



AGH

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej**

Projekt dyplomowy

*Analiza problemu stabilizacji czworonożnego robota
kroczącego przy ograniczeniu liczby punktów podparcia*

*Analysis of stabilization problem for the quadruped walking
robot with limited contact points*

Autor:
Kierunek studiów:
Opiekun pracy:

Mateusz Jakub Kwaśny
Automatyka i Robotyka
dr hab. inż. Adam Krzysztof Piłat

Kraków, 2020 r.

Spis treści

1	Wstęp.....	7
2	Zagadnienie stabilizacji.....	9
2.1	Stabilność statyczna a stabilność dynamiczna.....	9
2.2	Środek ciężkości w zagadnieniu stabilizacji.....	9
2.3	Wielokąt podparcia	10
2.4	Wahadło odwrócone	11
3	Model matematyczny	13
3.1	Konstrukcja robota i założenia zagadnienia	13
3.2	Kinematyka kończyn	14
3.3	Opis dynamiki kończyny podniesionej.....	17
3.4	Model matematyczny zjawiska.....	19
4	Sterowanie i symulacje.....	21
4.1	Wykorzystywane środowisko symulacyjne.....	21
4.2	Sterowanie modelem wahadła	22
4.3	Symulacja zachowania robota.....	26
5	Podsumowanie	37
6	Bibliografia.....	39

1 Wstęp

Projekt ten porusza jakże często występujący w robotyce aspekt stabilności robota, w szczególności będącego w ruchu. Konstruując roboty kroczące należy wziąć pod uwagę sposób w jaki robot będzie się poruszał oraz to w jak w związku z tym będzie się zmieniać jego zachowanie pod wpływem sił bezwładności.

Problem stabilizacji chodu robota jest od dawna poruszonym tematem badawczym wśród naukowców zajmujących się robotyką. Wiele prac naukowych z powodzeniem implementuje dynamicznie stabilny chód w konstrukcjach zarówno humanoidalnych jak również wielonożnych. Warto jednak zauważyć, iż stopień skomplikowania stabilności robota w ruchu różni się w zależności od przyjętego sposobu implementowanego chodu – w przypadku, gdy większość kończyn robota pozostaje w kontakcie z podłożem jest on zazwyczaj stabilny zarówno statycznie jak i dynamicznie. Jeśli zaś robot, w jednej fazie chodu, zmuszony jest podnieść przynajmniej połowę kończyn, zwykle traci on stabilność statyczną i koniecznym jest utrzymanie stabilności dynamicznej do czasu, gdy nogi robota ponownie wrócą do kontaktu z podłożem. W projekcie tym zostanie poruszony aspekt stabilizacji robota w przypadku konieczności dłuższego przytrzymania kończyn w powietrzu.

Inspiracją dla podejmowanego tematu było zachowanie pustynnej jaszczurki z gatunku *Meroles anchietae*, która ze względu na środowisko, w pewnych momentach zmuszona jest utrzymywać dwie ze swoich kończyn w powietrzu, aby obniżyć temperaturę swojego ciała. W momencie, gdy temperatura trzymanyh w górze kończyn zrówna się z temperaturą powietrza, jaszczurka ta szybko zmienia konfigurację w celu schłodzenia kończyn uprzednio ją podpierających.



Rysunek 1 Zachowanie jaszczurki *Merops anchietae* inspirujące temat pracy
Źródło: kadr z filmu [1]

Realizacja opisywanego projektu dyplomowego była mocno związana z projektem konstrukcyjnym, realizowanym w ramach konkursu „Grant Rektorski 2019” przez podzespół Koła Naukowego „Focus” w składzie: Paweł Gakan, Mateusz Kwaśny, Dawid Lech, Edyta Malcharek, Piotr Wzorek i Rafał Zalewski. Przedsięwzięcie to zakładało zaprojektowanie oraz konstrukcję czworonożnego robota kroczącego imitującego jaszczurkę jak również opracowanie metod generacji trajektorii chodu oraz mechanizmu rozpoznawania obiektów z wykorzystaniem sieci neuronowych.

Omawiany projekt dyplomowy obejmuje realizację strategii ruchów stabilizujących dla, wyznaczonego w ramach tego dokumentu, uproszczonego modelu robota imitującego charakterystyczne zachowanie jaszczurki pustynnej.

W rozdziale drugim poruszono niektóre z podstawowych pojęć wykorzystywanych przy analizie stabilności robotów, a w szczególności, robotów kroczących. Rozdział trzeci poświęcony jest procesowi adaptacji konstrukcji zaprojektowanego robota do uproszczonego modelu matematycznego zjawiska oddającego w pewnym stopniu zachowanie prawdziwej konstrukcji. Zawarto w nim również podstawowy opis uproszczonej konstrukcji robota w postaci równań kinematyki i dynamiki kończyny. Rozdział czwarty zawiera opis środowiska symulacyjnego, badanie zachowania modelu zjawiska oraz realizację strategii stabilizującej dla różnych scenariuszy testowych w ramach symulacji uproszczonej konstrukcji robota.

Powstały projekt jest swoistym podsumowaniem wiedzy z zakresu robotyki w trakcie studiów inżynierskich na kierunku Automatyka i Robotyka. Poruszane są zagadnienia zarówno fizyczno-mechaniczne, jak również aspekty teorii sterowania. Jest ona również niejako wejściem w świat badawczo-naukowy, począwszy od zdefiniowania problemu poprzez próbę jego rozwiązania, a skończywszy na przedstawieniu wniosków z przeprowadzonych prac.

2 Zagadnienie stabilizacji

Rozważając wymagania, które stawiane są robotom kroczącym zarówno w ruchu jak i statycznie nie sposób nie dostrzec jak istotnym zjawiskiem z punktu widzenia projektowania jak i sterowania jest stabilność robota. Analiza stabilności umożliwia m.in. ograniczenie sytuacji, w których konstrukcja robota jest narażona na uderzenie spowodowane na przykład upadkiem.

Dalsza część tego rozdziału podejmie próbę przeglądu podstawowych pojęć wykorzystywanych przy badaniu stabilności robotów.

2.1 Stabilność statyczna a stabilność dynamiczna

Stabilność robota rozważa się w dwóch równie istotnych przypadkach. Stabilność statyczna, która dotyczy zachowania robota pozostającego w bezruchu oraz stabilność dynamiczna, która określa możliwość utrzymania równowagi w ruchu, kiedy na konstrukcję robota działają siły bezwładności lub jest ona pod wpływem oddziaływań zewnętrznych.

Stabilność zarówno statyczną jak i dynamiczną określa się z wykorzystaniem wielu kryteriów, które analizują wpływ sił oraz momentów na konstrukcję robota. Mimo tego, że kryteria te poruszają zagadnienia istotne zarówno z punktu widzenia bezruchu jak i dynamicznej pracy robota, często nie są one uniwersalne przy rozważaniu stabilności statycznej i dynamicznej. Poniżej przedstawiono przykładowe kryteria spotykane w literaturze [2][3][4]:

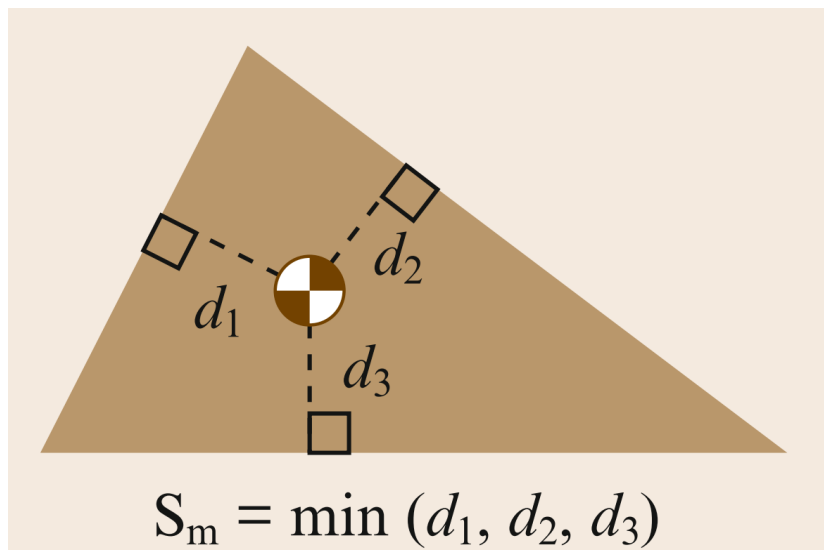
- CG Projection Method – zapas stabilności określany przez odległość rzutu środka ciężkości od krawędzi wielokąta podparcia,
- Energy Stability Margin – zapas stabilności energetycznej definiowany jako minimalna energia potencjalna potrzebna do zachwiania równowagi robota,
- Force-Angle Stability Margin – zapas stabilności wyznaczany jako iloczyn kąta między wektorem wypadkowej siły zaczepionej w punkcie środka masy a wektorem normalnym do osi obrotu przechodzącej przez ten punkt i wartością wspomnianej siły.

2.2 Środek ciężkości w zagadnieniu stabilizacji

Przyglądając się kryteriom stabilności na podstawie których projektowane są same konstrukcje jak również systemy sterowania robotami kroczącymi, łatwo zauważyć, że w większości z nich wykorzystywany jest koncept środka ciężkości i jego położenie względem płaszczyzny pod kończynami robota.

Rzut ortogonalny środka ciężkości na wielokąt podparcia robota jest wykorzystywany jako istotna część wielu kryteriów stabilności. W przypadku najprostszego wariantu, czyli kryterium rzutu środka ciężkości (CG Projection Method) rzut ten jest wykorzystywany

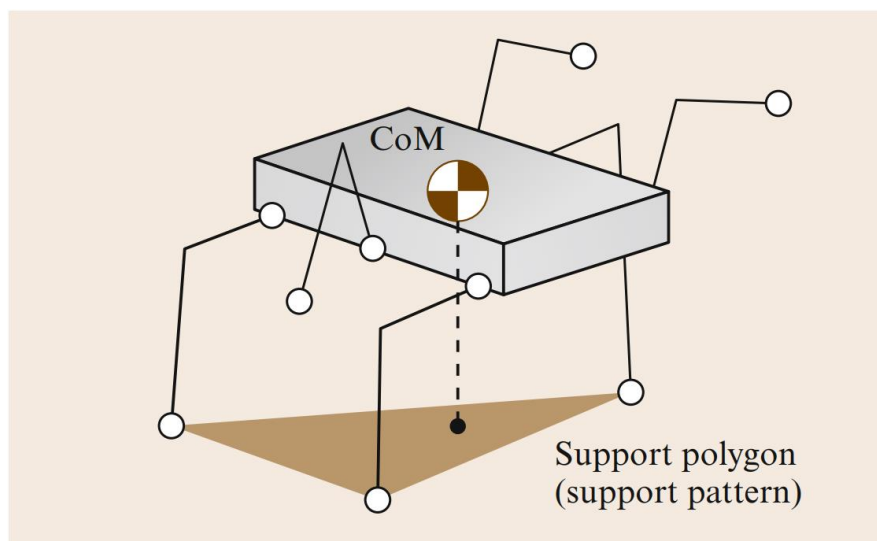
bezpośrednio do określenia zapasów stabilności statycznej robota poprzez szukanie minimalnej odległości wspomnianego rzutu od krawędzi wielokąta podparcia.



Rysunek 2 Zapas stabilności dla kryterium rzutu środka ciężkości
Źródło: [5]

2.3 Wielokąt podparcia

Jednym z najbardziej elementarnych pojęć stosowanych w wielu powszechnych kryteriach stabilności robotów jest pojęcie wielokąta podparcia. Pojęcie to zostało wprowadzone po raz pierwszy w 1968 roku przez R. McGhee i A. Franka w swojej pracy [6] poświęconej stabilności chodu robotów krocących. Wielokąt podparcia definiowany jest jako minimalny obszar, tworzony przez zbiór wypukły punktów, w których znajduje się kończyzna nośna robota na płaszczyźnie.



Rysunek 3 Wielokąt podparcia dla przykładowego robota krocącego
Źródło: [5]

Jak łatwo zauważyć, w przypadku, gdy zadaniem robota jest stanie na wyłącznie dwóch kończynach, zastosowanie kryterium, którego podstawą jest rzut środka ciężkości na płaszczyznę podparcia, jest wielce niepraktyczne. Utrzymanie środka ciężkości robota idealnie na linii łączącej kończyny, jest w realnych warunkach bliskie niemożliwemu.

2.4 Wahadło odwrócone

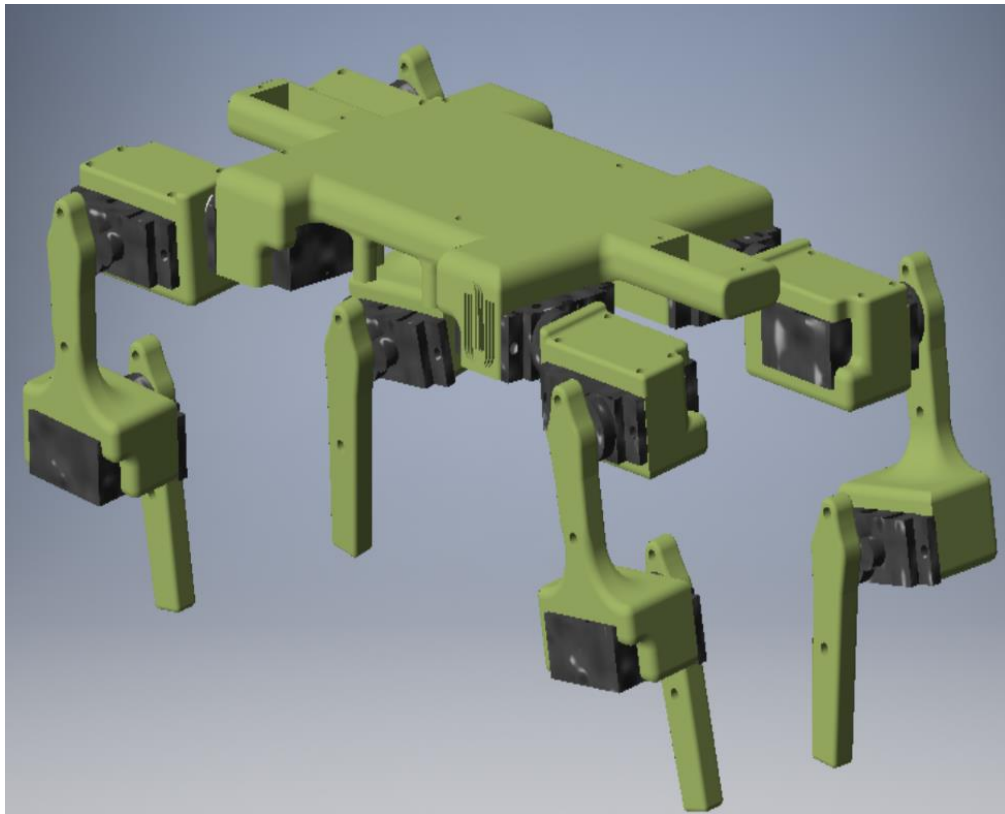
Często spotykaną w literaturze analogią mającą na celu odwzorowanie dynamiki podczas chodu robotów krocących jest problem stabilizacji wahadła odwróconego. Wahadło odwrócone jest z natury obiektem niestabilnym i aby utrzymać go w położeniu równowagi, w pionie, ponad oś obrotu wahadła, należy w odpowiedni sposób przeciwdziałać oddziaływaniu grawitacyjnemu oraz siłom bezwładności oddziaływującym na układ. Podobnie jest w przypadku sterowania kończynami robota w taki sposób, aby utrzymać jego stabilność w trakcie chodu lub innych czynności, które mogą doprowadzić do destabilizacji konstrukcji.

W uproszczeniu, w momencie, gdy robot podnosi kończyny stając się jednocześnie układem niestabilnym, dynamikę ruchu środka ciężkości konstrukcji aproksymuje się modelem wahadła odwróconego. W pracach [7] i [8], uczeni proponują wykorzystanie zlinearyzowanego modelu wahadła odwróconego jako podstawę do projektowania systemu sterowania dla czworonożnych robotów krocących.

3 Model matematyczny

3.1 Konstrukcja robota i założenia zagadnienia

Zaprojektowana w ramach projektu grantowego konstrukcja jest czworonożnym robotem krocącym o kończynach w konfiguracji gada, co oznacza, że środek ciężkości robota znajduje się w przybliżeniu na wysokości stawu kolanowego robota. Każda z kończyn jest skonstruowana w ten sam sposób i posiada 3 stopnie swobody. Daje to łącznie 12 stopni swobody platformy kroczącej robota.

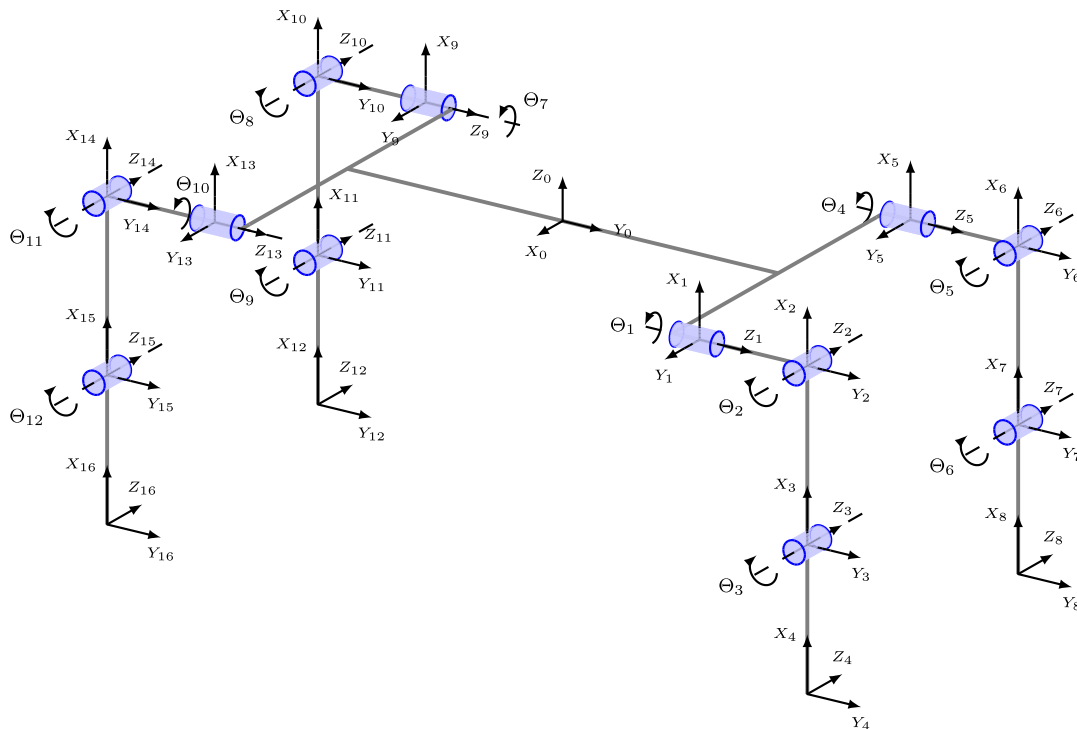


Rysunek 4 Wizualizacja modelu konstrukcji platformy kroczącej robota
Opracowanie własne: Autodesk Inventor

Do podjęcia próby stabilizacji robota wymagana jest adaptacja jego konstrukcji do uproszczonego modelu brył sztywnych i zdefiniowanie pewnych założeń związanych z opisywanym zjawiskiem. Jako założenia modelu przyjmuje się schemat kinematyczny opisany jako rysunek 5.

Konstruując wykorzystywany dalej model, zakłada się, że połączenia między złączami kinematycznymi kończyn są walcami o promieniu równym r_{noga} i równomiernym rozkładzie masy na całej objętości. Korpus jest zaś prostopadłościanem o wymiarach $l_{korp} \times w_{korp} \times h_{korp}$ i jednorodnym rozkładzie gęstości. W punkcie środka masy korpusu ulokowano bazowy układ współrzędnych X_0, Y_0, Z_0 . Do rozważań problemu stabilizacji robota

przyjmuje się również, iż w jednej chwili maksymalnie dwie kończyny robota będą uniesione. W przypadku, gdy robot ma podniesione dwie kończyny, muszą one być przeciwległe względem zarówno osi X_0 jak i osi Y_0 .



Rysunek 5 Schemat kinematyczny platformy kroczącej robota
Opracowanie własne: Sketch, LaTeX

3.2 Kinematyka kończyn

Do opisanie możliwości ruchu końcówki kończyny robota potrzebne są macierze rotacji oraz translacji opisujące zależności pomiędzy układami odniesienia ulokowanymi w poszczególnych złączach kinematycznych. W zadaniu kinematyki prostej niezwykle przydatne okazuje się wykorzystanie notacji Denavita-Hartenberga, w której macierz transformacji między dwoma kolejnymi układami odniesienia określają następujące równania [9].

$${}^{i-1}T_i = D_{z_{i-1}, d_i} R_{z_{i-1}, \theta_i} D_{x_{i-1}, a_i} R_{x_{i-1}, \alpha_i} \quad 3.1$$

$${}^i T_{i-1} = D_{x_i, -a_i} R_{x_i, -\alpha_i} D_{z_i, -d_i} R_{z_i, -\theta_i} \quad 3.2$$

Gdzie:

- R – macierz rotacji wokół danej osi,
- T – macierz translacji wzdłuż danej osi,
- $\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i$ – parametry Denavita-Hartenberga (DH).

Łącząc ze sobą poszczególne elementarne macierze transformacji otrzymujemy macierz przekształcenia jednorodnego w postaci:

$${}^{i-1}T_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad 3.3$$

Mnożąc macierze przekształceń jednorodnych kolejnych złączy kinematycznych można otrzymać, w szczególności, macierz przekształcenia jednorodnego z bazowego układu odniesienia do układu odniesienia końcówki kończyny robota.

Bazując na opisanym schemacie kinematycznym (rysunek 5) wyprowadzono macierze przekształceń, które posłużą do wyznaczenia kinematyki prostej. Poniżej zaprezentowano parametry DH i macierz przekształcenia jednorodnego dla końcówki kończyny prawej przedniej. Jako bazę dla obliczeń przyjęto pierwsze złącze obrotowe robota – układ $\{X_1, Y_1, Z_1\}$. Otrzymałą w ten sposób macierz kinematyki prostej przemnożono z macierzą przekształcenia jednorodnego opisującą przekształcenie z osi układu $\{X_1, Y_1, Z_1\}$ do układu $\{X_0, Y_0, Z_0\}$. Z uwagi na analogię w postępowaniu i nieznaczne, bo dotyczące jedynie znaku, różnice w parametrach DH (a oraz d) i wektorze translacji P macierzy przekształceń do układu $\{X_0, Y_0, Z_0\}$ pominięto opis pozostałych kończyn.

Tabela 1 Parametry Denavita-Hartenberga dla prawej przedniej kończyny robota

i	θ	α	a	d
1	θ_1	$\frac{\pi}{2}$	0	l_{biodro}
2	θ_2	0	l_{noga}	0
3	θ_3	0	l_{noga}	0

Macierz przekształcenia jednorodnego z układu $\{X_1, Y_1, Z_1\}$ do układu $\{X_0, Y_0, Z_0\}$ przyjmuje postać:

$${}^0T_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \frac{l_{korp}}{2} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{w_{korp}}{2} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Gdzie:

- l_{korp} – długość korpusu,
- w_{korp} – szerokość korpusu.

Macierz przekształcenia jednorodnego z układu $\{X_4, Y_4, Z_4\}$ do układu $\{X_1, Y_1, Z_1\}$ wyznaczono korzystając z równania 3.3 i własności macierzy przekształceń jednorodnych:

$${}^1T_4 = {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 = \begin{bmatrix} {}^1R_4 & {}^1P_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1R_4 = \begin{bmatrix} c\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_3 - c\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_3 & -c\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot s\theta_3 - c\theta_1 \cdot c\theta_3 \cdot s\theta_2 & s\theta_1 \\ c\theta_2 \cdot c\theta_3 \cdot s\theta_1 - s\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_3 & -c\theta_2 \cdot s\theta_1 \cdot s\theta_3 - c\theta_3 \cdot s\theta_1 \cdot s\theta_2 & -c\theta_1 \\ c\theta_2 \cdot s\theta_3 + c\theta_3 \cdot s\theta_2 & c\theta_2 \cdot c\theta_3 - s\theta_2 \cdot s\theta_3 & 0 \end{bmatrix}$$

$${}^1P_4 = \begin{bmatrix} l_{noga} \cdot c\theta_1 \cdot c\theta_2 + l_{noga} \cdot c\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_3 - l_{noga} \cdot c\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_3 \\ l_{noga} \cdot c\theta_2 \cdot s\theta_1 + l_{noga} \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_3 \cdot s\theta_1 - l_{noga} \cdot s\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_3 \\ l_{biodro} + l_{noga} \cdot s\theta_2 + l_{noga} \cdot c\theta_2 \cdot s\theta_3 + l_{noga} \cdot c\theta_3 \cdot s\theta_2 \end{bmatrix}$$

Gdzie:

- s, c – odpowiednio sinus i cosinus,
- θ_i – kąt obrotu i -tego złącza kinematycznego,
- l_{noga}, l_{biodro} – długości połączeń między złączami kinematycznymi.

Korzystając z wspomnianej wcześniej własności macierzy przekształcenia jednorodnego i przyjętych uprzednio oznaczeń, otrzymano po uproszczeniach:

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} {}^0R_4 & {}^0P_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0R_4 = \begin{bmatrix} c(\theta_2 + \theta_3) \cdot s\theta_1 & -s(\theta_2 + \theta_3) \cdot s\theta_1 & -c\theta_1 \\ s(\theta_2 + \theta_3) & c(\theta_2 + \theta_3) & 0 \\ c(\theta_2 + \theta_3) \cdot c\theta_1 & -s(\theta_2 + \theta_3) \cdot c\theta_1 & s\theta_1 \end{bmatrix}$$

$${}^0P_4 = \begin{bmatrix} \frac{l_{korp}}{2} + l_{noga} \cdot (c\theta_2 \cdot s\theta_1 + c\theta_2 \cdot c\theta_3 \cdot s\theta_1 - s\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_3) \\ l_{biodro} + \frac{w_{korp}}{2} + l_{noga} \cdot (s(\theta_2 + \theta_3) + s\theta_2) \\ l_{noga} \cdot c\theta_1 \cdot (c(\theta_2 + \theta_3) + c\theta_2) \end{bmatrix}$$

Wyprowadzone powyżej macierze są podstawą do numerycznych obliczeń kinematyki prostej oraz zastosowania metody iteracyjnej [9] do wyznaczania kinematyki odwrotnej.

3.3 Opis dynamiki kończyny podniesionej

Do opisu dynamiki posłużono się uproszczonym modelem robota, którego kończyny zbudowane są z walców, zaś korpus jest prostopadłościanem, w celu ułatwienia obliczeń przy równaniach tensorów momentów bezwładności. Zrezygnowano również z przesunięć osi spowodowanych montażem serwomechanizmów w modelu konstrukcyjnym.

Wyznaczając dynamikę modelu nogi posłużono się algorytmem rekurencyjnym wykorzystującym równania ruchu Newtona-Eulera [10]. Metoda ta pozwala na wyznaczenie sił i momentów pojedynczo dla każdego członu robota, dzięki czemu można wyznaczyć dynamikę całego łańcucha kinematycznego wykonując obliczenia rekurencyjnie od bazy do końca łańcucha oraz w kierunku przeciwnym.

Rekurencyjny algorytm wykorzystujący równania Newtona-Eulera jest podzielony na dwa etapy [11]. W pierwszym etapie korzystamy z rekurencji w przód w celu obliczenia prędkości oraz przyspieszeń kątowych i liniowych dla każdego członu oraz sił i momentów nań działających.

$${}^{i+1}\boldsymbol{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}\mathbf{R}_i \quad {}^i\boldsymbol{\omega}_i + \dot{\Theta}_{i+1} \quad {}^{i+1}\hat{\mathbf{Z}}_{i+1} \quad 3.4$$

$${}^{i+1}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i+1} = {}^{i+1}\mathbf{R}_i \quad {}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i + {}^{i+1}\mathbf{R}_i \quad {}^i\boldsymbol{\omega}_i \times \dot{\Theta}_{i+1} \quad {}^{i+1}\hat{\mathbf{Z}}_{i+1} + \ddot{\Theta}_{i+1} \quad {}^{i+1}\hat{\mathbf{Z}}_{i+1} \quad 3.5$$

$${}^{i+1}\dot{\mathbf{v}}_{i+1} = {}^{i+1}\mathbf{R}_i \left[{}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times {}^i\mathbf{P}_{i+1} + {}^i\boldsymbol{\omega}_i \times ({}^i\boldsymbol{\omega}_i \times {}^i\mathbf{P}_{i+1}) + {}^i\dot{\mathbf{v}}_i \right] \quad 3.6$$

Znając położenie środka masy każdego członu możemy wyznaczyć jego przyspieszenie:

$${}^i\dot{\mathbf{v}}_{c_i} = {}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times {}^i\mathbf{P}_{c_i} + {}^i\boldsymbol{\omega}_i \times ({}^i\boldsymbol{\omega}_i \times {}^i\mathbf{P}_{c_i}) + {}^i\dot{\mathbf{v}}_i \quad 3.7$$

Na podstawie powyższego możemy policzyć siły i momenty działające na środek masy każdego członu:

$$\mathbf{F}_i = m_i \quad {}^i\dot{\mathbf{v}}_{c_i} \quad 3.8$$

$$\mathbf{N}_i = {}^cI\dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times {}^cI\boldsymbol{\omega}_i \quad 3.9$$

W drugim etapie algorytmu, obliczone zostaną siły i momenty sił złączowych wykorzystując rekurencję wsteczną oraz bilans sił i momentów działających na człony sąsiadujące ze złączem.

$${}^i\mathbf{f}_i = {}^i\mathbf{R}_{i+1} \quad {}^{i+1}\mathbf{f}_{i+1} + {}^i\mathbf{F}_i \quad 3.10$$

$${}^i\mathbf{n}_i = {}^i\mathbf{N}_i + {}^i\mathbf{R}_{i+1} \quad {}^{i+1}\mathbf{n}_{i+1} + {}^i\mathbf{P}_{c_i} \times {}^{i+1}\mathbf{F}_{i+1} + {}^i\mathbf{P}_{i+1} \times {}^i\mathbf{R}_{i+1} \quad {}^{i+1}\mathbf{f}_{i+1} \quad 3.11$$

$$\boldsymbol{\tau}_i = {}^i\mathbf{n}_i^T \quad {}^i\hat{\mathbf{Z}}_i \quad 3.12$$

Gdzie:

- ${}^i\boldsymbol{\omega}_i$, ${}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i$, ${}^i\mathbf{v}_i$, ${}^i\dot{\mathbf{v}}_i$ – prędkości oraz przyspieszenia kątowe i liniowe członu,
- ${}^{i+1}\mathbf{R}_i$ – macierz rotacji z i -tego układu do $i+1$ -szego układu odniesienia,
- ${}^{i+1}\hat{\mathbf{z}}_{i+1}$ – wersor osi złącza wyrażony w $i+1$ -szym układzie odniesienia,
- Θ_{i+1} , $\dot{\Theta}_{i+1}$, $\ddot{\Theta}_{i+1}$ – przemieszczenie, prędkość i przyspieszenie kątowe złącza,
- ${}^i\mathbf{P}_{i+1}$ – wektor przemieszczenia z $i+1$ -szego układu do i -tego układu odniesienia,
- ${}^i\mathbf{P}_{C_i}$ – wektor przemieszczenia środka masy i -tego członu,
- ${}^i\mathbf{F}_i$ – siła inercyjna działająca na środek masy i -tego członu,
- ${}^i\mathbf{f}_i$ – siła działająca na i -ty człon przez człon poprzedni,
- ${}^i\mathbf{N}_i$ – moment siły działający na środek masy i -tego członu,
- ${}^i\mathbf{n}_i$ – moment siły inercji działający na i -ty człon przez człon poprzedni,
- $\boldsymbol{\tau}_i$ – wymagany moment na złączu

Do zastosowania algorytmu zakłada się, że $\Theta_i, \dot{\Theta}_i, \ddot{\Theta}_i$ są znane, ${}^0\boldsymbol{\omega}_0 = {}^0\dot{\boldsymbol{\omega}}_0 = 0$, a wektor ${}^0\dot{\mathbf{v}}_0$ jest skierowany ku „górze” układu odniesienia i równy wartości przyspieszenia ziemskiego.

Po przeprowadzeniu obliczeń z wykorzystaniem narzędzia MATLAB Symbolic Math Toolbox, otrzymano model dynamiki prostej w postaci:

$$\tau_1 = \frac{m_{bark} \cdot \ddot{\Theta}_1 \cdot r_{noga}^2 - g \cdot l_{noga} \cdot m_{noga} \cdot \sin \Theta_1 - 3 \cdot g \cdot l_{noga} \cdot m_{noga} \cdot \cos \Theta_2 \cdot \sin \Theta_1}{2}$$

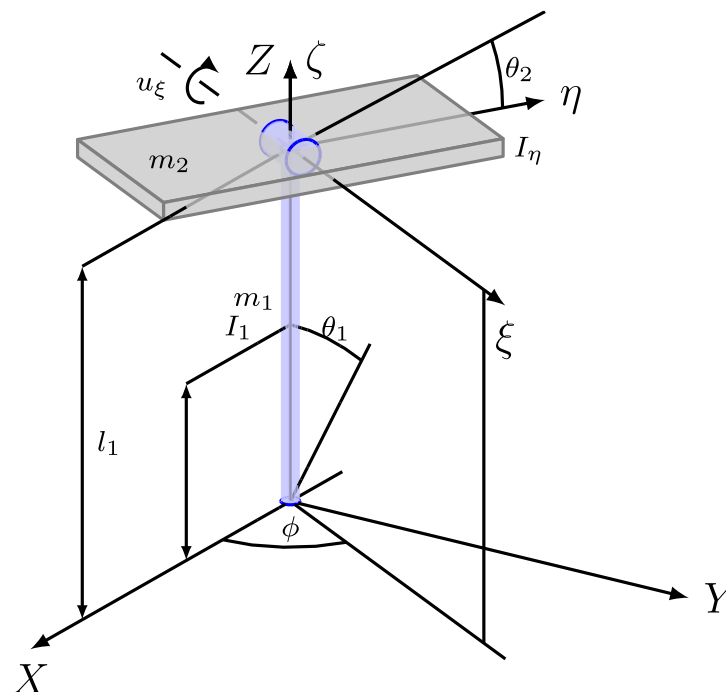
$$\tau_2 = \frac{1}{12} \left(m_{noga} \cdot \left(38 \cdot l_{noga}^2 \cdot \ddot{\Theta}_1 + 32 \cdot l_{noga}^2 \cdot \ddot{\Theta}_2 + 10 \cdot l_{noga}^2 \cdot \ddot{\Theta}_3 + 6 \cdot r_{noga}^2 \cdot \ddot{\Theta}_1 + 6 \cdot r_{noga}^2 \cdot \ddot{\Theta}_2 + 3 \cdot r_{noga}^2 \cdot \ddot{\Theta}_3 + 18 \cdot l_{noga}^2 \cdot \dot{\Theta}_1 \cdot \cos \Theta_3 + 18 \cdot l_{noga}^2 \cdot \dot{\Theta}_1^2 \cdot \sin \Theta_3 - 6 \cdot g \cdot l_{noga} \cdot \cos \Theta_1 \cdot \sin \Theta_2 - 18 \cdot g \cdot l_{noga} \cdot \cos \Theta_1 \cdot \cos \Theta_2 \cdot \sin \Theta_3 - 18 \cdot g \cdot l_{noga} \cdot \cos \Theta_1 \cdot \cos \Theta_3 \cdot \sin \Theta_2 \right) \right)$$

$$\tau_3 = \frac{1}{12} \left(m_{noga} \cdot \left(10 \cdot l_{noga}^2 \cdot \ddot{\Theta}_1 + 10 \cdot l_{noga}^2 \cdot \ddot{\Theta}_2 + 4 \cdot l_{noga}^2 \cdot \ddot{\Theta}_3 + 3 \cdot r_{noga}^2 \cdot \ddot{\Theta}_1 + 3 \cdot r_{noga}^2 \cdot \ddot{\Theta}_2 + 3 \cdot r_{noga}^2 \cdot \ddot{\Theta}_3 + 6 \cdot l_{noga}^2 \cdot \dot{\Theta}_1 \cdot \cos \Theta_3 + 6 \cdot l_{noga}^2 \cdot \dot{\Theta}_1^2 \cdot \sin \Theta_3 - 6 \cdot g \cdot l_{noga} \cdot \cos \Theta_1 \cdot \cos \Theta_2 \cdot \sin \Theta_3 - 6 \cdot g \cdot l_{noga} \cdot \cos \Theta_1 \cdot \cos \Theta_3 \cdot \sin \Theta_2 \right) \right)$$

3.4 Model matematyczny zjawiska

Analizując konstrukcję robota i postawione zagadnienie stabilizacji na dwóch nogach, można dojść do wniosku, że zachowanie robota przypomina niejako odwrócone wahadło. Biorąc pod uwagę stosunkowo niewielkie rozmiary konstrukcji, przedstawiony problem można analizować jako koło reakcyjne i związane z nim wahadło odwrócone, gdzie korpus robota będzie pełnił rolę koła reakcyjnego, zaś kończyny wsporne imitują wspomniane wahadło [12]. Zakłada się schemat odwzorowujący zachowanie robota, który prezentuje rysunek 6. Przyjęto oznaczenia:

- θ_1 – kąt nachylenia kończyn wspornych wokół osi X,
- θ_2 – względny kąt obrotu między korpusem a kończynami wspornymi wokół osi ξ ,
- θ_3 – bezwzględny kąt nachylenia korpusu do osi ξ ,
- I_1 – moment bezwładności kończyn wspornych wokół osi X,
- I_η – moment bezwładności korpusu wokół osi η ,
- m_1, m_2 – masa kończyn wspornych i korpusu,
- l_1 – całkowita długość kończyny wspornej,
- h_1 – pozycja środka masy kończyny wspornej,
- u_ξ – moment siły na złączu kinematycznym nogi przy korpusie,
- ϕ – kąt między osią X oraz osią ξ gdy robot stoi pionowo.



Rysunek 6 Model wahadła odwróconego z kołem reakcyjnym
Opracowanie własne: Sketch, LaTeX

Równania ruchu powyższego modelu przyjmują następującą postać:

$$\begin{aligned} (I_1 + m_1 h_1^2 + m_2 l_1^2 + I_\eta \sin^2 \phi) \ddot{\theta}_1 - (m_1 h_1 + m_2 l_1) g \theta_1 &= u_\xi \cos \phi \\ I_\xi (\ddot{\theta}_1 \cos \phi + \ddot{\theta}_2) &= u_\xi \end{aligned} \quad 3.13$$

Zaś kąt θ_1 można opisać następującą zależnością geometryczną:

$$\theta_1 = \frac{\theta_3 - \theta_2}{\cos \phi} \quad 3.14$$

Co finalnie daje układ równań różniczkowych w postaci równania 3.15, gdzie kontrolę nad systemem sprawuje moment u_ξ sterowany zależnością daną przez równanie 3.16:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A X + b u_\xi \\ X &= [\theta_2 \quad \theta_3 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3]^T \end{aligned} \quad 3.15$$

$$u_\xi = -k^T X \quad 3.16$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{g(h_1 m_1 + l_1 m_2)}{\sigma_1} & -\frac{g(h_1 m_1 + l_1 m_2)}{\sigma_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{I_\xi} + \frac{\cos \phi}{\sigma_1} \\ \frac{1}{I_\xi} \end{bmatrix}$$

$$\sigma_1 = m_1 h_1^2 + m_2 l_1^2 + I_\eta \sin^2 \phi + I_1$$

Dzięki powyższym równaniom, wyznaczono macierzową postać równań stanu w postaci:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A x + b u \\ y &= C x + d u \end{aligned} \quad 3.17$$

Gdzie:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{g(h_1 m_1 + l_1 m_2)}{\sigma_1} & -\frac{g(h_1 m_1 + l_1 m_2)}{\sigma_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{I_\xi} + \frac{\cos \phi}{\sigma_1} \\ \frac{1}{I_\xi} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$x = [\theta_2 \quad \theta_3 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3]^T$$

4 Sterowanie i symulacje

W celu przeanalizowania zachowania wyprowadzonego w rozdziale 3 modelu przeprowadzono serię symulacji. Do ich przeprowadzenia należało zdefiniować wartości, wykorzystywanych w obliczeniach analitycznych, parametrów. Definiując wspomniane wartości inspirowano się, w miarę możliwości, parametrami robota skonstruowanego w ramach grupy projektowej wspomnianej w rozdziale 1.

Tabela 2 Parametry symulacji wahadła i robota

Parametr	Opis	Wartość	
m_1	Masa korpusu	0.3	[kg]
m_2	Masa dwóch kończyn	0.14	[kg]
l_1 $= 2 \cdot l_{noga}$	Całkowita długość kończyny	0.1	[m]
h_1	Dystans od środka masy do końca kończyny	0.05	[m]
r_{noga}	Promień kończyny (walca)	0.005	[m]
l_{biodro}	Dystans między złączami obrotowymi tworzącymi biodro	0	[m]
l_{korp}	Długość korpusu	0.12	[m]
w_{korp}	Szerokość korpusu	0.08	[m]
h_{korp}	Wysokość korpusu	0.01	[m]
ϕ	Kąt między osią X oraz osią ξ	56.31	[°]
I_1	Moment bezwładności dwóch kończyn wokół osi X	$4.6754 \cdot 10^{-6}$	[kg · m ²]
I_η	Moment bezwładności korpusu wokół osi η	$1.6250 \cdot 10^{-4}$	[kg · m ²]
I_ξ	Moment bezwładności korpusu wokół osi ξ	$3.6250 \cdot 10^{-4}$	[kg · m ²]
g	Wartość przyspieszenia ziemskiego	9.81	[$\frac{m}{s^2}$]
τ_{max}	Maksymalna wartość momentu wykorzystanych serwomechanizmów	0.3825	[N · m]
μ_s	Współczynnik tarcia statycznego	0.7	

4.1 Wykorzystywane środowisko symulacyjne

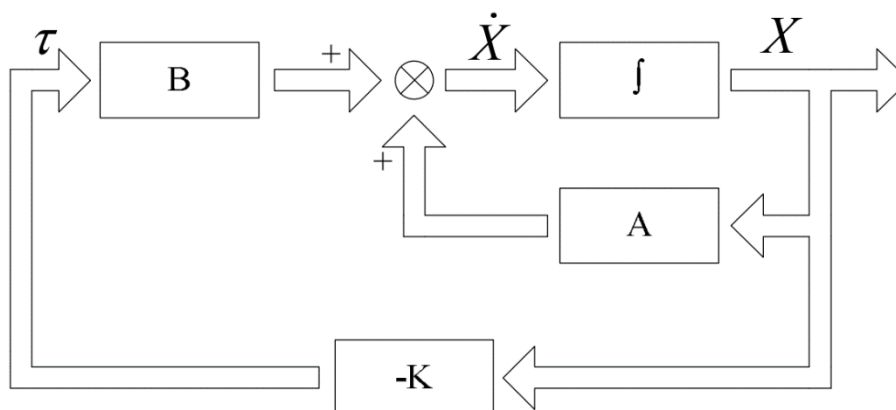
Symulację wyprowadzonego w rozdziale 3.4 modelu matematycznego przeprowadzono z wykorzystaniem platformy Simulink będącej częścią interaktywnego środowiska programistyczno-obliczeniowego MATLAB.

Do przeprowadzenia symulacji zachowania uproszczonego modelu robota wykorzystano pakiet Simscape Multibody [13], będący dodatkiem do wspomnianej wcześniej platformy Simulink. Pakiet, dzięki odwzorowaniu sił wewnętrznych oraz symulacji sił zewnętrznych, które mogą mieć wpływ na badany system, pomaga w procesie projektowania konstrukcji układów jak i systemów sterowania im dedykowanych.

Wykorzystując środowisko graficzne, za pomocą konfigurowalnych bloków programowych, budowany jest model symulacyjny, uwzględniający zdefiniowane przez użytkownika zachowanie badanego układu. Jednocześnie, użytkownik może połączyć wspomniany model z dodatkowymi funkcjonalnościami dzięki możliwości wywoływania kodu języka MATLAB wewnątrz symulacji. Całość jest wizualizowana w trójwymiarowym środowisku dzięki wykorzystaniu wbudowanego interfejsu graficznego.

4.2 Sterowanie modelem wahadła

Kontrolę nad układem przedstawionym w rozdziale 3.4 sprawuje regulator liniowo-kwadratowy, który w zadaniu sterowania wykorzystuje sprzężenie zwrotne stanu układu.



Rysunek 7 Schemat blokowy analizowanego układu z regulatorem bazującym na sprzężeniu zwrotnym [14]

Sterowanie układem, w przypadku wspomnianego regulatora, wyznacza się poprzez wymnożenie macierzy stanu układu X z macierzą sprzężenia K ze znakiem ujemnym:

$$u(t) = -K x(t) \quad 4.1$$

Celem regulatora liniowo-kwadratowego jest znalezienie optymalnej macierzy wzmocnienia K , która pozwoli na minimalizację funkcjonału kwadratowego stanowiącego funkcję kosztu [15]:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t)) dt \quad 4.2$$

Gdzie:

- R – dodatnio określona, symetryczna macierz kosztu sterowania,
- Q – dodatnio półokreślona, symetryczna macierz kosztu stanu.

W celu znalezienia optymalnej, z punktu widzenia sterowania układem, macierzy $K = R^{-1}BP$ należy rozwiązać algebraiczne równanie Riccatiego w postaci:

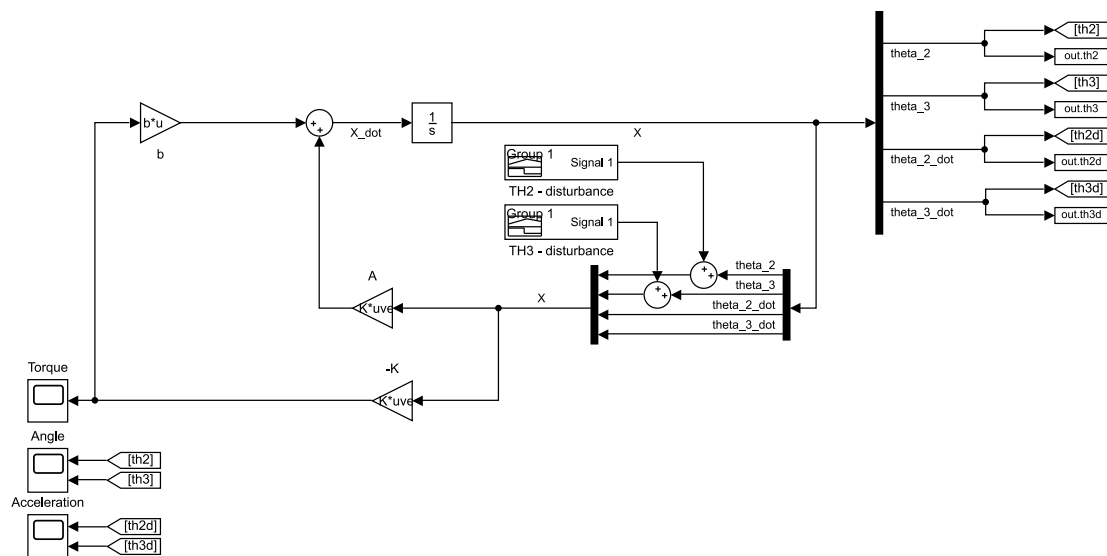
$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad 4.3$$

Pomimo dobrego zrozumienia zagadnienia optymalizacji regulatora liniowo-kwadratowego w środowisku akademickim, dobór wag stanowiących o postaci macierzy Q i R jest tematem bardzo obszernym, zatem nie zostanie on poruszony w opisie tego projektu. Na potrzeby eksperymentów przyjęto następujące wartości macierzy kosztów:

$$Q = C^T C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, R = 1$$

Dzięki temu, korzystając z środowiska MATLAB i funkcji `lqr`, wyznaczono optymalne wartości macierzy K w problemie LQR:

$$K = [2.5635 \quad -3.977 \quad 0.1521 \quad -0.45]$$

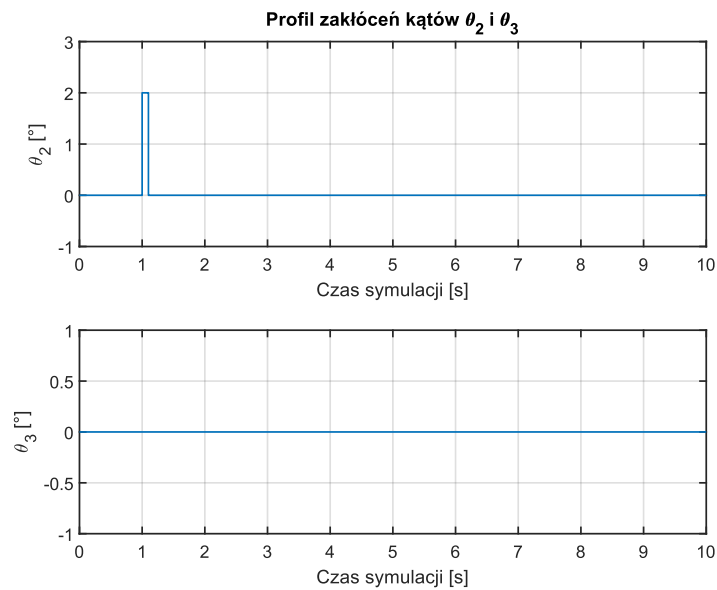


Rysunek 8 Schemat modelu symulacyjnego wahadła odwróconego z kołem zamachowym
Opracowanie własne: Simulink

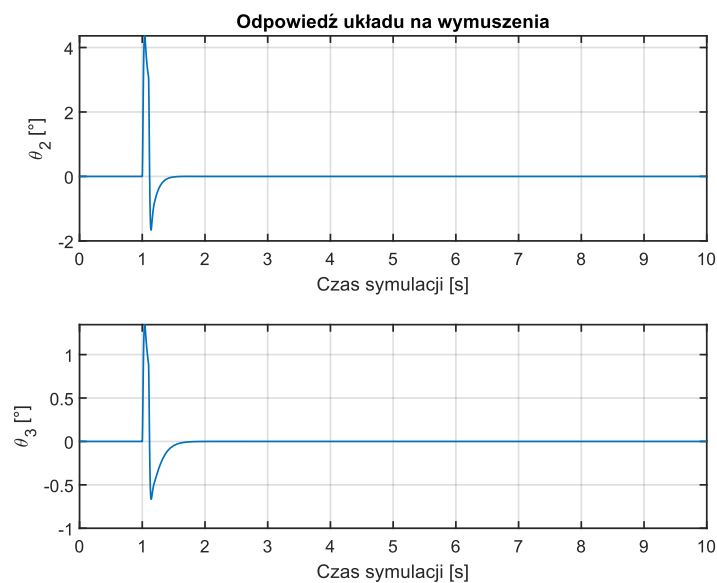
Badając zachowanie modelu, wychylano go z położenia równowagi w trakcie trwania symulacji korzystając z bloków oznaczonych jako *TH2 – disturbance* oraz *TH3 – disturbance*. Bloki te pozwalały dodać dowolnie zdefiniowany profil zakłócenia kątów θ_2 i θ_3 .

Przeprowadzono symulację dla następujących profili zakłóceń:

- 1) Impuls o amplitudzie 2 stopni na kącie θ_2 trwający 0.1 s:

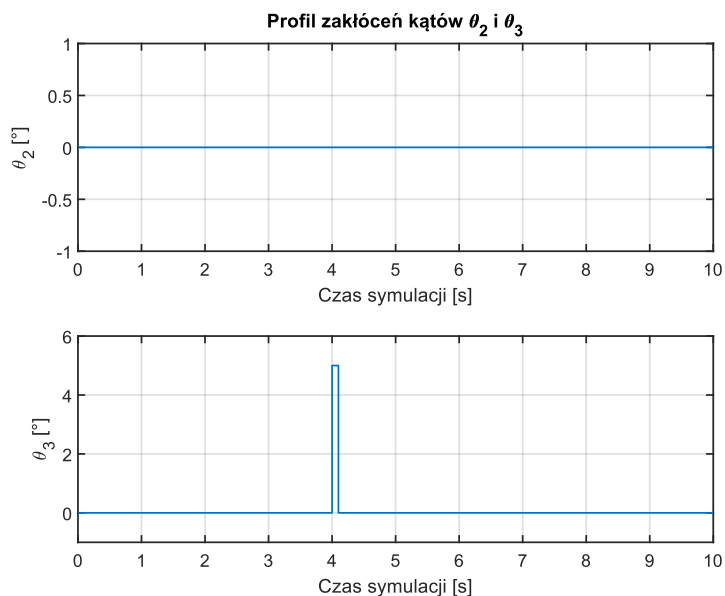


Rysunek 9 Profil zakłóceń kątów nr 1
Opracowanie własne: MATLAB

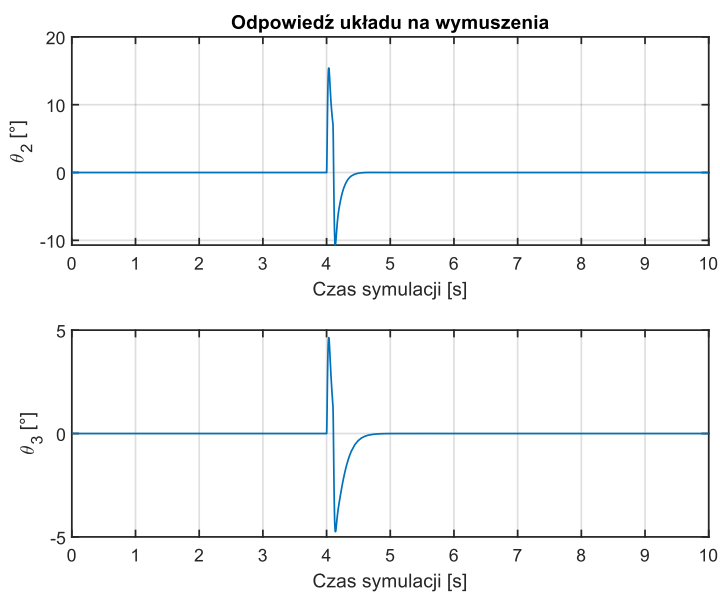


Rysunek 10 Odpowiedź układu na profil zakłóceń nr 1
Opracowanie własne: MATLAB

2) Impuls o amplitudzie 5 stopni na kącie θ_3 trwający 0.1 s:

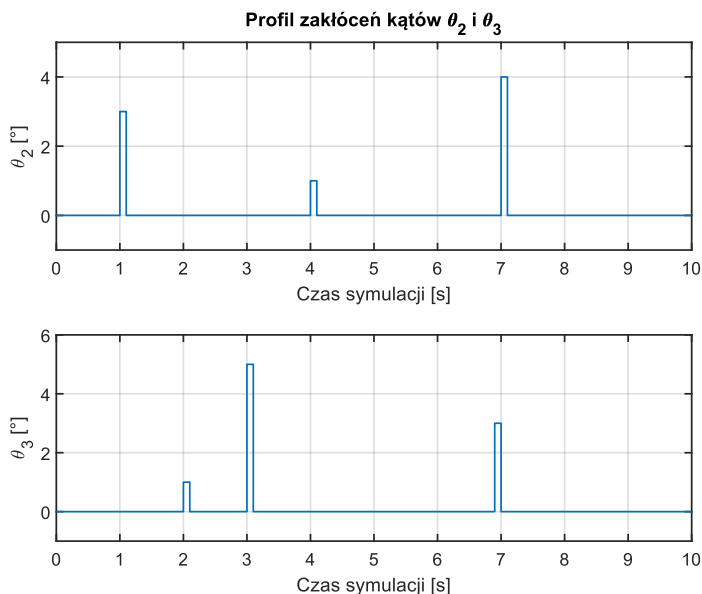


Rysunek 11 Profil zakłóceń kątów nr 2
Opracowanie własne: MATLAB

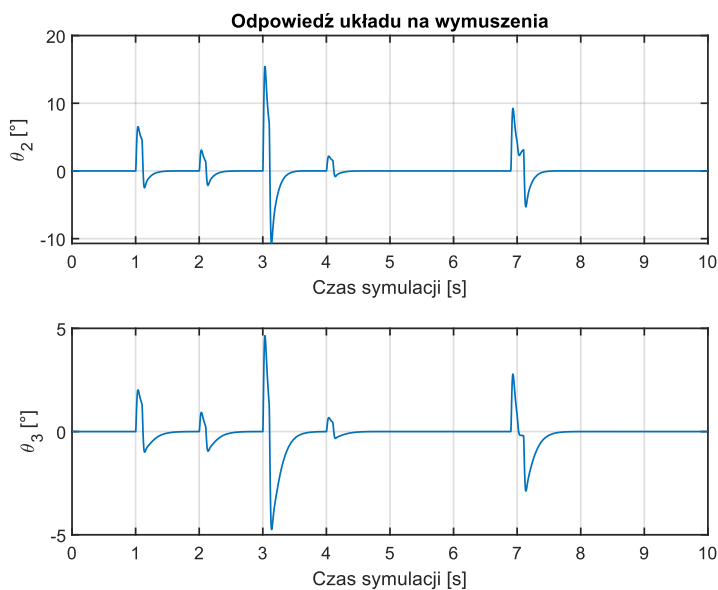


Rysunek 12 Odpowiedź układu na profil zakłóceń nr 2
Opracowanie własne: MATLAB

3) Seria impulsów o różnych amplitudach trwających 0.1 s:



Rysunek 13 Profil zakłóceń kątów nr 3
Opracowanie własne: MATLAB

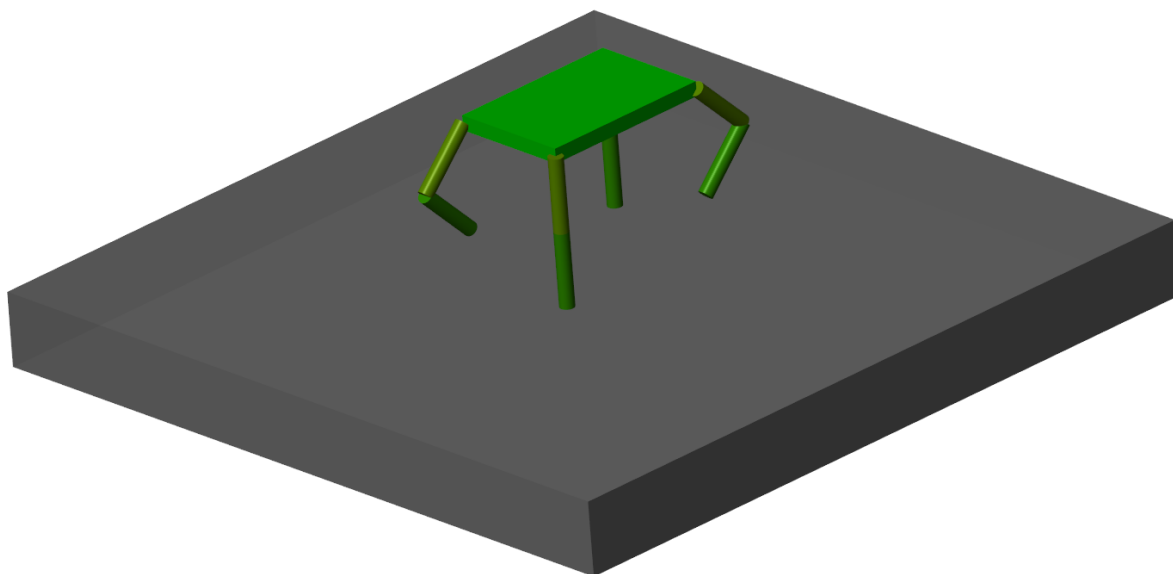


Rysunek 14 Odpowiedź układu na profil zakłóceń nr 3
Opracowanie własne: MATLAB

4.3 Symulacja zachowania robota

W celu zbadania poprawności odwzorowania zachowania robota przez model wahadła, zaprojektowano, z pomocą pakietu Simscape Multibody, uproszczoną konstrukcję robota, którą prezentuje rysunek 15. Korpus robota posiada 6 stopni swobody względem globalnego układu odniesienia. Dolne części kończyn oraz korpus robota implementują mechanizm

wykrywania kolizji z nieruchomym, względem globalnego układu odniesienia, podłożem. Rysunki 16 – 20 prezentują schematy systemu symulacyjnego robota.

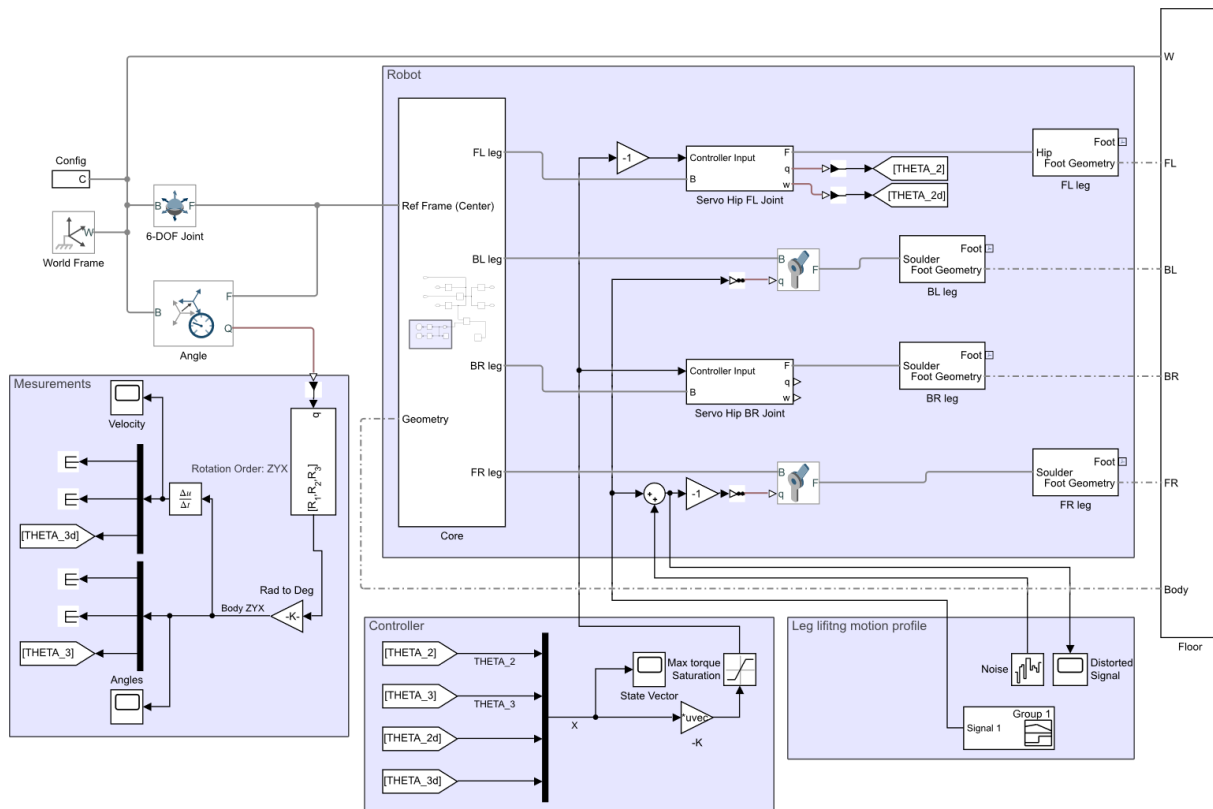


**Rysunek 15 Wizualizacja uproszczonej konstrukcji robota w pakiecie Simscape Multibody
Opracowanie własne: Simulink**

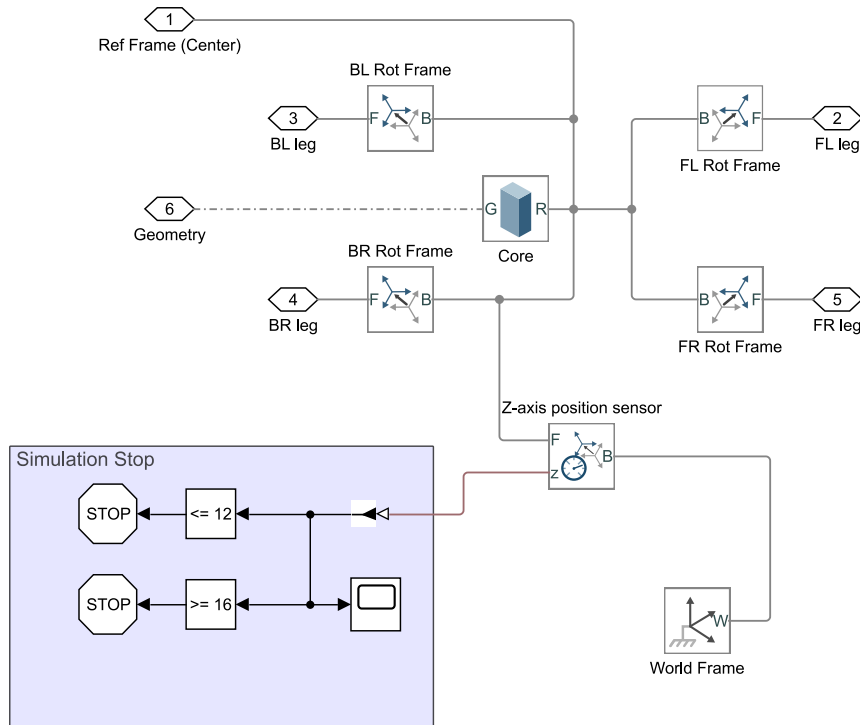
Do stabilizacji robota wykorzystuje się biodrowe złącza kinematyczne robota oznaczone na schemacie kinematycznym (rysunek 5) jako kąty Θ_4 oraz Θ_{10} . Ten sposób możliwie maksymalnie oddaje się zachowanie wyznaczonego wcześniej modelu wahadła odwróconego.

Na każde ze złącz podawana jest połowa, wyznaczonego przez kontroler, momentu siły, w celu próby stabilizacji robota. Moment ten jest również ograniczony przez blok *Max torque Saturation*, w celu dostosowania symulacji do serwomechanizmów wykorzystanych do skonstruowania robota. Z uwagi na przyjęte w modelu symulacyjnym układy odniesienia, w szczególności wspólny kierunek i zwrot osi obrotu, wymagane jest odwrócenie znaku momentu na jednym ze złącz.

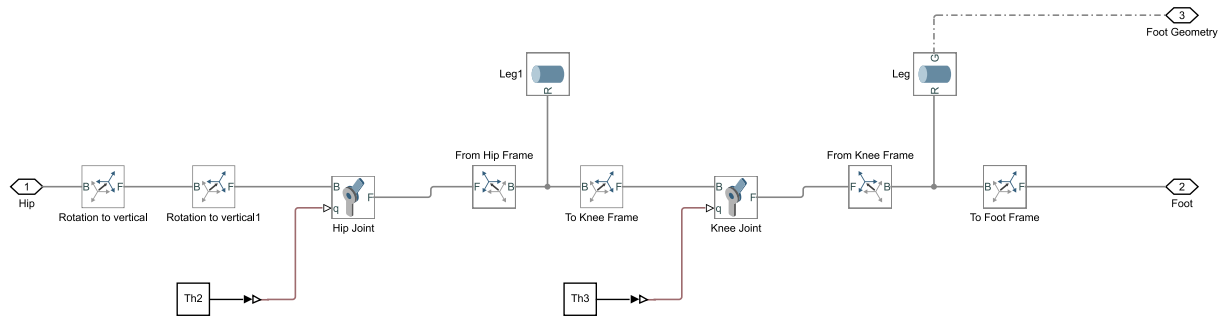
Do przeprowadzenia testów zachowania robota generowana jest trajektoria kątów złącz biodrowych zmieniających układ uniesionych kończyn. Dodatkowo, aby wprowadzić formę destabilizacji ruchu i oddać tym samym nieidealne warunki i nieściśłości między modelem symulacyjnym a faktyczną konstrukcją, jedna z trajektorii jest zakłócana białym szumem. Rysunek 16 zawiera wykorzystany w tym celu blok oznaczony na jako *Noise*. Moc szumu, określona jako amplituda widmowej gęstości mocy sygnału, wynosi 0.07.



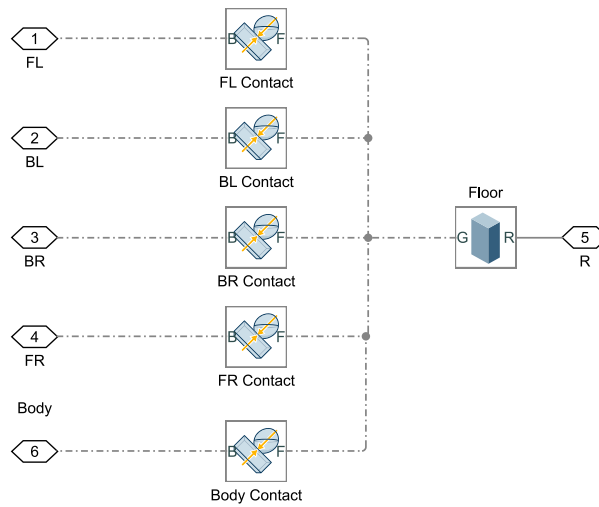
**Rysunek 16 Schemat modelu symulacyjnego uproszczonej konstrukcji robota
Opracowanie własne: Simulink**



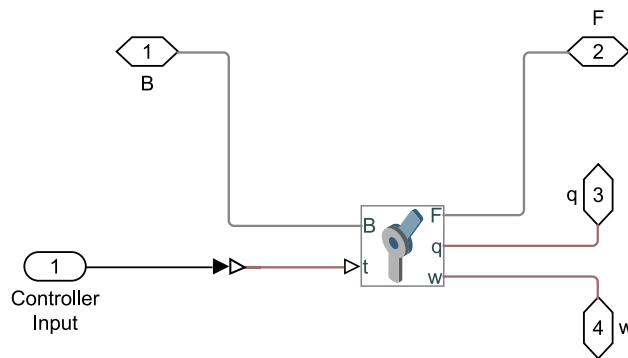
**Rysunek 17 Schemat subsystemu Core reprezentującego korpus robota
Opracowanie własne: Simulink**



Rysunek 18 Schemat subsystemu *FL* leg reprezentującego jedną z kończyn robota
Opracowanie własne: Simulink



Rysunek 19 Schemat wnętrza subsystemu *Floor* reprezentującego podłogę i mechanikę kolizji
Opracowanie własne: Simulink

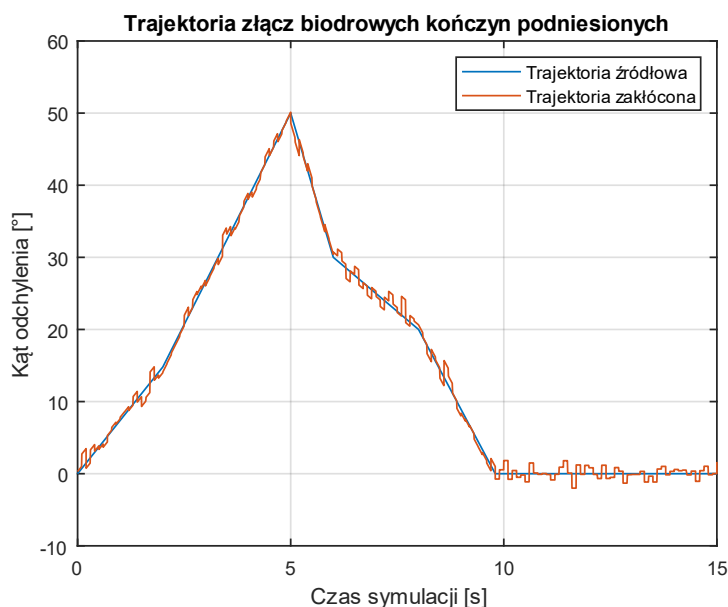


Rysunek 20 Schemat subsystemu *Servo Hip FL Joint* reprezentującego złącze kinematyczne stabilizujące
Opracowanie własne: Simulink

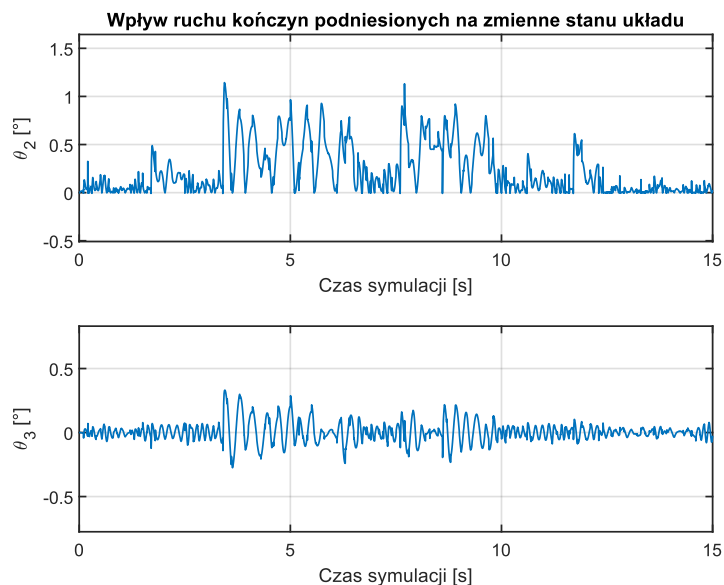
Przeprowadzono symulacje dla następujących scenariuszy testowych:

1) Jednoczesne uniesienie boczne kończyn z zakłóceniami na jednym złączy:

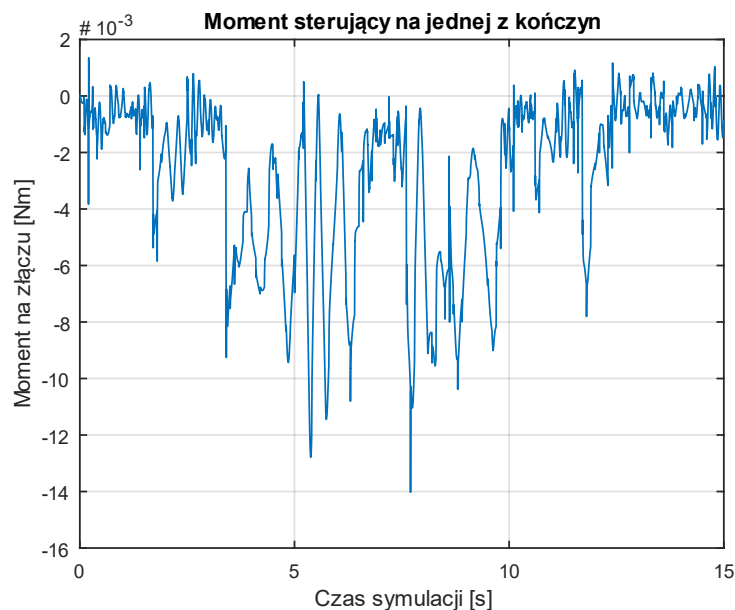
Kończyny, uniesione nad ziemią dzięki zgięciu w złączy kolanowym i drugim złączy biodrowym jak na rysunku 15, są podnoszone równoległe, wzdłuż osi Y_0 w kierunkach odchodzących od korpusu, do wychylenia wynoszącego 50 stopni. Trajektoria jednej z kończyn jest zakłócona białym szumem, co skutkuje większą destabilizacją konstrukcji – kończyna jest dość szybko odchylana o różnicę do około 2 stopni. Scenariusz ten przedstawia stosunkowo spokojny proces podnoszenia i opuszczania kończyn. Dzięki wykorzystaniu zakłóceń na jednym ze złączy zwiększa się wymagania stawiane regulatorowi.



Rysunek 21 Trajektoria kątowa kończyn podniesionych dla scenariusza testowego nr 1
Opracowanie własne: MATLAB



Rysunek 22 Odchylenie kątów zgodnych z modelem wahadła dla scenariusza testowego nr 1
Opracowanie własne: MATLAB

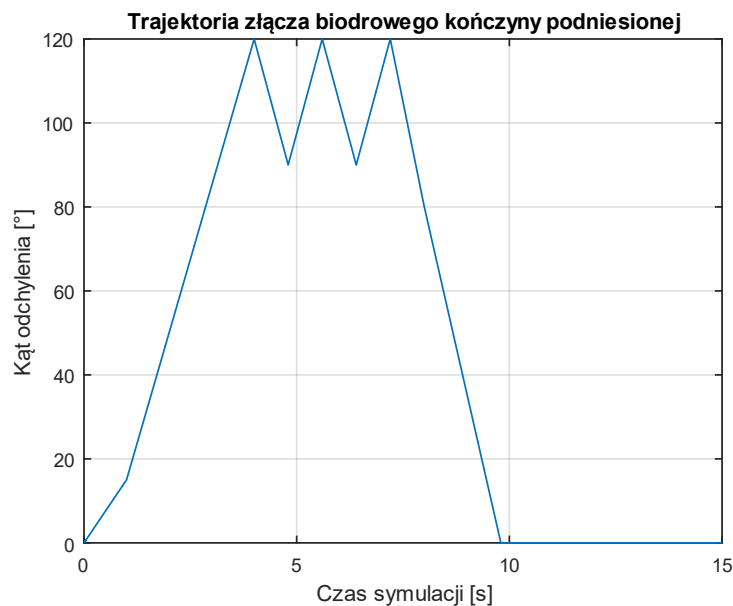


Rysunek 23 Moment sterujący na pojedynczym złączu dla scenariusza testowego nr 1
Opracowanie własne: MATLAB

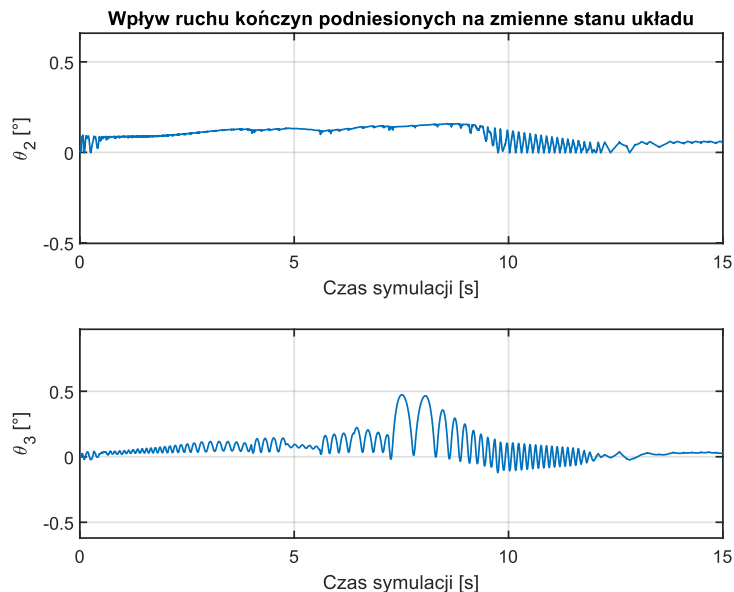
Analizując wykres momentu sterującego dostrzega się dość gwałtowne zmiany sygnału sterującego. Wynikają one najprawdopodobniej z uwagi na specyfikę realizacji sterowania kończynami podniesionymi i specyfikę symulacji zakłóceń. Wprowadzone przez biały szum odchyłki od trajektorii bazowej powodują gwałtowną zmianę kąta trajektorii na złączu. Wiąże się z tym duże przyspieszenie i moment na złączu kończyny przyspieszonej na co regulator reaguje odpowiednio szybko i z odpowiednią intensywnością.

2) Uniesienie boczne jednej z kończyn bez zakłóceń („machanie” kończyną):

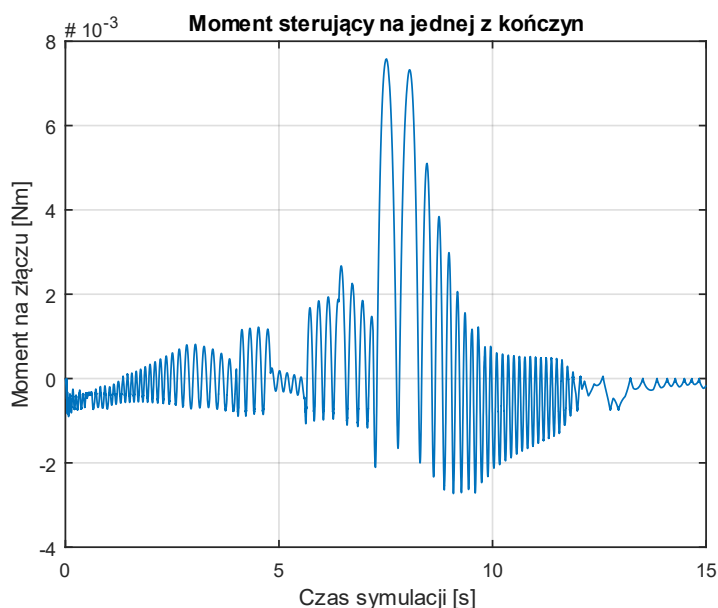
W tym scenariuszu testowym występuje całkowity brak symetryczności w konfiguracji robota. Podnoszona jest wyłącznie jedna kończyna, którą wykonuje się ruchy mające na celu imitację machania kończyną. W efekcie, ruchy wykonywane wspomnianą kończyną są dość gwałtowne. Jednocześnie sprawdzana jest reakcja regulatora na nagłe zmiany momentu oddziałującego na środek masy robota z spowodowane szybką zmianą kierunku ruchu kończyny podniesionej.



**Rysunek 24 Trajektoria kątowna kończyny podniesionej dla scenariusza testowego nr 2
Opracowanie własne: MATLAB**



Rysunek 25 Odchylenie kątów zgodnych z modelem wahadła dla scenariusza testowego nr 2
Opracowanie własne: MATLAB

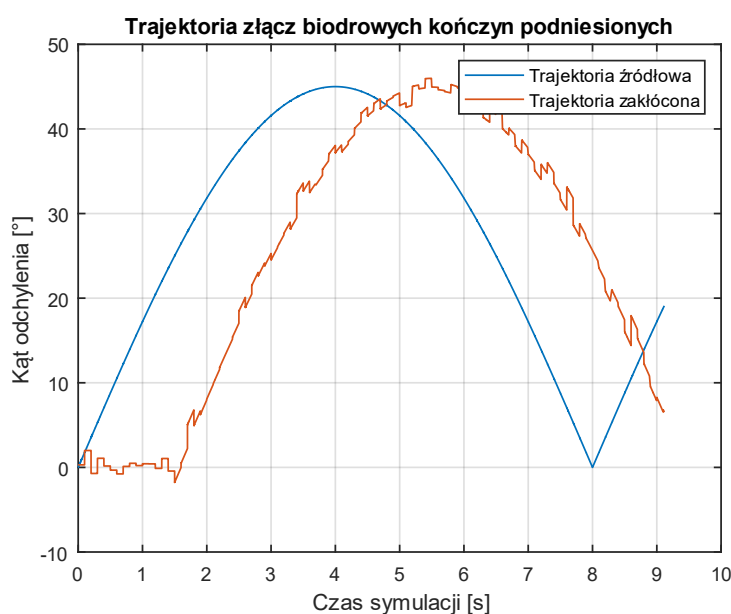


Rysunek 26 Moment sterujący na pojedynczym złączu dla scenariusza testowego nr 2
Opracowanie własne: MATLAB

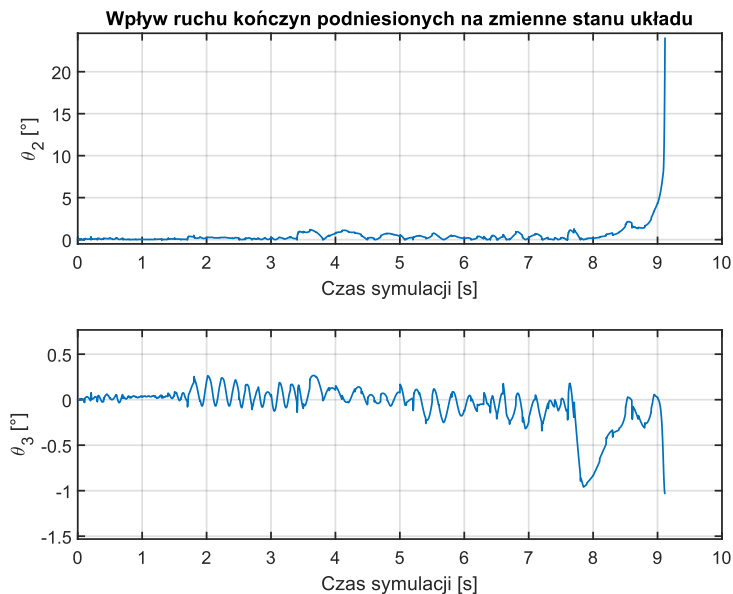
Przebieg momentu sterującego dla „machania” jedną z kończyn robota prezentuje stosunkowo spokojne zachowanie regulatora w przypadku pełnej asymetrii konfiguracji robota. Zryw następuje dopiero w momencie, gdy cała konstrukcja zaczyna się chwiać z rosnącą amplitudą drgań. Chwianie to wynika z gwałtownych zmian kierunku ruchu kończyn podniesionych, a co za tym idzie szybkich zmian momentów oddziałujących na konstrukcję robota.

3) Uniesienie boczne kończyn z 1.5 s opóźnieniem i zakłóceniami na jednym złązcu:

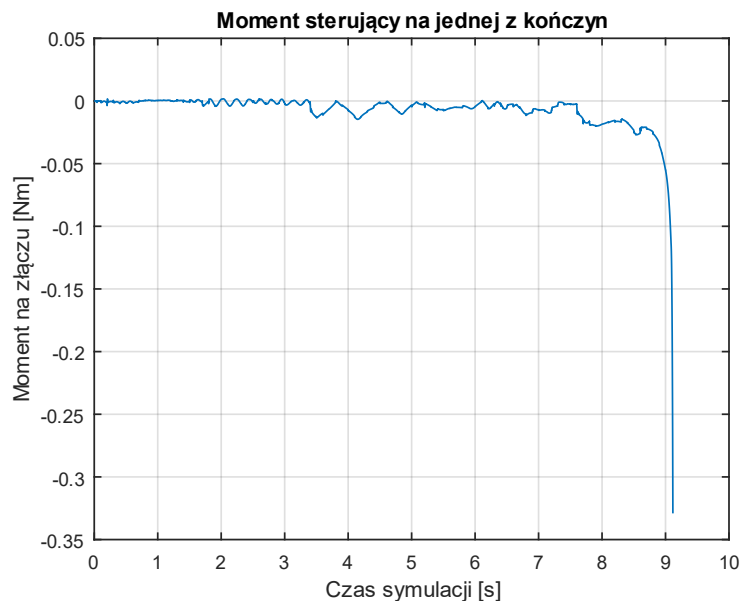
Prezentowany scenariusz jest niejako połączeniem obu poprzednich scenariuszy testowych – występuje tu dość spokojny ruch obu kończyn, lecz również dość gwałtowna zmiana kierunku ruchu kończyn. Ruch ten, choć podobny między dwiema kończynami, jest opóźniony o półtorej sekundy i zakłócony na jednej z nich. Ma to na celu sprawdzenie działania regulatora dla sytuacji, kiedy podniesione kończyny będą wykonywały ruchy w nieskoordynowany sposób a moment wypadkowy działający na korpus robota będzie podatny na dużo szybkich zmian.



Rysunek 27 Trajektoria kąta kończyn podniesionych dla scenariusza testowego nr 3
Opracowanie własne: MATLAB



Rysunek 28 Odchylenie kątów zgodnych z modelem wahadła dla scenariusza testowego nr 3
Opracowanie własne: MATLAB



Rysunek 29 Moment sterujący na pojedynczym złączu dla scenariusza testowego nr 3
Opracowanie własne: MATLAB

W trakcie scenariusza testowego nr 3 doprowadzono do upadku robota, na co złożyło się prawdopodobnie wiele czynników. Wstępna utrata stabilności wystąpiła zaraz przed nagłą zmianą kierunku ruchu jednej z podniesionych kończyn w 8 sekundzie symulacji. Spowodowało to dość istotne wychylenie na kącie θ_3 , na co kontroler zaczął reagować. Niestety, z uwagi na zakłócenia jakie panowały na sygnale trajektorii drugiej kończyny robota, kontroler zareagował zbyt gwałtownie, co skutkowało poślizgiem kończyn wspierających i finalnie upadkiem robota.

Przedstawione scenariusze testowe miały na celu przetestowanie mechanizmu stabilizacji robota w sytuacjach, które mogą przypominać realistyczne zachowanie naśladowanej jaszczurki pustynnej. Widoczna jest zadowalająca skuteczność regulatora sterującego przy wykonywaniu podstawowych operacji kończynami uniesionymi. Zauważane są jednak, w niektórych przypadkach, gwałtowne zmiany momentu sterującego, co sugeruje wysokie wymagania dotyczące dynamiki elementów wykonawczych robota.

5 Podsumowanie

Przedstawiony projekt dyplomowy podejmuje próbę rozwiązania problemu stabilizacji czworonożnego robota kroczącego w sytuacji, gdy stoi on na wyłącznie dwóch przeciwległych kończynach. Do osiągnięcia celu zaadaptowano problem niestabilności robota do zjawiska niestabilności wahadła odwróconego z kołem reakcyjnym. Korzystając z uproszczonego modelu zagadnienia, zaproponowano quasi optymalne wzmocnienie sprzężenia zwrotnego układu dla regulatora liniowo-kwadratowego. Wyznaczono również kinematykę i dynamikę prostą kończyn podniesionych przy asyście pakietu Symbolic Math Toolbox środowiska programistyczno-obliczeniowego MATLAB.

Ponadto, w celu weryfikacji skuteczności działania zaproponowanego regulatora, korzystając z możliwości wspomnianego wyżej narzędzia, zaprojektowano symulację zachowania uproszczonej konstrukcji robota w warunkach testowych. Przeprowadzono serię testów mających doprowadzić do destabilizacji robota i zbadania zachowania regulatora przy innym modelu dynamicznym.

Bazując na wynikach przeprowadzonych symulacji osiągnięto zadowalający efekt. Jednakże, wartym zauważenia jest fakt, iż przeprowadzone symulacje napotkałyby pewne ograniczenia przy próbie zastosowania w realnej konstrukcji. Największym zauważonym problemem jest kwestia przyjętego modelu sterowania momentem na elemencie wykonawczym robota. Sterowanie takie jest niezwykle trudne do osiągnięcia przy wykorzystaniu serwomechanizmów zastosowanych w realnej konstrukcji.

Jako perspektywy rozwoju zaprezentowanych prac, proponuje się próbę dodatkowej optymalizacji wykorzystanego kontrolera lub próbę zmniejszenia poziomu uproszczenia symulowanej konstrukcji robota i realizację zaproponowanego rozwiązania przy wykorzystaniu realnej konstrukcji. Dodatkowo, wartym rozważenia jest modyfikacja strategii stabilizującej i zaangażowanie w nią ruchów kończyn uniesionych.

6 Bibliografia

- [1] “This Lizard Must Dance to Stay Alive.” [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=joR4OL_mQnE. [Accessed: 25-Nov-2019].
- [2] E. Garcia and P. G. De Santos, “An improved energy stability margin for walking machines subject to dynamic effects,” *Robotica*, vol. 23, no. 1, pp. 13–20, Jan. 2005.
- [3] E. G. Armada, J. Estremera, and P. G. de Santos, “A classification of stability margins for walking robots,” 2002.
- [4] Y. Jia, X. Luo, B. Han, G. Liang, J. Zhao, and Y. Zhao, “Stability Criterion for Dynamic Gaits of Quadruped Robot,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 12, p. 2381, Nov. 2018.
- [5] B. Siciliano and O. Khatib, Eds., *Springer Handbook of Robotics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [6] R. B. McGhee and A. A. Frank, “On the stability properties of quadruped creeping gaits,” *Math. Biosci.*, vol. 3, pp. 331–351, Aug. 1968.
- [7] X. Li, J. Gao, Q. Huang, H. Lu, Z. Xu, and Y. Liu, “A new control method of quadruped robot walking on rough terrain based on linear inverted pendulum method,” in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE ROBIO 2014*, 2014, pp. 2410–2415.
- [8] M. Liu, D. Qu, F. Xu, F. Zou, P. Di, and C. Tang, “Quadrupedal robots whole-body motion control based on centroidal momentum dynamics,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 7, Apr. 2019.
- [9] R. N. Jazar, *Theory of Applied Robotics*. Boston, MA: Springer US, 2010.
- [10] L. Tsai, “Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators,” *The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. p. 520, 1999.
- [11] J. J. Craig, P. Prentice, and P. P. Hall, “Introduction to Robotics Mechanics and Control Third Edition,” 2005.
- [12] T. Emura and A. Arakawa, “Attitude control of a quadruped robot during two legs supporting,” 2002, pp. 711–716 vol.1.
- [13] “Simscape Multibody - MATLAB & Simulink.” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/simmechanics.html>. [Accessed: 20-Dec-2019].
- [14] J. Meng, Y. Li, and B. Li, “A Dynamic Balancing Approach for a Quadruped Robot Supported by Diagonal Legs,” *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, 2015.
- [15] A. Szyber, “Zadanie z kwadratowym wskaźnikiem jakości - regulator LQR.”