

Hudziak Wojciech, inż.  
email: [hudini01@vp.pl](mailto:hudini01@vp.pl)  
Góra Marta, dr inż.  
email: [mgora@mech.pk.edu.pl](mailto:mgora@mech.pk.edu.pl)  
Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny

## MODEL CHODU ROBOTA DWUNOŻNEGO W ŚRODOWISKU MATLAB

**Streszczenie:** Opracowano model robota dwunożnego w oparciu o wzorzec biologiczny - kończyny dolnej człowieka. Na przykładzie robota dwunożnego omówiono sposób doboru struktury pojedynczego odnóża w zależności od funkcji jakie ma wykonywać. Dokonano analizy wpływu zmiany współrzędnych przegubowych na położenie stopy robota. Zbudowano model graficznych robota kroczącego w środowisku V-Realm Builder – Matlab. Przedstawiono przykłady modelowania chodu robota dwunożnego w warunkach zachowania stabilności statycznej i dynamicznej.

**Słowa kluczowe:** robot dwunożny, kinematyka, stabilność chodu, modelowanie w środowisku Matlab.

## MODEL OF BIPED ROBOT GAIT IN MATLAB ENVIROMENT

**Abstract:** Biped robot model was developed based on the biological model of human lower limb. Based on two-legged robot example, a selection method of single leg structure, depending on the functions they are to perform, is illustrated. An analysis of influence of the joint coordinates changes on the location of the robot feet. The model of walking robot in a graphical environment, the V-Realm Builder – Matlab, was built. The examples of modeling bipedal walking robot behavior under static and dynamic stability conditions.

**Keywords:** biped robot, gait stability, kinematics, modeling in Matlab.

### 1. Wprowadzenie

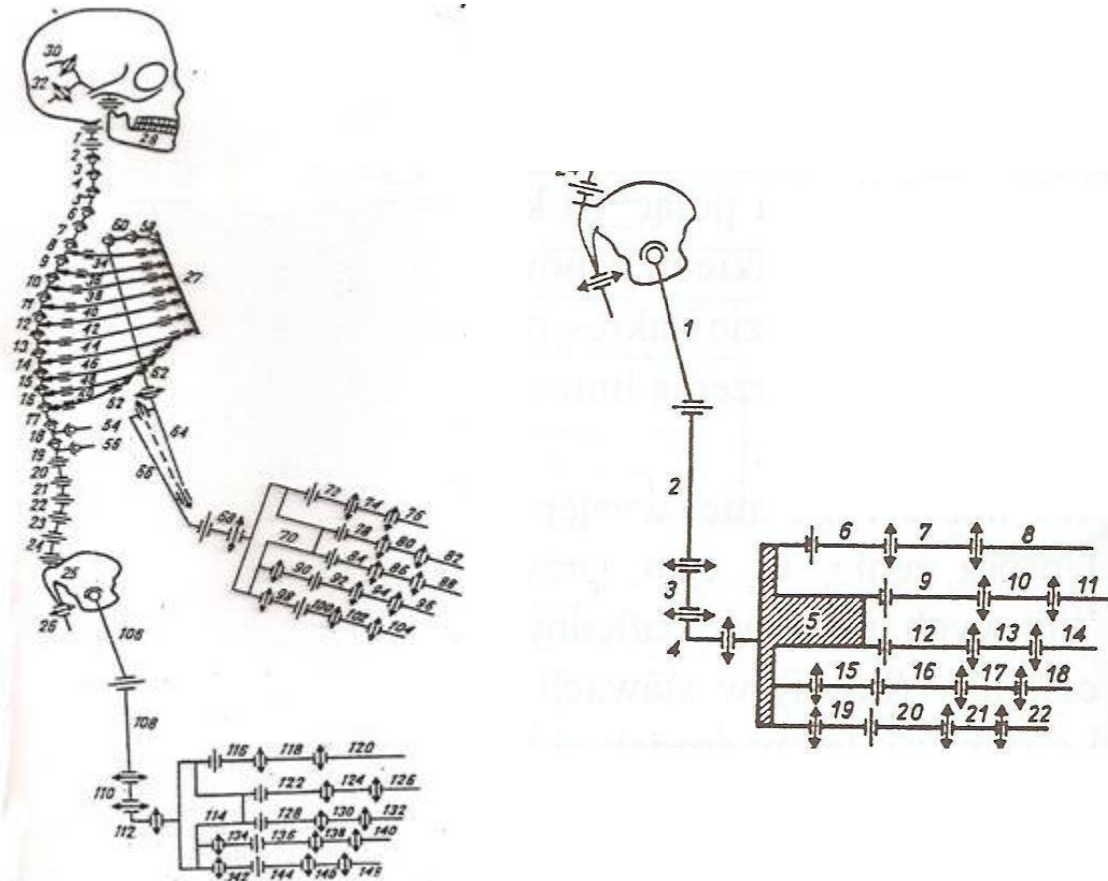
Maszyny kroczące jest to grupa robotów mobilnych, które przemieszczają się za pomocą kończyn. Roboty te konstruowane są na podstawie budowy zwierząt, które mają odzwierciedlać. Podstawowym kryterium podziału tej grupy maszyn jest liczba kończyn, w które zostały wyposażone. Roboty dwunożne, bipedy, są maszynami wzorowanymi na człowieku. Jest prężnie rozwijająca się grupa robotów o możliwie szerokim zastosowaniu, np. Petman sprawnie poruszający się humanoidalny robot przeznaczony do celów militarnych, czy ASIMO [7] który jest to uważany za najbardziej rozwinięty technicznie robot humanoidalny zaprojektowany aby służyć za pomoc codziennym życiu człowieka. Chodzenie jest podstawową formą przemieszczania się człowieka. Czynność ta wykonywana jest codziennie w sposób automatyczny przez co wydają się prosta i nieskomplikowana. W rzeczywistości jest to proces bardzo złożony i mimo wieloletnich badań się został jeszcze w pełni opisany [2]. Niektóre definicje tłumaczą chód jako proces ciągłego tracenia i odzyskiwania równowagi, tak więc największą uwagę trzeba poświęcić analizie stabilności. W robotyce ruch robotów dwunożnych realizowany jest na wzorcach biologicznych bazujących na zarejestrowanych zmianach kątów stawowych podczas chodu człowieka [6] skorygowanych na podstawie kryterium ZMP (zero moment point) opierającym się na analizie kinematycznej i dynamicznej [2, 5] modelu.

## 2. Analiza strukturalna kończyny robota

Maszyny kroczące są projektowane w oparciu o wzorce biologiczne w zależności od ilości posiadanych nóg, wyróżnia się: ośmionożne wzorowane na pajęczakach, sześćonożne na owadach, czworonożne na ssakach, zaś roboty dwunożne wzorowane na człowieku [6]. Model robota dwunożnego przedstawiony w pracy został opracowany na podstawie układu ruchowego człowieka (rys. 1) i wykorzystaniu środowiska Matlab.




Schemat strukturalny człowieka opisany jest przez następujące założenia [2]:

- członami biomechanizmu są kości wykazujące znacznie większą sztywność niż inne (np. chrząstka) i można je przyjąć za bryły sztywne,
- parami biokinematycznymi są wyłącznie stawy których ruch obrotowy jest większy niż 5 stopni w pozostałych przypadkach traktowane są jako luzy. Połączenia kości za pomocą chrząstek, więzadeł czy szwów nie są uwzględniane,
- przyjęte w biomechanizmie połączenia ruchome są tylko pary obrotowe klas III, IV, V (tab. 1),
- uwzględniono tylko te kości, które są istotne w układzie szkieletowo-ruchowym człowieka, np. nie wzięto pod uwagę kostek słuchowych ucha środkowego.



Rys. 1. Schemat strukturalny: a) szkieletu, b) kończyny dolnej człowieka [4]

**Tab. 1.** Klasyfikacja i oznaczenie stawów człowieka

Liczba stopni swobody	Klasa	Symbol graficzny
1 (ruch obrotowy)	V	
2 (ruchy obrotowe)	IV	
3 (ruchy obrotowe)	III	

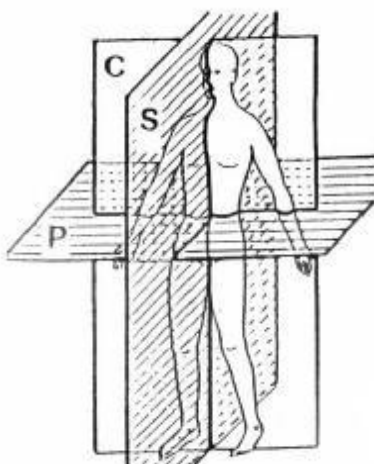
Na potrzeby modelowania chodu robota dwunożnego uwzględniono tylko odwzorowanie kończyny dolnych człowieka.

Ruchliwość kończyny dolnej człowieka po wprowadzanych uproszczeniach (rys.1b) można wyznaczyć na podstawie wzoru Kutzbacha–Grublera [2, 3], czyli zależności:

$$w = 6n - \sum_{i=0}^5 ip_i \quad (1)$$

gdzie:  $w$  – ruchliwość mechanizmu,  $n$  – liczba członów ruchomych,  $p_i$  – liczba par kinematycznych  $i$  klasy. Liczba członów ruchomych względem nieruchomej podstawy jako kości miednicy wynosi  $n = 22$ . Liczba par kinematycznych  $i$  klasy wynosi:  $p_5 = 15$ ,  $p_4 = 6$ ,  $p_3 = 1$ . Podstawiając do wzoru (1) wyznaczono ruchliwość kończyny dolnej, jako  $w = 30$ .

Do swobodnego poruszania się w 3D wystarczy 6 stopni swobody, różnica między wyznaczoną a minimalną ruchliwością wymaganą do ruchu swobodnego oznacza, że jest to układ redundantny tzn. nadmiarowy. Konstrukcja tak złożonej kończyny ( $w = 30$ ) jest możliwa, lecz wymaga to koordynacji aż 30 niezależnych napędów, dlatego opracowany model odnóża został zredukowany do 6 stopni swobody. Pozwoli to na zachowanie swobodnego poruszania się w przestrzeni i ułatwi sterowanie robotem. Struktura odnóża robota została dobrana na podstawie odniesienia do trzech płaszczyzn ruchu człowieka (rys. 2).



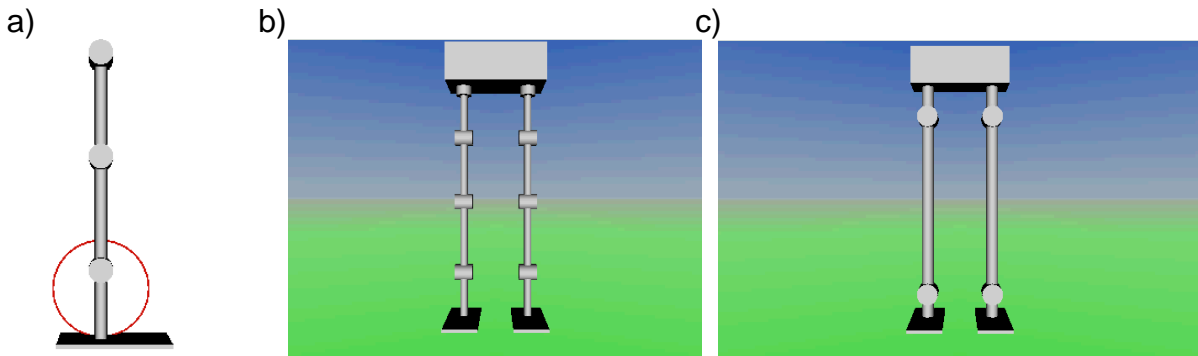
**Rys. 2.** Główne płaszczyzny: strzałkowa (S), czołowa (C) i poprzeczna (P) jako układ odniesienia dla ruchu ciała człowieka [1]

Założenia jakie spełnia konstrukcja kończyny dolnej modelu to, możliwość:

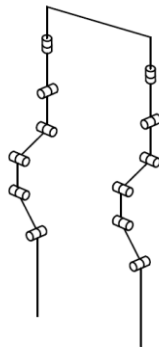
- poruszania się w płaszczyźnie strzałkowej (ruch do przodu),
- poruszania się w płaszczyźnie czołowej (ruch na boki),
- ustalenia dowolnej orientacji korpusu w płaszczyźnie poprzecznej.

Model będzie poruszał się po idealnie płaskiej powierzchni, dlatego cała stopa została zastąpiona jedną sztywną bryłą. Realizując ruch do przodu przy jednej parze obrotowej koniec nogi przemieszczałby się po łuku bez możliwości ułożenia stopy równoległe do podłoża, dlatego wprowadzenie dwóch dodatkowych par obrotowych pracujących w płaszczyźnie strzałkowej daje już pełną możliwość zmiany pozycji i orientacji nogi w danej płaszczyźnie (rys. 3a). Dobór struktury przy ruchu na boki wygląda identycznie jak przy ruchu do przodu. Trzy pary obrotowe dają pełną swobodę ruchu w płaszczyźnie czołowej ale takie rozwiązanie wykorzystало by już 6 par obrotowych, a jeszcze nie zostało zrealizowana zmiana orientacji korpusu. Ze schematu strukturalnego (rys. 1b) wynika, że tylko 2 pary kinematyczne obracają się w płaszczyźnie czołowej, pozwalając na zmianę orientacji w tej płaszczyźnie. Położenie będzie realizowane dzięki współpracy z ruchem w płaszczyźnie czołowej (rys. 3b). Pozostała jedna para kinematyczna, której zadaniem jest obracanie korpusu względem stopy, pracuje ona w płaszczyźnie poprzecznej. Opracowany model odnóża robota składa się z 6 par kinematycznych (rys. 4). W odniesieniu do schematu strukturalnego kończyny dolnej człowieka (rys. 1b) zostały odwzorowane poszczególne stawy przez:

- 3 pary obrotowe (staw biodrowy),
- 1 parę obrotową (staw kolanowy),
- 2 pary obrotowe (staw skokowy).



**Rys. 3.** Kolejne fazy projektowania odnóża robota, ruch w płaszczyźnie: a) strzałkowej, b) poprzecznej, c) czołowej

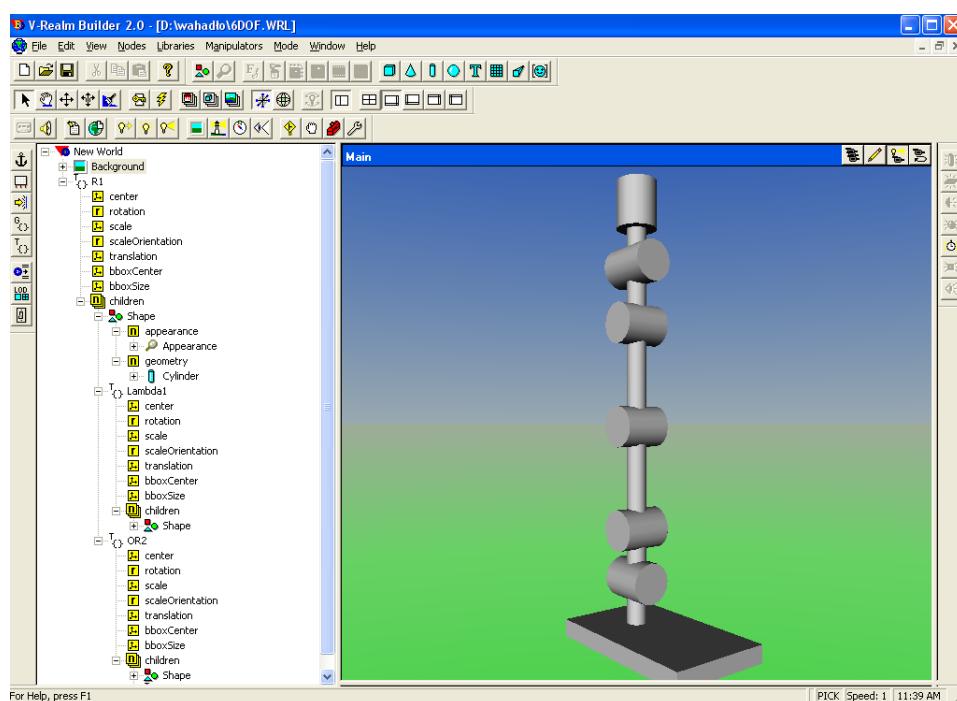


**Rys. 4.** Schemat strukturalny robota dwunożnego

Przyjmując korpus robota jako nieruchomy, otrzymano ruchliwość kończyny modelu (rys. 4) na podstawie zależności (1) jako  $w = 6$  (gdzie:  $n = 6$ ,  $p_5 = 6$ ).

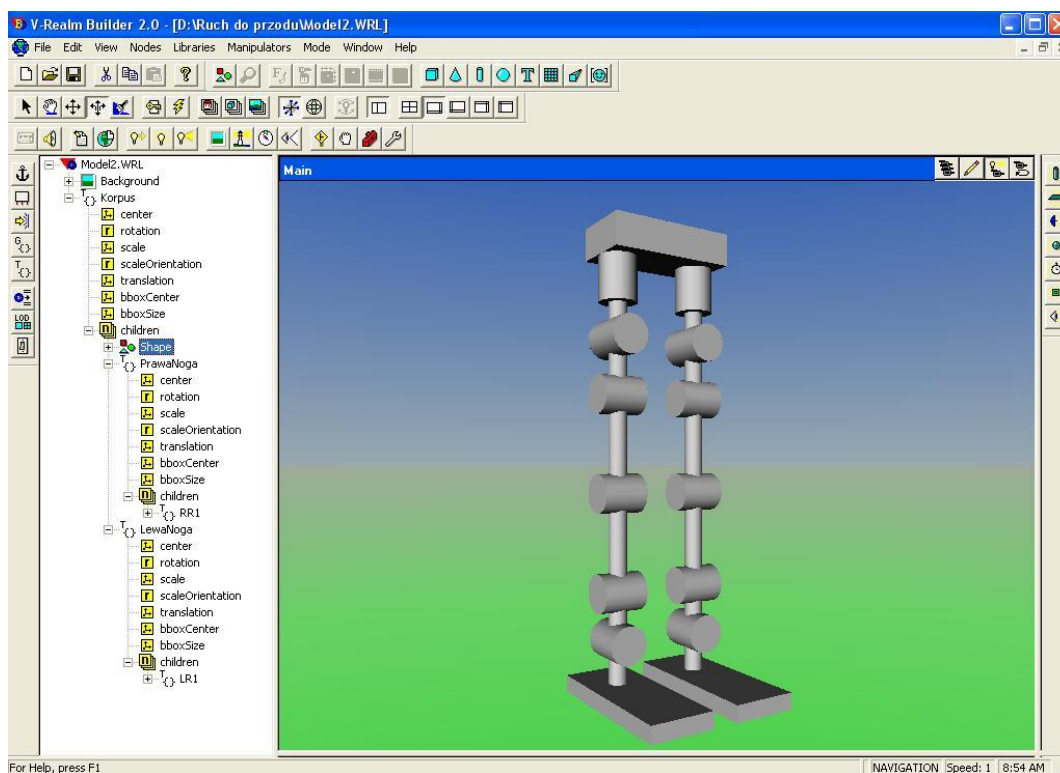
### 3. Model robota dwunożnego w aplikacji Matlab

Środowisko programistyczne Matlab jest przeznaczone do wykonywania obliczeń naukowych, wizualizacji i analizy danych oraz prowadzenia obliczeń numerycznych. Program jest interaktywny posiada dużą liczbę funkcji bibliotecznych i pozwala użytkownikowi na ich rozbudowę poprzez pisanie własnych funkcji. Program posiada swój własny język programowania ale można w nim dostrzec podobieństwo do języków programowania wysokiego poziomu takich jak C/C++, tak też podstawowa znajomość tego języka pozwoli na szybkie oswojenie się ze środowiskiem Matlab. Program posiada możliwość programowania obiektowego, pozwalającego na pisanie złożonych i uniwersalnych programów. To wszystko sprawia, że program Matlab posiada bardzo szerokie zastosowanie. Do wizualizacji modelu robota dwunożnego wybrano prosty program V-Realm Builder, który znajduje się w podstawowym pakiecie Matlab (rys. 5). Program nie jest tak intuicyjny i rozbudowany jak programy CAD ale pozwala tworzenie prostych modeli zbudowanych z podstawowych figur geometrycznych.

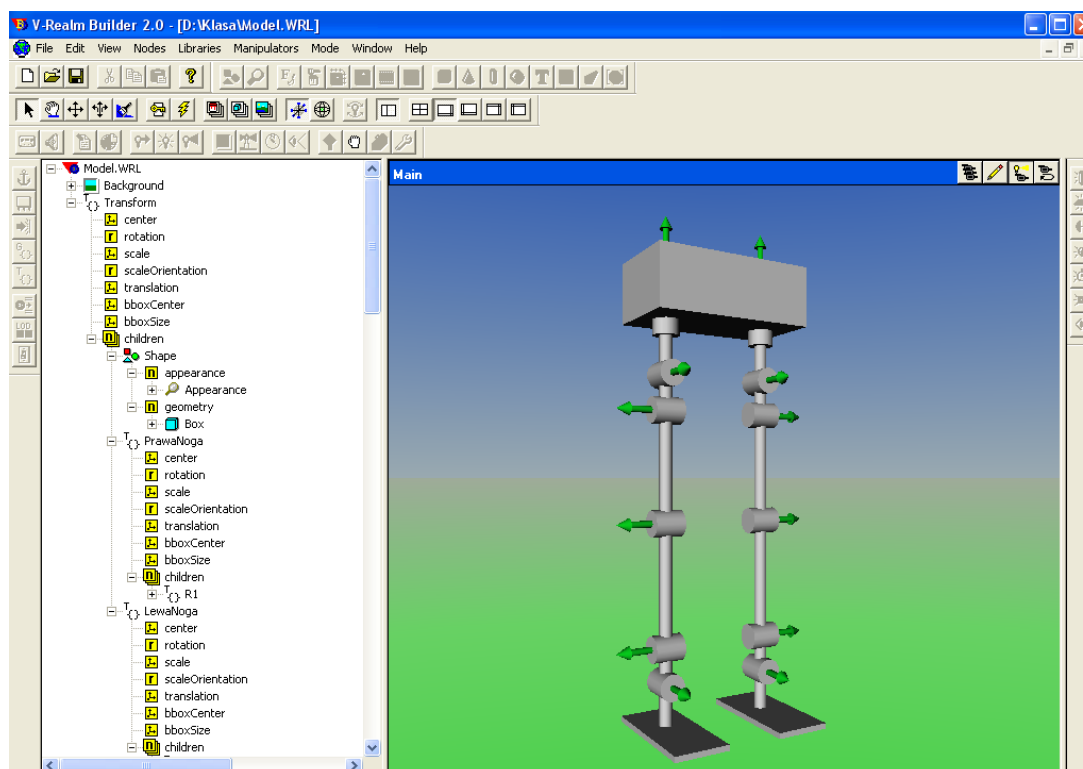


**Rys. 5.** Główne okno programu graficznego V-Realm Builder z opracowanym odnożem robota dwunożnego

W tym programie, każdy element modelu posiada szereg parametrów go opisujących, ale głównymi wartościami które będą wykorzystane w procesie tworzenia animacji są: położenie względem lokalnego układu współrzędnych (translation) oraz obrót bryły względem tego samego układu (rotation). Po wczytaniu modelu do pamięci przestrzeni roboczej Matlab operowanie tym parametrami ogranicza się zaledwie do podstawiania pod nie żądanych wartości. Zbudowany graficzny model jest prosty, składa się on jedynie z walców i trzech graniastosłupów, dobranych zgodnie ze schematem strukturalnym (rys. 6, 7). Przeguby reprezentowane są przez walce, które odwzorowują poszczególne stawy. Stopy przyjęto za płaskie bryły sztywne w modelu przedstawione jako graniastosłupy.



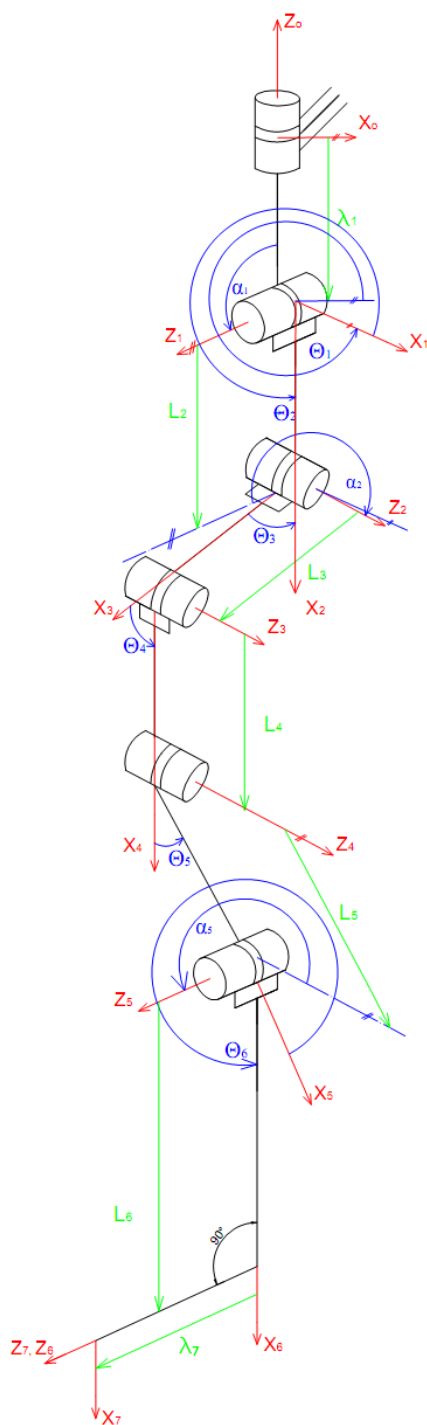
Rys. 6. Graficzny model kończyn dolnych robota połączonych korpusem



Rys. 7. Graficzny model kończyn dolnych robota połączonych korpusem z zaznaczonymi osiami obrotu

#### 4. Analiza kinematyczna kończyny robota

W celu określenia zmian położenia stopy względem korpusu, czy też względem podłoża wprowadzono współrzędne D-H i przekształcenie jednorodne [2, 3] do opisu mechanizmu. Na rys. 8 umieszczono schemat kinematyczny kończyny robota z zaznaczonymi układami współrzędnych (związane z poszczególnymi ogniwami odnóża) i kątami obrotów ( $\theta_i$  i  $\alpha_i$ ) oraz długościami członów ( $\lambda_i$ ,  $l_i$ ). W tab. 2 umieszczono współrzędne D-H mechanizmu.



Rys. 8. Schemat kinematyczny odnóża robota

**Tab. 2.** Współrzędne D-H dla modelu kinematycznego kończyny dolnej

$i$	$l_i$	$\lambda_i$	$\alpha_i$ [rad]	$\theta_i$ [rad]
1	0	const.	$\pi/2$	var
2	const.	0	$3\pi/2$	var
3	const.	0	0	var
4	const.	0	0	var
5	const.	0	$\pi/2$	var
6	const.	0	0	var
7	0	const.	0	0

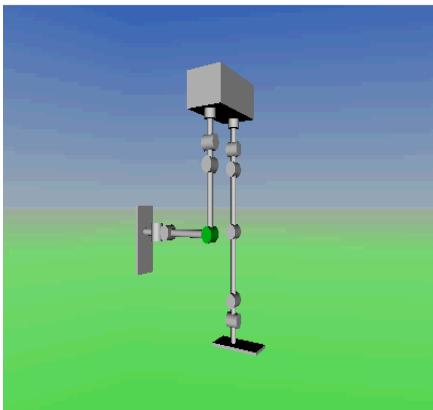
Rozwiązując zadanie proste kinematyki określono pozycję i orientację końcówki łańcucha kinematycznego względem bazowego układu współrzędnych. W przypadku robotów kroczących wynikiem jest pozycja i orientacja stopy względem korpusu robota dla określonych wartości kątowych. Otrzymano macierz  $T_{7,0} = A_1 A_2 \dots A_7$ , gdzie  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 7$ ) - macierz przekształcenia jednorodnego z układu  $i$  do  $i-1$  wykorzystująca współrzędne D-H [2, 3]. Korzystając z zadania prostego kinematyki określono wpływ współrzędnych konfiguracyjnych na zmianę pozycji i orientacji stopy robota.

Przykłady numeryczne opracowano dla przyjętych wymiarów członów umieszczonych w tab. 3. Na rys. 9a umieszczono model robota dwunożnego w położeniu początkowym do badania wpływu zmiany wartości kąta ( $\theta_4$ ) zgięcia w stawie kolanowym na położenie stopy odnóża. Otrzymane charakterystyki umieszczono na rys. 10, gdzie układ odniesienia związany jest z korpusem robota. Zmiana wartości kątowej  $\theta_4$  wpływa na zmianę współrzędnej  $y$ , z wektora pozycji i kąt  $\beta$  stopy (kąty Eulera  $X'-Y'-Z'$ , gdzie  $B_{X'-Y'-Z'}(\alpha, \beta, \gamma)$ ), natomiast nie wpływa na kąty  $\alpha$  i  $\gamma$  oraz współrzędną  $x$  wektora pozycji stopy względem korpusu. Na rys. 9b umieszczono model robota dwunożnego w położeniu początkowym do badania wpływu zmiany wartości kąta ( $\theta_6$ ) zgięcia w stawie skokowym na położenie stopy odnóża.

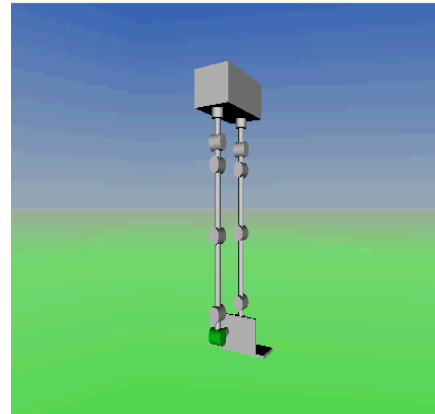
**Tab. 3.** Przykładowe wymiary członów robota

$i$	1	2	3	4	5	6	7
$l_i$ [m]	0	0,032	0,1	0,11	0,032	0,039	0
$\lambda_i$ [m]	0,048	0	0	0	0	0	0,068

a)

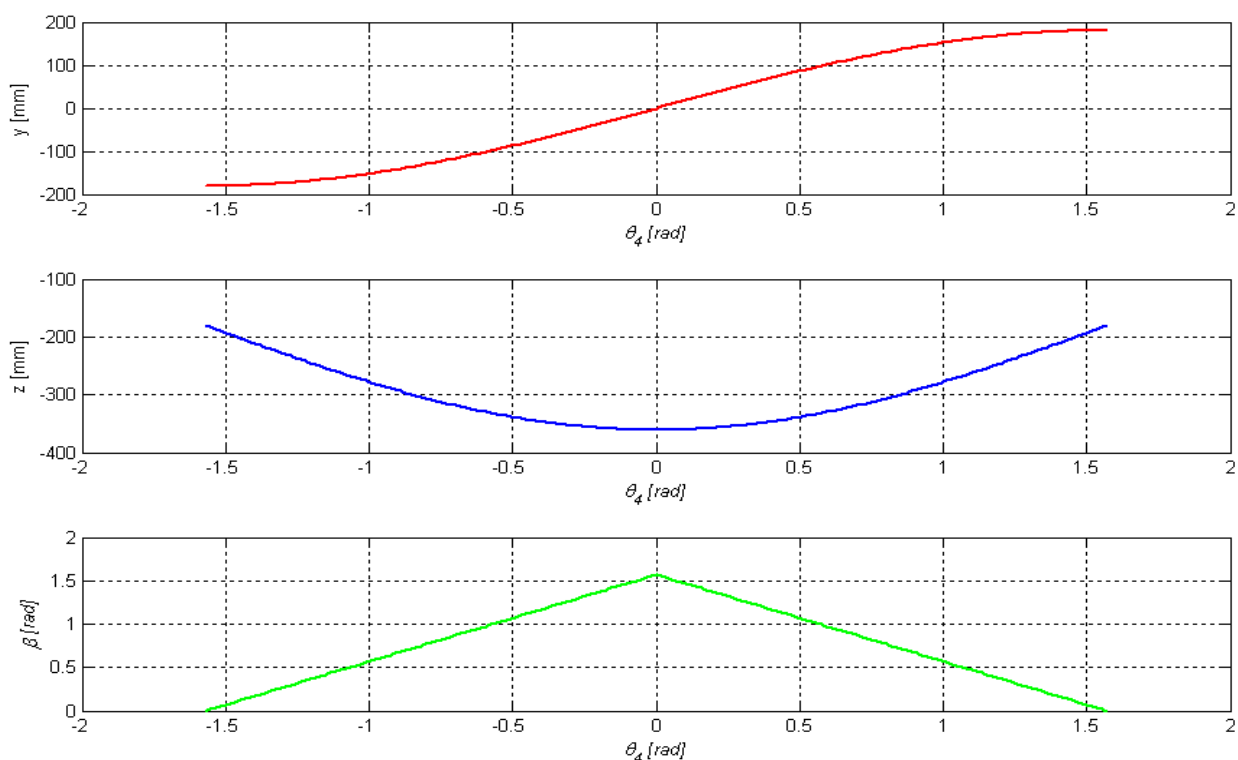


b)



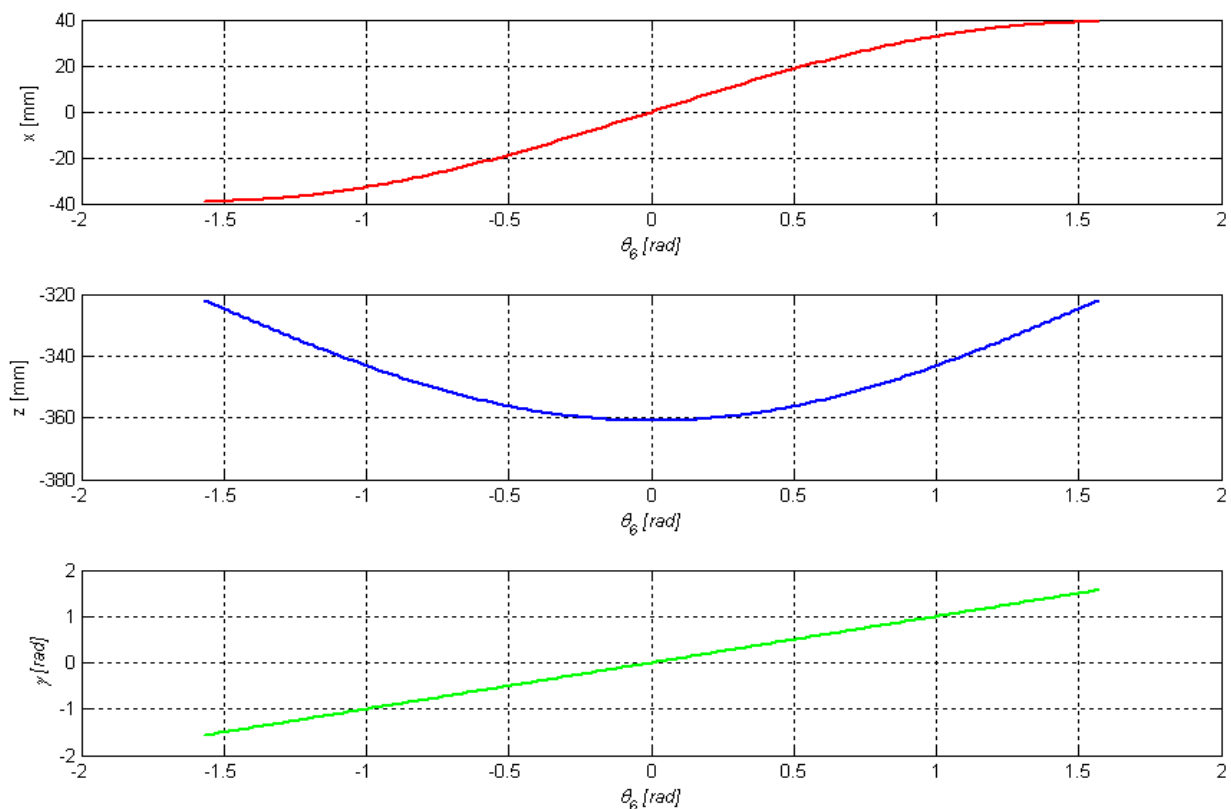
**Rys. 9.** Model robota dwunożnego w położeniu początkowym do badania zmiany położenia stopy od zmiany kąta w stawie: a) kolanowym, b) skokowym





**Rys. 10.** Zależności współrzędnych pozycji i orientacji stopy względem korpusu od kąta zgięcia w stawie kolanowym ( $\theta_4$ )

Na rys. 11 umieszczono charakterystyki wpływu zmian wartości kątowej  $\theta_6$  na współrzędne  $x$ ,  $z$  wektora pozycji i kąt  $\gamma$  stopy. Kąt zgięcia w stawie kolanowym ( $\theta_6$ ) nie wpływa na kąty  $\alpha$  i  $\beta$  oraz współrzędną  $y$  wektora pozycji stopy względem korpusu.

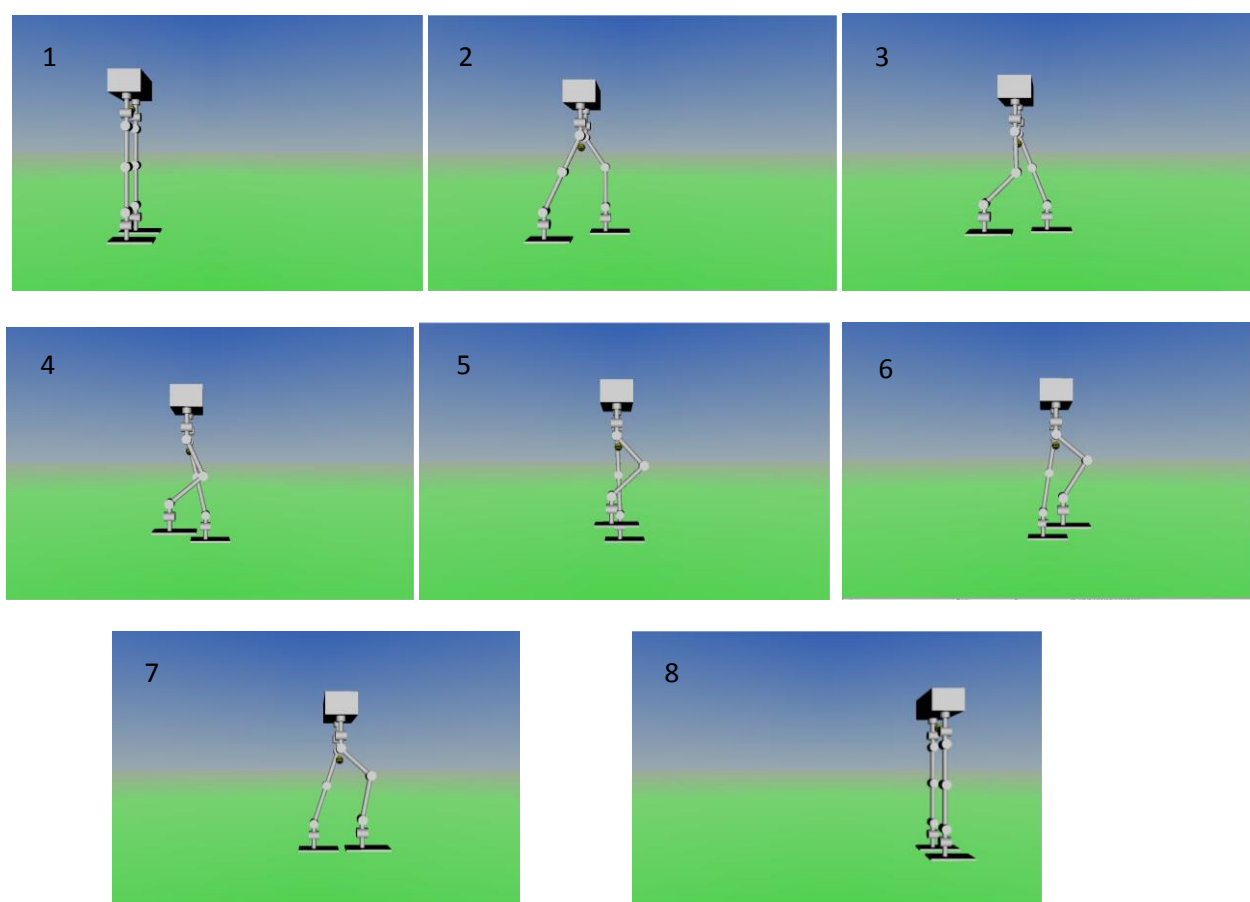


**Rys. 11.** Zależności współrzędnych pozycji i orientacji stopy względem korpusu od kąta zgięcia w stawie skokowym ( $\theta_6$ )

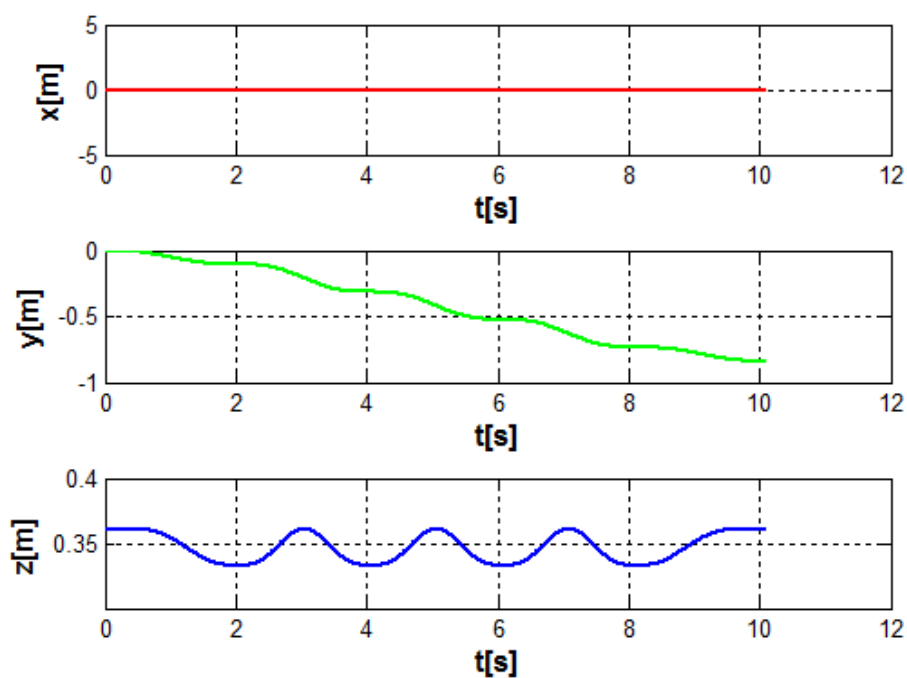
## 5. Modelowanie chodu robota dwunożnego

Chód jest to sposób przemieszczania się ludzi i zwierząt. Na rodzaj chodu ma wpływ ilość nóg oraz kolejność ich przestawiania. Ważnym terminem używanym przy analizie chodu jest długość kroku, jest to odległość dwóch kolejnych śladów (traktowanych jako punkty) tej samej nogi [6]. Długość kroku jest sumą długości wysunięcia nogi do przodu (wykrok) i wysunięcia nogi do tyłu (zakrok) oba te czynniki decydują o wielokątzie podparcia oraz położeniu w nim środka ciężkości. Do modelowania chodu robotów koczających wykorzystano zadanie odwrotne kinematyki polegające na znalezieniu współrzędnych konfiguracyjnych przy danej pozycji i orientacji stopy robota. Jest to zadanie fundamentalne w przypadku modelowania ruchu kończyn robota, gdyż wyznaczenie współrzędnych konfiguracyjnych pozwala na realizację ruchu kończyn robota po zadanej trajektorii.

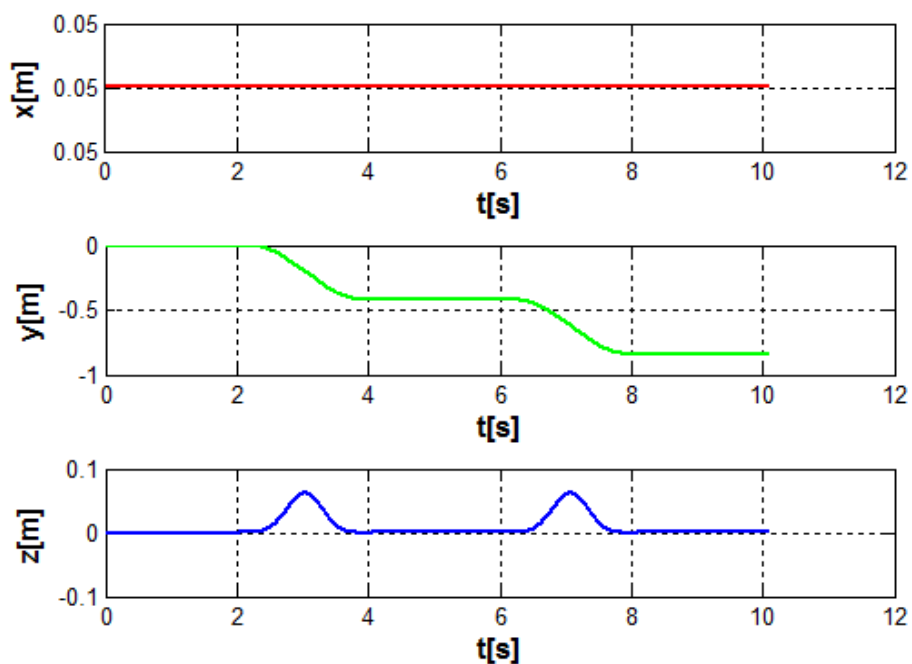
Przykład modelowania chodu robota dwunożnego wygenerowanego w programie Matlab przedstawiono w formie graficznej za pomocą podprogramu V-Realm Builder (rys. 12). Charakterystyki generowanej trajektorii umieszczono na rys.13-16. Przygotowany model robota umożliwia analizę chodu robotów dwunożnych obserwując zmiany położenia korpusu względem podłoża (rys. 13), stopy względem podłoża (rys. 14) stopy względem korpusu (rys. 15), czy też obserwację zmiany położenia środka ciężkości robota względem podłoża (rys. 16).



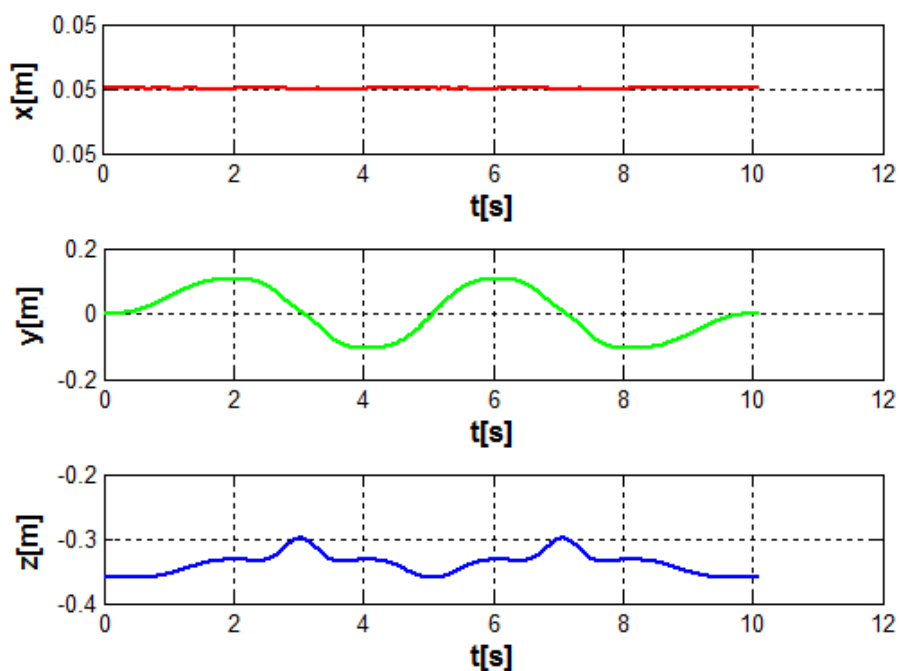
**Rys. 12.** Przykładowy ruch modelu robota koczającego wygenerowany w programie graficznym V-Realm Builder



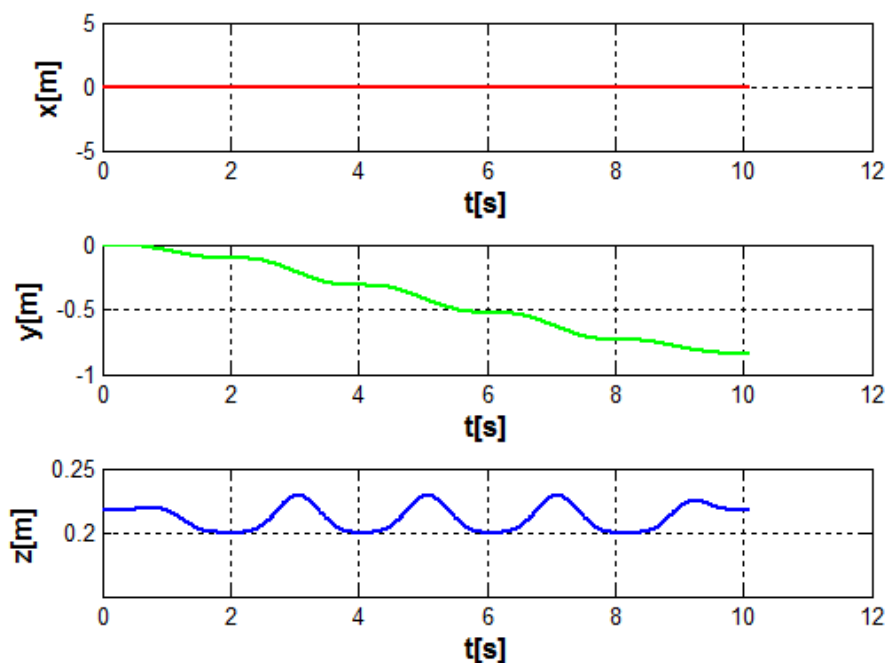
Rys. 13. Zależności współrzędnych kartezjańskich położenie korpusu względem podłoża w czasie symulacji  $t = 10$  s



Rys. 14. Zależności współrzędnych kartezjańskich położenie stopy względem podłoża w czasie symulacji  $t = 10$  s



Rys. 15. Zależności współrzędnych kartezjańskich położenie stopy względem korpusu w czasie symulacji  $t = 10$  s



Rys. 16. Zależności współrzędnych kartezjańskich położenie środka ciężkości robota względem podłoża w czasie symulacji  $t = 10$  s

## 6. Stabilność chodu robota dwunożnego

Stabilność określa w jakich fazach ruchu robot zachowuje równowagę. Ze względu na jej rodzaj maszyny kroczące możemy podzielić na [6]:

- statycznie stabilne – posiadają dużo aktywnych stopni swobody, zachowują równowagę nawet podczas „zamrożenia” w dowolnej fazie ruchu.
- dynamicznie stabilne – ich konfiguracja jest ciągle zmienna, posiadają od kilku do kilkudziesięciu stopni swobody, zachowują równowagę jedynie w czasie ruchu.
- quasi-statycznie stabilne – posiadają więcej stopni swobody niż powyższa grupa, zachowanie równowagi opiera się na dwóch wyżej wymienionych stabilnościach. W fazie podporowej są statycznie stabilne zaś w czasie ruchu zachowują już stabilność dynamiczną.

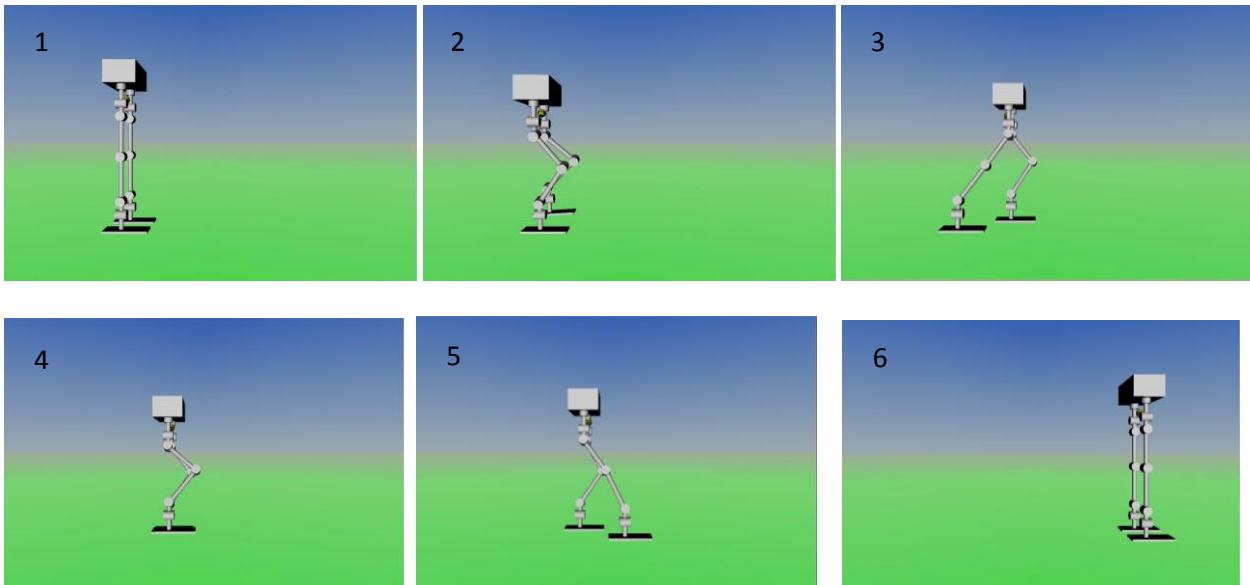
Większa ilość nóg jak w przypadku owadów zapewnia wiele punktów podparcia co skutkuje lepszą stabilnością statyczną i zachowaniem równowagi, zaś mniejsza liczba nóg zapewnia prostsze nimi poruszanie oraz łatwiejsze sterowanie chodem.

Roboty dwunożne są quasi-statycznie stabilne, czyli w poszczególnych fazach ruchu można wyróżnić jedną z dwóch rodzajów stabilności, statyczną lub dynamiczną. Robot jest stabilnie statyczny, gdy jego środek ciężkości zrzutowany na płaszczyznę podparcia znajduje się w obszarze utworzonym przez nogi będące w fazie podparcia, co w języku angielskim jest nazwane „*Ground projection of the Center Of Mass*” i oznaczone skrótem GCOM. Położenie punktu GCOM wyznacza się z zależności [5, 6]:

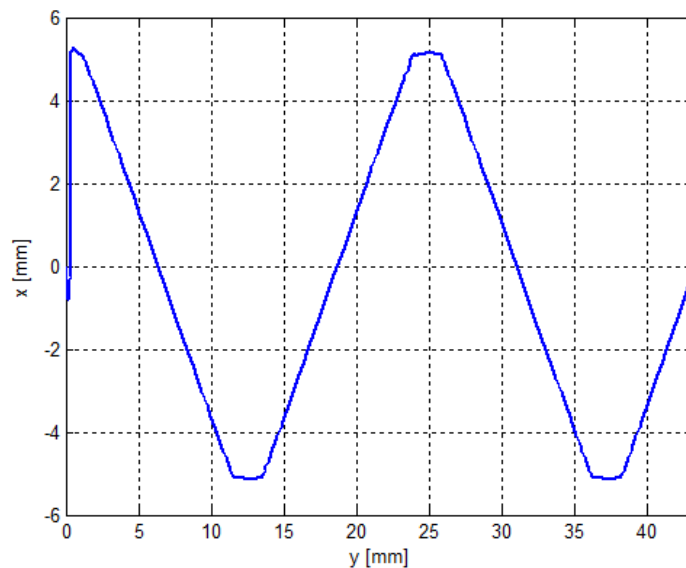
$$w_{CG} = \frac{m_0 w_0 + \sum_i \sum_j m_{ij} w_{ij}}{m} \quad (2)$$

gdzie:  $i$  – numer członu robota w ramach danej nogi ( $i = 1 \dots 6$ ),  $j$  – oznaczenie nogi,  $w_0, w_{ij}$  – odpowiednie współrzędne środka masy,  $w = [x \ y \ z]$ ,  $m_0$  - masa korpusu,  $m_i$  - masa członu  $i$  należącego do nogi (lewej lub prawej),  $m$  – masa całkowita robota.

Figura podparcia jest to obszar powstały z połączenia wierzchołków wyznaczonych przez punkty w których nogi robota stykają się z podłożem. W przypadku robotów wielonożnych (cztery i więcej) wielkość obszaru podparcia zależy bezpośrednio od rozstawu wszystkich kończyn. Dla robotów humanoidalnych dwie nogi dają tylko dwa „punkty” podparcia. Spełnienie założenia GCOM, dla takiego przypadku jest kłopotliwe. Na tej postawie można wyciągnąć wniosek, że w przypadku robotów dwunożnych czynnikiem odpowiedzialnym za utrzymanie statycznej równowagi jest nie tyle co rozstaw kończyn co ich powierzchnia styku z podłożem, tak więc im większa powierzchnia stopy tym większy obszar podparcia. Idąc tym tropem można zauważyć, że jeśli powierzchnia stopy będzie „znacząca” (chodzi tu o proporcjonalność względem całej nogi), to jest możliwe umieszczenie GCOM nad jedną stopą, czyli zachowanie równowagi statycznej w fazie jednopodporowej. Zastosowanie kryterium GCOM dla robotów dwunożnych o dużych stopach, przy niewielkich prędkościach lokomocji, kiedy można zaniedbać siły bezwładności działające na model, pozwala na realizację chodu statycznie stabilnego. Przykład zachowania stabilności statycznej robota dwunożnego przedstawiono na rys. 17. Na podstawie przygotowanego modelu wygenerowano zależność współrzędnej  $x$  od  $y$  wektora pozycji środka ciężkości robota dwunożnego względem podłoża (rys. 18). Umieszczono GCOM nad jedną stopą, czyli zachowano równowagę statyczną w fazie jednopodporowej, przyjmując duże stopy i przemieszczanie przy niewielkich prędkościach.



**Rys. 17.** Przykładowy ruch stabilny statycznie modelu robota kroczącego wygenerowany w programie graficznym V-Realm Builder



**Rys. 18.** Zależność współrzędnej  $x$  od  $y$  wektora pozycji środka ciężkości robota dwunożnego względem podłoża dla ruchu stabilnego statycznie

Zachowanie stabilności dynamicznej jest trudniejszą kwestią, gdyż uwzględniane są tu już wszelkie siły i momenty sił, w tym wynikające z bezwładności układu, tj. powstałe wskutek jego ruchu. Istnieją różne metody rozwiązywania tego problemu, jednak najczęściej stosowanym w robotyce kryterium stabilności dynamicznej jest ZMP [5] (zero moment point), punkt zerowego momentu. Koncepcja ZMP została wprowadzona w 1969 r. i do tego czasu jest wykorzystywana przy sterowaniu i projektowaniu ruchów robotów. ZMP jest to punkt na podłożu, w którym składowe wypadkowego momentu sił bezwładności i sił ciężkości działających na obiekt względem osi leżących w płaszczyźnie podparcia, są równe zero. ZMP to pojęcie związane z dynamiką i sterowaniem robotów o lokomocji dyskretnej, np. robotów humanoidalnych. Określa punkt w którym dynamiczne siły reakcji przy kontakcie stopy z podłożem nie wytwarzają momentu w kierunku poziomym. Koncepcja zakłada że obszar styku jest płaski i ma wystarczająco duże tarcie by uchronić stopy przed ześlizgnięciem. ZMP jest bardzo ważnym pojęciem w planowaniu

ruchu robotów dwunożnych, ponieważ mają tylko dwa punkty styku z podłogą a, że mają one chodzić lub skakać (w kontekście ruchu) ich ruch musi być zaplanowany w odniesieniu do dynamicznej stabilizacji całym ciałem. To nie jest łatwe zadanie, zwłaszcza że górna część ciała robota (korpus) ma większą masę i bezwładność, niż nogi których celem jest przemieszczanie robota. Można to porównać z problemem odwróconego wahadła. Reasumując, jeśli punkt ZMP, którego współrzędne możemy wyliczyć z następujących wzorów [5]:

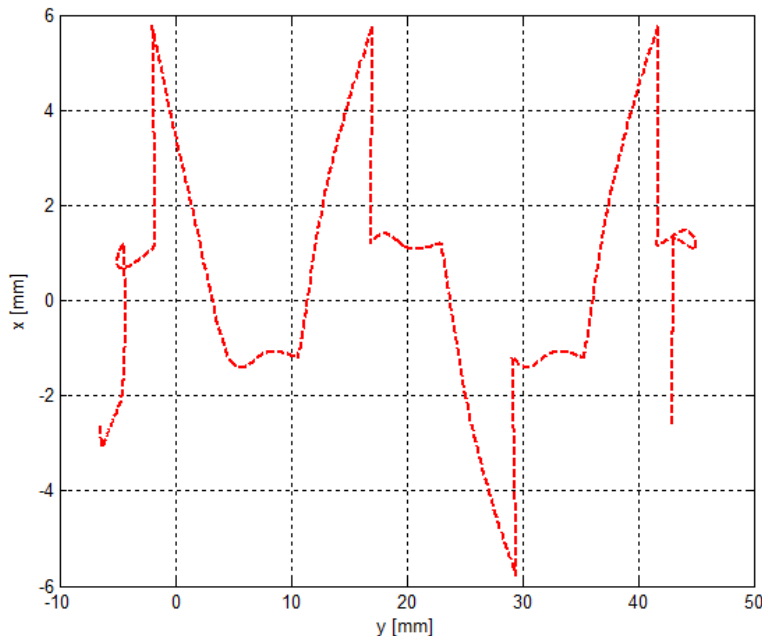
$$x_{ZMP} = \frac{m_0(\ddot{x}_0 - g)x_0 + \sum_i \sum_j m_i(\ddot{x}_{ij} - g)x_{ij} - m_0\ddot{x}_0 z_0 - \sum_i \sum_j m_i \ddot{x}_{ij} z_{ij}}{m_0(\ddot{x}_0 - g) + \sum_i \sum_j m_i(\ddot{x}_{ij} - g)} \quad (3)$$

$$y_{ZMP} = \frac{m_0(\ddot{x}_0 - g)y_0 + \sum_i \sum_j m_i(\ddot{x}_{ij} - g)y_{ij} - m_0\ddot{y}_0 z_0 - \sum_i \sum_j m_i \ddot{y}_{ij} z_{ij}}{m_0(\ddot{x}_0 - g) + \sum_i \sum_j m_i(\ddot{x}_{ij} - g)} \quad (4)$$

gdzie:  $\ddot{w}_0, \ddot{w}_{ij}$  – odpowiednie składowe przyspieszenia środka masy korpusu lub członu  $i$  nogi  $j$  (prawa lub lewa),  $w = [x \ y \ z]$ .

nie wykracza poza powierzchnie podparcia, to robot jest stabilny dynamicznie.

Na podstawie przygotowanego modelu wygenerowano zależność współrzędnej  $x$  od  $y$  wektora pozycji środka ciężkości robota dwunożnego względem podłoża przy zachowaniu stabilności dynamicznej (rys. 19).



**Rys. 19.** Zależność współrzędnej  $x$  od  $y$  wektora pozycji środka ciężkości robota dwunożnego względem podłoża dla ruchu stabilnego dynamicznie

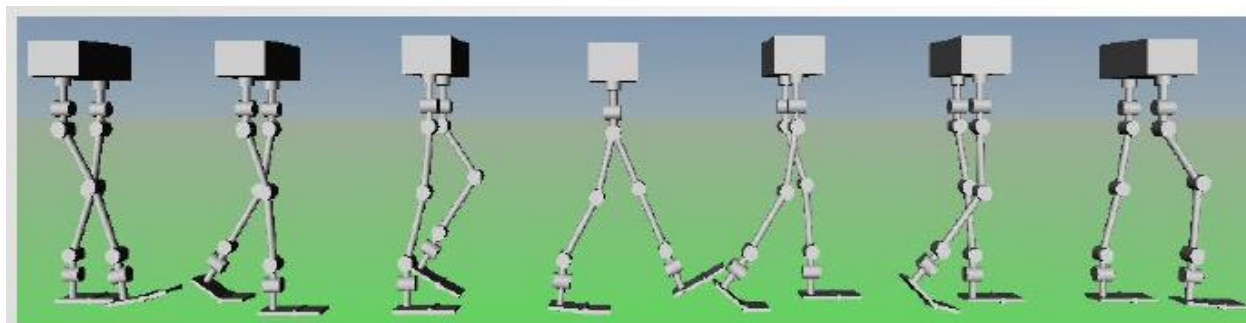
#### 4. Podsumowanie

Przygotowano model do analizy chodu robota dwunożnego, który może zostać wykorzystany przy projektowaniu maszyn kroczących. Opracowano model robota kroczącego w środowisku Matlab i wygenerowano w programie graficznym V-Realm Builder umożliwiając modelowanie chodu robota kroczącego oraz obserwację przemieszczenia poszczególnych kończyn i korpusu za pomocą trójwymiarowego modelu. Tak przygotowany model robota będzie testowany do odwzorowania kolejnych

faz ruchu człowieka (rys. 20-21) i dodatkowo zostanie zwiększona liczba stopni swobody przez dodanie kolejnych par kinematycznych aby badać ruch kończyn dolnych człowieka w czasie chodu.



Rys. 20. Schemat prawidłowych faz chodu człowieka [4]



Rys. 21. Kolejne fazy chodu człowieka odwzorowane przez model robota dwunożnego wygenerowany w programie graficznym V-Realm Builder

## Literatura

- [1] Bober T., Zawadzki J.: Biomechanika układu ruchu człowieka, BK, Wydanie II poprawione, Wrocław 2003.
- [2] Morecki A., Knapczyk J., Kędzior K.: Teoria mechanizmów i manipulatorów, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
- [3] Morecki A., Knapczyk J. (red. nauk.): *Podstawy robotyki*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.
- [4] Tejszerska D, Świtoński E. i in.: Biomechanika inżynierska. Zagadnienia wybrane. Laboratorium, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004.
- [5] Trojnacki M.: Generowanie ruchu robota dwunożnego z wykorzystaniem danych opisujących chód człowieka, *Pomiary Automatyka Robotyka* 3/2009, czasopismo naukowo-techniczne.
- [6] Zielińska T.: *Maszyny kroczące*. Warszawa 2003.
- [7] [www.asimo.pl](http://www.asimo.pl) Polski portal robotyki.