentowanym artykule badań opracowana została koncepcja oraz przeprowadzone symulacje działania samo-rekonfigurowalnego robota modułowego opartego o cybernetyczne komórki ArtCell. zbudowane modele numeryczne w środowisku LMS Virtual.Lab Motion potwierdziły zarówno możliwości proponowanej koncepcji robota jak również możliwości do przeprowadzenia tego typu symulacji w prezentowanym oprogramowaniu. W ramach dalszych prac opracowany zostanie kompletny projekt cybernetycznej komórki uwzględniający wszystkie jej elementy, a następnie zostanie wykonany i przebadany symulacyjnie wirtualny prototyp takiego urządzenia.

## LITERATURA

1. Fukuda T. and Seiya N., Dynamically reconfigurable robotic system, 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1988, vol.3 p. 1581 - 1586.
2. Yim M., White P. J., Park M., and Sastra J., Modular self-reconfigurable robots, Encyclopedia of Complexity and Systems Science, Springer New York, 2009, p. 5618 - 5631.
3. A. Lyder, R. F. M. Garcia and K. Stoy, Mechanical design of odin, an extendable heterogeneous deformable modular robot, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008, p.883 - 888.
4. Byoung Kwon An, EM-Cube: Cube-Shaped, Self-reconfigurable Robots Sliding on Structure Surfaces, 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008, p.3149 - 3155.
5. S. Murata and H. Kurokawa, Self-Reconfigurable Robot: Shape-Changing Cellular Robots Can Exceed Conventional Robot Flexibility, IEEE Robotics and Automation Magazine, March 2007
6. A. Sproewitz, A. Billard, P. Dillenbourg, A.J. Ijspeert, Roombots Mechanical Design of Self-Reconfiguring Modular Robots for Adaptive Furniture, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009, p.4259 - 4264.
7. Hongxing Wei, Y. Chen, Jindong Tan and Tianmiao Wang, Sambot: A Self-Assembly Modular Robot System, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, p. 745 - 757.
8. S. G. M. Hossain, Carl A. Nelson, Prithviraj Dasgupta, Hardware Design and Testing of ModRED: A Modular Self-Reconfigurable Robot System, Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots I, 2012 Springer, p.515 - 523
9. Dewey, D. J., et al. Generalizing metamodules to simplify planning in modular robotic systems. In: Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2008. p. 1338-1345
10. Pietrzyk A., A system of three-dimensional multipurpose elements, Certificate EU 1587594, US 7 787 990, JP 4638740, Hong Kong - Register Of Patents No 06104818.6, Grant Patent, 2012.
11. ПИЕТРЗИК А., СИСТЕМА УНИВЕРСАЛЬНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, RU 2326423, 2012