

AGH

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE
WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I INŻYNIERII
BIOMEDYCZNEJ

Projekt dyplomowy

Model dynamiczny egzoszkieletu

Dynamic model of exoskeleton

Autor:
Kierunek studiów:
Opiekun pracy:

Hubert Milanowski
Automatyka i Robotyka
dr hab. inż. Adam Piłat, prof. uczelni

Kraków, 2020

Spis treści

1. Wprowadzenie	7
1.1. Egzoszkielet jako szczególny przykład robotyki mobilnej	7
1.2. Biomechaniczne aspekty chodu człowieka	9
1.3. Cel pracy	10
1.4. Zakres pracy	10
2. Stan wiedzy	11
2.1. Model wahadła odwróconego.....	11
2.2. Model ZMP	12
2.3. Model mechaniczny.....	13
2.4. Podsumowanie.....	14
3. Model kinematyczny	15
3.1. Łańcuch kinematyczny	15
3.2. Zadanie kinematyki prostej	16
3.3. Zadanie proste kinematyki prędkości	17
4. Modelowanie systemów dynamicznych	19
4.1. Układ dynamiczny	19
4.2. Modelowanie dynamiki układów robotycznych.....	20
5. Charakterystyka modelowanego obiektu	23
5.1. Konstrukcja mechaniczna	23
5.2. Kinematyka układu.....	24
6. Identyfikacja własności dynamicznych chodu człowieka	27
6.1. Opis doświadczenia	27
6.2. Algorytm identyfikacji.....	28
6.3. Interpretacja wyników doświadczenia	29
7. Model dynamiczny	33
8. Symulacja numeryczna	39
8.1. Zredukowany model systemu	39
8.2. Pakiet obliczeniowy MATLAB	40

8.3. Pakiet MATLAB Simulink Simscape Multibody	44
9. Podsumowanie	51
9.1. Kierunki dalszych badań	51

1. Wprowadzenie

Robotyka jako nauka zajmuje się zagadnieniami odwzorowywania zachowań człowieka przez maszyny. Znakomity rozwój robotyki na potrzeby przemysłu rozpoczął się wraz z początkiem lat 70. poprzedniego wieku. Automatyzacja procesów w celu zwiększenia efektywności linii przemysłowych przyswieceła zarówno inżynierom, jak i wpisywała się w trend rozwijającego się kapitalizmu. Jednocześnie rozwijana fascynacja budowania urządzeń w pełni odwzorowujących zachowania człowieka takie jak chód zapoczątkowała nową gałąź - robotykę mobilną.

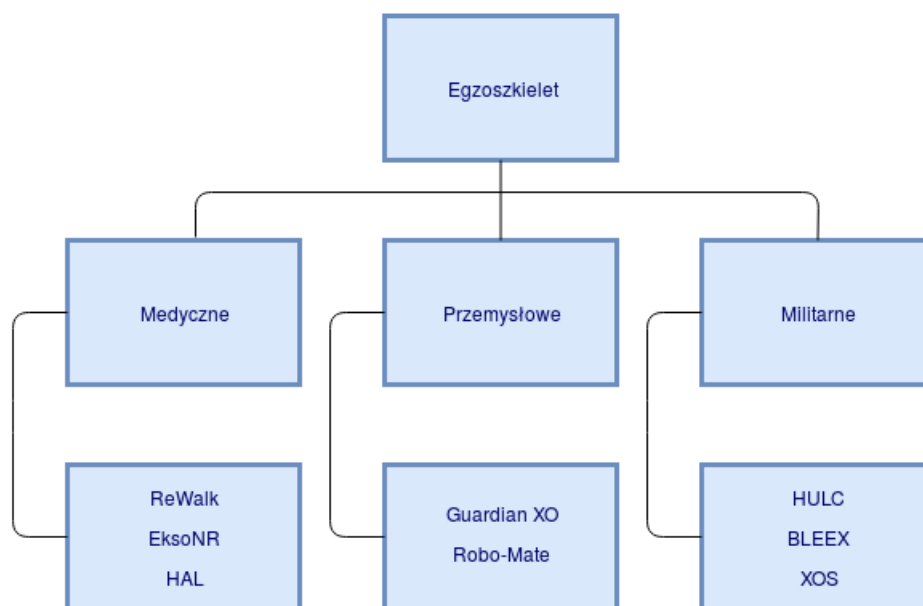
W ramach projektu dyplomowego pochyłono się nad zagadnieniem modelowania dynamicznego robota bionicznego wspomagającego poruszanie kończyn dolnych człowieka, zaprojektowanego w ramach pracy dyplomowej przez studentów wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie [1], [2]. Projekty dyplomowe są częścią interdyscyplinarnej współpracy pomiędzy Wydziałem Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej i Wydziałem Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie pod opieką dr hab. inż. Adama Piłata oraz dr inż. Krystiana Szopy.

1.1. Egzoszkielet jako szczególny przykład robotyki mobilnej

Egzoszkielet to zautomatyzowane urządzenie mobilne wspomagające zdolności motoryczne człowieka. W początkowej fazie rozwoju szkielety bioniczne wykorzystywane były przez wojsko do celów militarnych. Wraz z ciągłym rozwojem i udoskonalaniem technologii zostały zaadaptowane do zastosowań przemysłowych oraz medycznych.

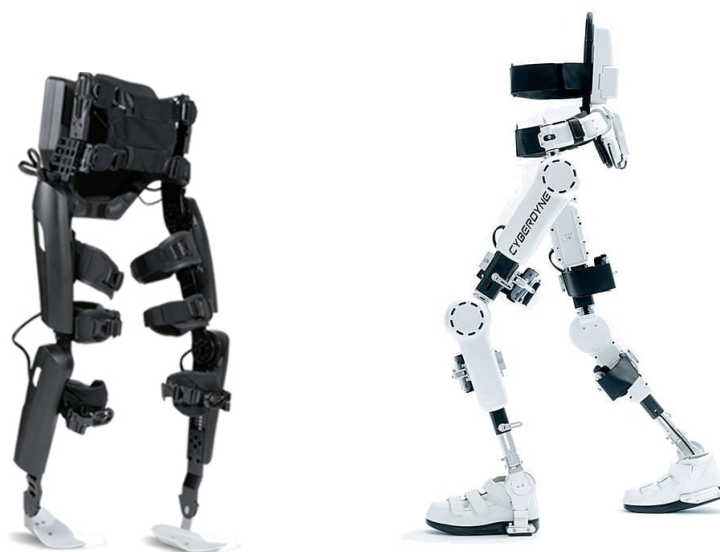
W społeczeństwie występuje problem dysfunkcji układu ruchowego. Z tego powodu wynikła potrzeba zaprojektowania urządzenia mogącego poprawić jakość życia osób dotkniętych wspomnianymi problemami. Ciągły rozwój technologii półprzewodnikowych oraz idący za nią rozwój obliczeń numerycznych umożliwia implementację coraz bardziej skomplikowanych algorytmów sterowania cyfrowego w celu zapewnienia stabilnej pracy urządzenia w zmiennych warunkach.

W literaturze wyróżniono trzy podzbiory robotów typu egzoszkielet klasyfikując je pod kątem zastosowań, są to: egzoszkielety wojskowe, przemysłowe oraz medyczne.



Rys. 1.1. Klasyfikacja egzoszkieletów ze względu na zastosowanie. Opracowanie własne.

Egzoszkielety takie jak ReWalk i HAL umożliwiają osobom z dysfunkcjami narządu ruchu zwiększenie mobilności oraz samodzielną egzystencję, przy jednoczesnej rehabilitacji połączonej z nauką wzorców ruchowych. Pacjent dzięki egzoszkieletowi zachowuje powtarzalność wykonywanych sekwencji ruchów mocno zbliżonych do naturalnej motoryki zdrowego człowieka. Dzięki temu wspomagany jest układ krążeniowy pacjenta oraz stymulacja centralnego układu nerwowego.



Rys. 1.2. Po lewej egzoszkielet ReWalk, po prawej egzoszkielet HAL [3], [4].

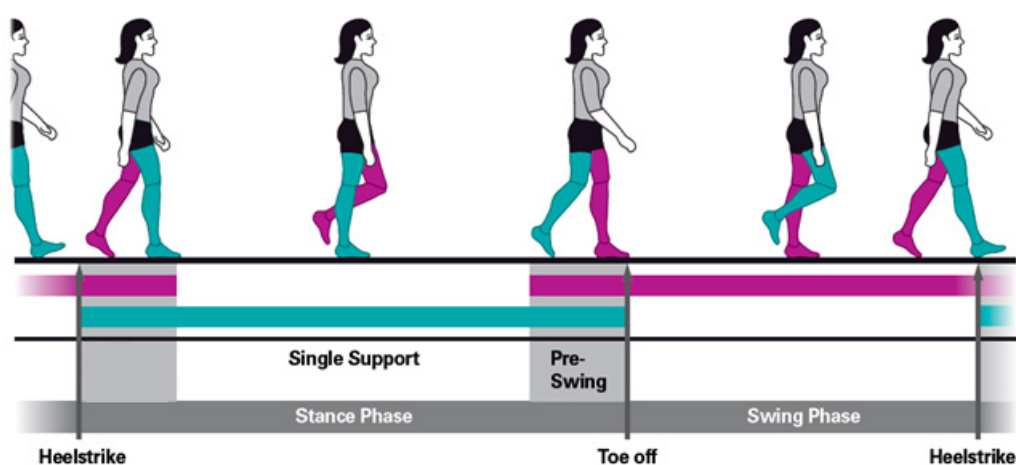
1.2. Biomechaniczne aspekty chodu człowieka

Jedną z najbardziej złożonych czynności ruchowych wykonywanych w życiu codziennym człowieka jest chód. W odróżnieniu od stania do pełnej analizy tej aktywności wymagane jest poznanie zarówno własności biomechanicznych człowieka jak i zrozumienie oddziałujących między osobą a podłożem sił kontaktowych. Patrząc z perspektywy modelowania dynamicznego oraz teorii sterowania zagadnienie chodu jest rozbudowanym problemem badawczym o czym świadczy ilość prac naukowych o tej tematyce.

Chód definiowany jest jako cykliczna aktywność ruchowa polegająca na powtarzaniu wzorców koordynacyjnych kończyn dolnych oraz towarzyszących im współruchów kończyn górnych, tułowia oraz głowy. Cykl chodu obejmuje czynności wykonywane przez idącego pomiędzy kontaktem pięty z podłożem a powtórny jej zetknięciem.

Dla cyklu chodu można wyróżnić trzy fazy:

- faza podporu
- faza przenoszenia
- faza podwójnego podparcia



Rys. 1.3. Fazy chodu [5].

Faza podporu zajmuje 60% fazy chodu. Rozpoczyna się w chwili kontaktu pięty z podłożem, kończy w momencie oderwania palców od podłoża. Faza przenoszenia stanowi 40% czasu cyklu chodu. Rozpoczyna się wraz z oderwaniem palucha kończyny od podłoża, kończy w chwili zetknięcia pięty tej samej kończyny z podłożem. Faza podwójnego podparcia to krótki okres podwójnego podporu, w trakcie którego paluch nogi zakroczej nie oderwał się jeszcze od podłoża, a pomiędzy piętą nogi wykroczej a podłożem nastąpił kontakt.

1.3. Cel pracy

Celem pracy jest przeprowadzenie rozważań teoretycznych na temat dynamiki obiektu jakim jest egzoszkielek rehabilitacyjny zaprojektowany przez studentów wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Zostanie wyprowadzony model dynamiczny robota bionicznego w pojęciu mechaniki Lagrange'a oraz przeanalizowany wpływ własności elementów na globalny charakter układu.

W ramach projektu dyplomowego przeprowadzone zostanie doświadczenie prowadzące do identyfikacji parametrów chodu człowieka, zaproponowany algorytm przetwarzania obrazów i identyfikacji niezbędnych parametrów.

W końcowym etapie na podstawie przeprowadzonych pomiarów dokonane zostaną eksperymenty numeryczne walidujące poprawność zaproponowanego modelu. Dodatkowo przy użyciu oprogramowania MATLAB Simulink MultiBody zaproponowana zostanie złożona symulacja dynamiki urządzenia.

1.4. Zakres pracy

- **Rozdział 2:** Przegląd literatury rozważanego problemu badawczego. Przeprowadzono dyskusję przedstawionych rozwiązań.
- **Rozdział 3:** Omówienie założeń teoretycznych, do których występują odwołania w dalszym toku pracy dotyczące podstaw kinematyki robotów.
- **Rozdział 4:** Omówienie założeń teoretycznych, do których występują odwołania w dalszym toku pracy dotyczące podstaw modelowania dynamicznego robotów.
- **Rozdział 5:** Przedstawienie modelu konstrukcji rzeczywistego obiektu, dla którego zostały przeprowadzone rozważania.
- **Rozdział 6:** Opis przebiegu doświadczenia identyfikacji parametrów chodu człowieka. Omówienie uzyskanych wyników.
- **Rozdział 7:** Wyprowadzenie równań modelowanego systemu egzoszkieletu.
- **Rozdział 8:** Omówienie implementacji modeli w środowisku MATLAB wraz z dyskusją rezultatów.

2. Stan wiedzy

W badaniach dotyczących motoryki człowieka wyodrębniono dwa zbiory problemów: analiza biomechaniczna chodu oraz opis ruchu robota dwunożnego.

W pierwszym analizując ruch układu mięśniowo-szkieletowego wyprowadza się modele matematyczne o wysokim stopniu złożoności - łańcuchy kinematyczne o dziesiątkach stopni swobody - opisujące oddziaływania więzadeł, mięśni i kości oraz korelujące ich współdziałanie w kolejnych fazach chodu. Modele o dużym stopniu skomplikowania powodują wysoką złożoność obliczeniową. Rachunki numeryczne konieczne do rozwiązania układów równań różniczkowych przy obecnym stanie technologii nie są możliwe do wykonania w czasie rzeczywistym.

W obszarze badań nad robotami dwunożnymi kluczowe jest zaproponowanie algorytmów sterowania mogących w czasie rzeczywistym zapewnić ruch robota, odwzorowujący chód człowieka. W celu zmniejszenia liczby wykonywanych obliczeń niezbędnych do zapewnienia determinizmu czasowego istotne jest uproszczenie modelu dynamicznego opisującego zachowania fizycznego obiektu.

Modelowanie dynamiki ruchu egzoszkieletu kończyn dolnych można przypisać do drugiej instancji problemów, ze względu na strukturę kinematyczną omawianego robota oraz żądanie sterowania w czasie rzeczywistym. Szukając rozwiązania zagadnienia opisu dynamiki robota bionicznego dokonano przeglądu zaproponowanych w literaturze modeli dynamicznych szkieletów bionicznych. W omawianych pozycjach literaturowych wyróżniono 3 typy modeli matematycznych opisujących dynamikę ruchu odwzorowującego chód człowieka.

2.1. Model wahadła odwróconego

Analizując ruch człowieka pod względem przemian energetycznych występujących w kolejnych fazach ruchu wyprowadzono uproszczony model dynamiczny analogiczny do zachowania wahadła odwróconego. Koncentrując całkowitą masę układu w punkcie środka ciężkości oraz definiując oś obrotu w przeciwnym do punktu masy końcu wahadła zaproponowano uproszczony model jednego z dwóch ramion robotycznych egzoszkieletu. Obliczony model umożliwia opis ruchu masy punktowej w zależności od wychylenia i przemieszczenia złącza obrotowego. Poczynione uproszczenia uniemożliwiają obserwacje przemieszczenia kąтового złącz obrotowych konstrukcji.

W [6] zaproponowano dwa niezależne modele wahadeł odwróconych stanowiących uproszczenie modelu człowieka oraz platformy robotycznej. W celu uwzględnienia zależności oddziaływania obiektów między sobą wprowadzono model pary sprężyna - tłumik odwzorowujący tę zależność.

2.2. Model ZMP

ZMP (ang. zero moment point) bazuje na analizie sił oddziałujących w kierunku poziomym na układ robotyczny tak aby znaleźć punkt dla którego wypadkowy moment rozważanych sił będzie równy zero. Omawiana metoda nie uwzględnia sił oddziaływujących w kierunku pionowym, dzięki czemu omijany jest skomplikowany problem rozważania stanu, w którym następuje styczność robota z podłożem. Modele oparte o opisaną metodologię wykorzystuje się w zadaniach stabilizacji platformy w pozycji pionowej. Informacje generowane przez model matematyczny uniemożliwiają dobre wysterowanie układu, tak aby odwzorować trajektorię chodu człowieka w pełnym stopniu.

W pracach [7]÷ [8] wykorzystano koncepcję modelu ZMP wprowadzając uszczegółowienia modelu. W [7] rozważaniom poddano dynamikę konstrukcji egzoszkieletu. W następnym artykule [9] do analizy wprowadzono analogiczny układ kinematyczny odwzorowujący działanie robota w sytuacji użytkowania przez człowieka. Wprowadzono model dwóch identycznych łańcuchów kinematycznych połączonych ze sobą w złączach stawu skokowego. W [8] dokonano analizy układu poruszającego się w przestrzeni trójwymiarowej. Model ten wprowadzono w celu zapewnienia większej stabilności dla zadania stabilizacji platformy w pionie.

W [7] z użyciem pakietu obliczeniowego MATLAB SimMechanics przeprowadzono symulację konstrukcji mechanicznej w celu walidacji modelu matematycznego. Przeprowadzono dwa bazowe doświadczenia: układ z ograniczeniem ruchu w złączu biodrowym w płaszczyźnie czołowej człowieka, zachowaniem wszystkich stopni swobody konstrukcji mechanicznej. Przeprowadzone badania wskazują znaczną poprawę odwzorowania trajektorii naturalnego chodu człowieka w przypadku drugiego eksperymentu.

W [9] wykonano serię pomiarów identyfikujących zależności kątowe między odpowiednimi złączami mechanicznymi i stawami człowieka, zauważono różnice w położeniu człowieka względem egzoszkieletu w kolejnych fazach chodu. Uwzględniono siły nacisku pomiędzy robotem, a podłożem w analizie układu. Walidując model dynamiki zauważono, że im większa odległość między wyznaczonymi punktami o zerowym momencie bezwładności dla egzoszkieletu i człowieka tym większa różnica przyspieszenia punktów względem siebie.

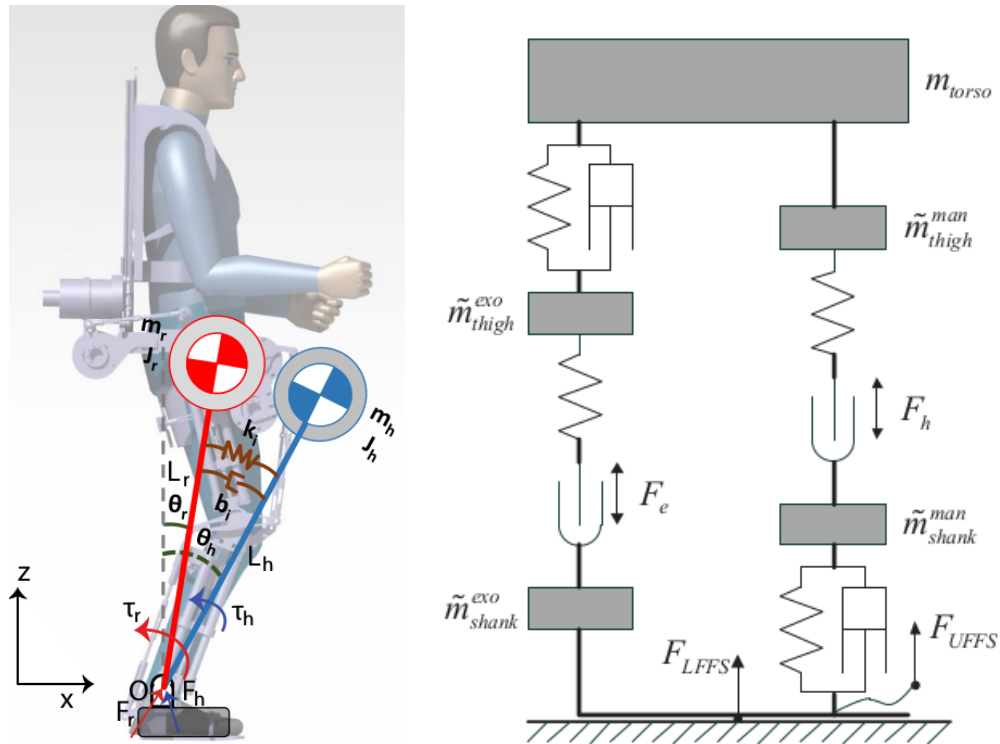
2.3. Model mechaniczny

W pracach [10], [11] dynamikę układu analizowano dla poszczególnych faz chodu, zaproponowano modele matematyczne odpowiednio dla fazy przenoszenia i podpierania. Dla fazy przenoszenia w obu publikacjach modele matematyczne obiektu dynamicznego wyprowadzono w oparciu o założenia mechaniki Lagrange'a. W [10] dla drugiego wyróżnionego etapu chodu przeanalizowano niezależnie układy mechaniczne odpowiadające za ruch poszczególnych kończyn zakładając, że położenie końcówek efektorów obu ramion robotycznych, odpowiadających złączom biodrowym, jest takie same w płaszczyźnie xy . Autorzy [11] zaproponowali ograniczenie stopni swobody w łańcuchu kinematycznym oraz uwzględnienie kontaktu obiektu z podłożem. W celu przeanalizowania współdziałania obu układów zamodelowano parę sprężyna-tłumik.

W publikacjach [10]÷ [12] autorzy zaproponowali analizę układów w przestrzeni dwuwymiarowej. W [7] dla podporu wprowadzono dodatkowe ograniczenia sił, wykorzystując aparat matematyczny mnożników Lagrange'a. Podjęto się analizy dynamiki układu w chwili przejścia z jednego stanu w drugi - z fazy przenoszenia do fazy podporu. Opis tego zagadnienia jest o tyle problematyczny, że w przyjętej jednostce czasu następuje jednostkowy skok przyspieszenia. Powoduje to potrzebę wprowadzenia złożonego aparatu matematycznego. W pracy wykorzystano uproszczenie polegające na analizie wektora stanu reprezentującego ruch układu bezpośrednio przed i po kontakcie platformy z podłożem.

W [13] jako punkt wyjścia użyto podstaw mechaniki Newtonowskiej, rozważania prowadzono dla wypadkowych sił w płaszczyźnie xy . Analogicznie jak w [9] model oddziaływań człowieka z maszyną wyprowadzono na podstawie połączonych równoległe łańcuchów kinematycznych układów.

Publikację [14] poświęcono problemowi modelowania dynamiki układu egzoszkieletu nieantropomorficznego. Zaproponowano oddzielną analizę modelu człowieka oraz konstrukcji egzoszkieletu przy uwzględnieniu sił reprezentujących oddziaływania pomiędzy układami. Rozrózono modele dynamiczne dla poszczególnych faz chodu. Dla fazy przenoszenia kończyny zaproponowano model opisujący układ mechaniczny o dwunastu stopniach swobody. Dynamikę układu dla fazy podporu podzielono na osobną analizę dynamiki każdej kończyny. Zaproponowano model reprezentujący sytuację przejścia z fazy przenoszenia do fazy podporu rozważając siły przenoszone pomiędzy stopą człowieka, platformą robotyczną a podłożem.



Rys. 2.1. Porównanie modeli dynamicznych odwzorowujących interakcję człowieka z maszyną [6], [13].

2.4. Podsumowanie

Wybrane publikacje traktujące o modelowaniu dynamicznym szkieletów bionicznych przedstawiają zagadnienie wielopłaszczyznowo. Prace [8], [14] omawiają problem dla modelu w płaszczyźnie trójwymiarowej, pozostałe zakładają analizę w przestrzeni dwuwymiarowej. Kierując się intuicją, rozważania prowadzone w przestrzeni trójwymiarowej indukują lepsze odwzorowanie rzeczywistej dynamiki obiektu. Prace [10]÷ [14] przedstawiają modele matematyczne w oparciu o bezpośrednią analizę konstrukcji mechanicznej egzoszkieletu, wszystkie publikacje swoje rozważania opierają na prawach mechaniki Lagrange'a.

3. Model kinematyczny

Projektowanie algorytmów sterowania układami robotycznymi wymaga zaproponowania zbioru dopuszczalnych czynności umożliwiających podążanie efektora po zadanej trajektorii tak aby zachować stabilność układu. Badając pod względem zależności kinematycznych obiekt opisuje się matematycznie trajektorie uwzględniając możliwości ruchu poszczególnych złącz, obraną bazę oraz końcówkę robotyczną. Analizując działanie robota pod kątem jego kinematyki rozważa się trzy podstawowe problemy: zadanie kinematyki prostej, zadanie kinematyki odwrotnej, analiza prędkości łańcucha kinematycznego.

3.1. Łańcuch kinematyczny

Manipulator robotyczny składa się z zestawu połączonych przegubami brył sztywnych, wykonujących złożone ruchy w przestrzeni robotycznej. W celu opisanie operacji ruchu robota, rotacja i translacja, wykorzystuje się złącza obrotowe oraz pryzmatyczne. Przyjmuje się, że są to układy o jednym stopniu swobody. W przypadku modelowania przegubu o większej liczbie stopni swobody zakłada się, że układ reprezentowany jest przez szereg złącz o jednym stopniu swobody. Dla każdego ogniwa wprowadzono układ współrzędnych aby usprawnić analizę kinematyczną.

W celu usystematyzowania opisu łańcucha kinematycznego przyjęto następujące założenia:

- Ogniwa ponumerowano od 0 do n , gdzie ogniwo 0 to baza.
- Złącza ponumerowano od 1 do n , gdzie złącze i znajduje się pomiędzy ogniwem $i - 1$ oraz ogniwem i .
- Układy współrzędnych ponumerowano od 0 do n , gdzie układ i przypisany jest do ogniwa i .
- Układ współrzędnych umiejscowiono tak, że oś z_i układu i reprezentuje kierunek przemieszczenia złącza $i + 1$.

3.2. Zadanie kinematyki prostej

W rzeczywistych aplikacjach robotycznych nie ma możliwości bezpośredniego pomiaru pozycji końcówki roboczej. Wykorzystując informacje o przemieszczeniu kątowym przegubu, akwizowaną przez urządzenie takie jak enkoder, możliwe jest przeliczenie pozycji poszczególnych złącz na pozycję końcową efektora w przyjętym układzie współrzędnych. W łańcuchu kinematycznym robota z każdym złączem związany jest lokalny układ współrzędnych, dla którego wyznacza się odwzorowanie przejścia w sąsiedni układ. Wykorzystując własność składania obrotów otrzymuje się pozycję i orientację końcówki roboczej względem układu bazowego. W celu usystematyzowania funkcji przejścia zaproponowano postać jednorodną odwzorowania. Macierz przekształceń T_i zbudowana jest z macierzy rotacji oraz wektora pozycji.

Rozwiązanie zadania kinematyki prostej uzyskuje się poprzez wymnożenie macierzy przekształceń:

$$T_n^0 = T_1^0 * T_2^1 * \dots * T_{n-1}^{n-2} * T_n^{n-1} \quad (3.1)$$

Szukając rozwiązania zadania kinematyki prostej w sposób opisany powyżej niezbędne dla zmniejszenia złożoności obliczeniowej jest odpowiednie zdefiniowanie lokalnych układów współrzędnych. Stosowanym w robotyce opisem ujednociającym opis łańcucha manipulatora jest notacja Denavita-Hartenberga. W ogólności macierz transformacji z jednego układu w drugi przedstawiona jest jako

$$\begin{aligned} T_{i-1}^i &= R_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,a_i} R_{x,\alpha_i} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.2)$$

gdzie

θ_i – kąt obrotu wokół osi Z

d_i – przesunięcie wzdłuż osi Z

a_i – przesunięcie wzdłuż osi X

α – kąt obrotu wokół osi X

3.3. Zadanie proste kinematyki prędkości

W robotyce oprócz informacji na temat bezpośredniej pozycji poszczególnych układów w pozycji statycznej, badaniem zagadnieniem jest określenie zależności prędkości efektora w funkcji zmiany przemieszczenia w czasie poszczególnych przegubów.

W celu zdefiniowania zadania kinematyki prędkości wprowadzono wektor prędkości obrotowych \dot{q} , dla robota o n -stopniach swobody zapisano wektor o rozmiarze $n \times 1$

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 & \dot{q}_2 & \dot{q}_3 & \dots & \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Odwzorowanie prędkości dla końcówki roboczej \dot{X} zostało zdefiniowane jako wektor o rozmiarze 6×1

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{X}_n & \dot{Y}_n & \dot{Z}_n & \omega_{Xn} & \omega_{Yn} & \omega_{Zn} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} {}^0\dot{d}_n & {}_0\omega_n \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

W celu wyznaczenia przekształcenia wektora reprezentującego zmienne złączone na zmienne w nowym układzie współrzędnych zdefiniowano odwzorowanie - Jakobian.

$$\dot{X} = J * \dot{q} \quad (3.5)$$

W ciele macierzy wyróżnia się dwie składowe odpowiadające za transformację prędkości: J_D dla ruchu postępowego i J_R dla ruchu obrotowego kolejnych przęseł robota.

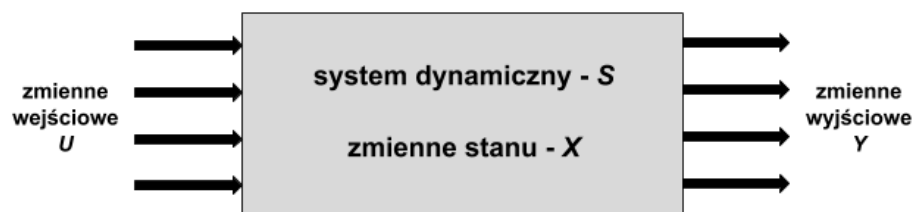
$$J = \begin{bmatrix} J_D \\ J_R \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

4. Modelowanie systemów dynamicznych

4.1. Układ dynamiczny

Obecnie na wielu płaszczyznach nauki rozważania prowadzi się nie tylko na podstawie obserwacji doświadczalnych właściwości obiektów fizycznych lub procesów. Ciągły rozwój technologiczny wskazał naukowcom i inżynierom nowy kierunek analizowania stawianych przed nimi problemów. Ze względu na niewystarczające zasoby materialne i czasowe odchodzi się w początkowych fazach projektowania od doświadczalnego poznawania właściwości prototypów. Pożądane ciągłe udoskonalenie procesów wytwarzania oraz działania technologii stawia przed inżynierami i naukowcami problem optymalizacji. W celu badania właściwości oraz zachowań obiektów fizycznych takich jak zjawiska występujące w przyrodzie, aplikacje technologiczne oraz abstrakcyjnych - procesy społeczne, ekonomiczne, tworzy się modele matematyczne opisujące działanie wymienionych struktur. Modele tworzone są w taki sposób, aby odwzorować jak najdokładniej zachowania rzeczywistego układu dla żądanego zbioru badanych własności. Odwzorowanie opisujące obiekt rzeczywisty może powstać w formie funkcji analitycznej, odpowiednio uszeregowanego zbioru danych, algorytmu opisującego poszczególne etapy działania układu.

Interesującym z punktu widzenia teorii sterowania modelem rzeczywistego obiektu jest model dynamiczny cechujący się opisem zmian zachodzących w układzie w dziedzinie czasu. Model matematyczny systemu opisuje w postaci funkcji odwzorowanie sygnałów sterujących względem sygnałów wyjściowych układu w przybliżeniu.



Rys. 4.1. Schemat blokowy układu dynamicznego. Opracowanie własne.

Dla zależności opisanych przy użyciu funkcji matematycznych wyróżnia się trzy typy modeli. Dla funkcji, w których dziedziną jest czas ciągły, a funkcja może przyjmować dowolne wartości w danym przedziale, definiować je będziemy jako model ciągły względem czasu. Model dyskretny systemu uzyskany zostanie w momencie kiedy zmienna niezależna zostanie przedstawiona jako zdyskretyzowany zbiór. Model cyfrowy w odróżnieniu od dyskretnego uwzględnia dodatkowo dokładność reprezentacji wielkości rzeczywistych dostępnej na platformie obliczeniowej wykorzystywanej do symulacji opisanego równaniami matematycznymi systemu.

Rozwój technik obliczeniowych wpływa pomyślnie na rozwój oprogramowania symulacyjnego używanego w przemyśle. Tworzenie coraz bardziej skomplikowanych urządzeń wymaga umiejętności tworzenia i symulowania skomplikowanych modeli matematycznych. Proces projektowania nowych urządzeń w wielu dziedzinach przemysłu, staje się coraz bardziej pracochłonny ze względu na rosnące wymagania w zakresie ich niezawodności i szybkości działania. Koszty te można obniżyć przez przeniesienie części badań z rzeczywistych obiektów na odpowiednie symulatory [15].

4.2. Modelowanie dynamiki układów robotycznych

Wyprowadzenie równań ruchu dla układu dynamicznego wymaga zastosowania odpowiedniego opisu. Metoda Newton'a-Euler'a jest jedną z najbardziej fundamentalnych, wyprowadzone równania dynamiczne determinują minimalne siły i momenty mechaniczne niezbędne do wykonania ruchu przez układ wykonawczy robota oraz siły oddziałujące na złącza. Metoda Lagrange'a daje możliwość wyprowadzenia równań różniczkowych określających wymagane siły i momenty aktuatorów.

Uzyskany model dynamiczny w przypadku obu metodologii można wyrazić w postaci macierzowej ogólnej jako

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{\theta} + g(q) = u \quad (4.1)$$

gdzie

q – wektor zmiennych złączowych

u – wektor momentów

M – macierz inercji

C – macierz sił Coriolisa

g – wektor grawitacji

W rozważaniach dotyczących metody Newton'a-Euler'a punktem wyjścia są trzy podstawowe prawa mechaniki:

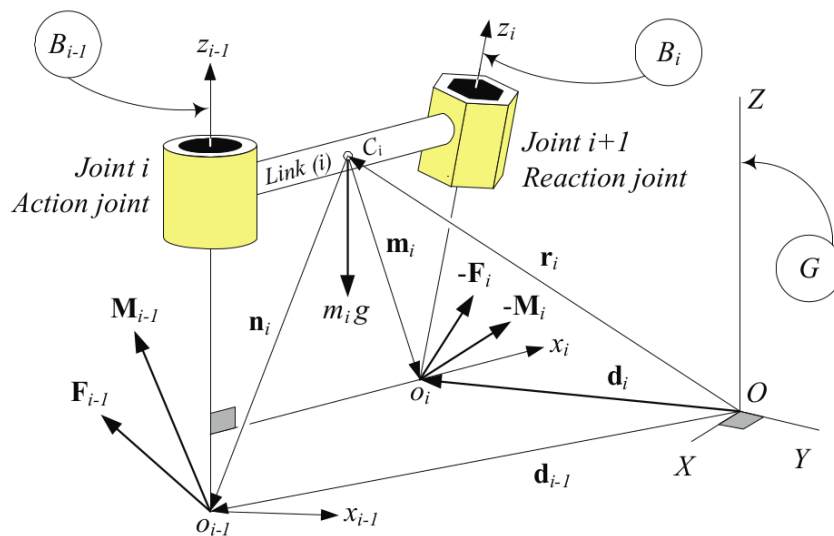
- Siła akcji jest równa co do wartości sile reakcji, siła reakcji ma przeciwny zwrot wektora względem siły akcji.
- Prędkość zmian pędu ciała jest równa sumie sił przyłożonych do niego.
- Średnia zmiana momentu kątownego równa jest całkowitemu momentowi sił przyłożonych do ciała.

Poniższy rysunek 4.2 przedstawia bryłę sztywną obrazującą ogniwo robota. Siła F_{i-1} i moment mechaniczny M_{i-1} to wypadkowa siła oraz moment, które zostały przyłożone do przęsla i w złączu i jako oddziaływanie ogniwa $i - 1$. Identyczna zależność indukowana jest w przypadku kolejnych par połączonych ogniw. Suma zewnętrznych obciążeń oddziałujących na obiekt i może być wyrażona jako $\sum F_{e_i}$ i $\sum M_{e_i}$

Równanie ruchu Newton'a-Euler'a dla ogniwa i w globalnym układzie współrzędnych można przedstawić w formie

$${}^0F_{i-1} - {}^0F_i + \sum {}^0F_{e_i} = m_i {}^0a_i \quad (4.2)$$

$${}^0M_{i-1} - {}^0M_i + \sum {}^0M_{e_i} + ({}^0d_{i-1} - {}^0r_i) \times {}^0F_{i-1} - ({}^0d_i - {}^0r_i) \times {}^0F_i = {}^0I_{i0}\alpha_i \quad (4.3)$$



Rys. 4.2. Siły i momenty oddziałujące na układ [16].

Mechanika Lagrange'a przeformułuje podstawy mechaniki klasycznej wykorzystując zasadę najmniejszego działania Hamiltona. Wprowadza się współrzędne uogólnione q_i i prędkości uogólnione \dot{q}_i opisujące położenie obiektu w mniej złożony sposób w porównaniu do opisu w odniesieniu do układu kartezjańskiego. W celu opisu ruchu obiektu w nowo zdefiniowanym układzie odniesienia wprowadza się równania Lagrange'a II-go rodzaju. Można je przedstawić w formie

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_k} = 0, (k = 1, \dots, n) \quad (4.4)$$

Funkcja \mathcal{L} nosi nazwę funkcji Lagrange'a - określana inaczej jako lagranżjan - określa ona różnicę energii kinetycznej i potencjalnej analizowanego układu.

Opisując ruchu obiektu z wykorzystaniem metodologii Lagrange'a należy określić liczbę stopni swobody układu, wprowadzić zmienne uogólnione odpowiadające liczbie zdefiniowanych stopni swobody oraz zdefiniować występujące przemiany energetyczne i siły zewnętrzne oddziałujące na układ. Następnie dokonując operacji matematycznych zgodnie z wzorem 4.4 otrzymuje się układ n -równań różniczkowych drugiego rzędu opisujących ruch układu.

Istotną cechą równań Lagrange'a jest globalny sposób traktowania całego układu – bez konieczności dokonywania podziału na podukłady i wprowadzania reakcji wzajemnego oddziaływania podukładów. Równania ruchu określone na podstawie równań Lagrange'a II-go rodzaju mają też pewne wady: otrzymane równania ruchu są zazwyczaj silnie nieliniowe, nie pozwalają na bezpośrednie określenie reakcji wzajemnego oddziaływania podukładów [17].

5. Charakterystyka modelowanego obiektu

5.1. Konstrukcja mechaniczna

Zamieszczony poniżej model 3D konstrukcji mechanicznej jest podstawą do dalszych rozważań dotyczących modelowania dynamicznego. Rama składa się z pasa biodrowego i dwóch symetrycznych kończyn połączonych z nim przegubowo. Każda z kończyn złożona jest z dwóch prętów oraz z podkładki pod stopę, wszystkie elementy są połączone przegubowo [1].



Rys. 5.1. Model 3D konstrukcji egzozskeletonu [1].

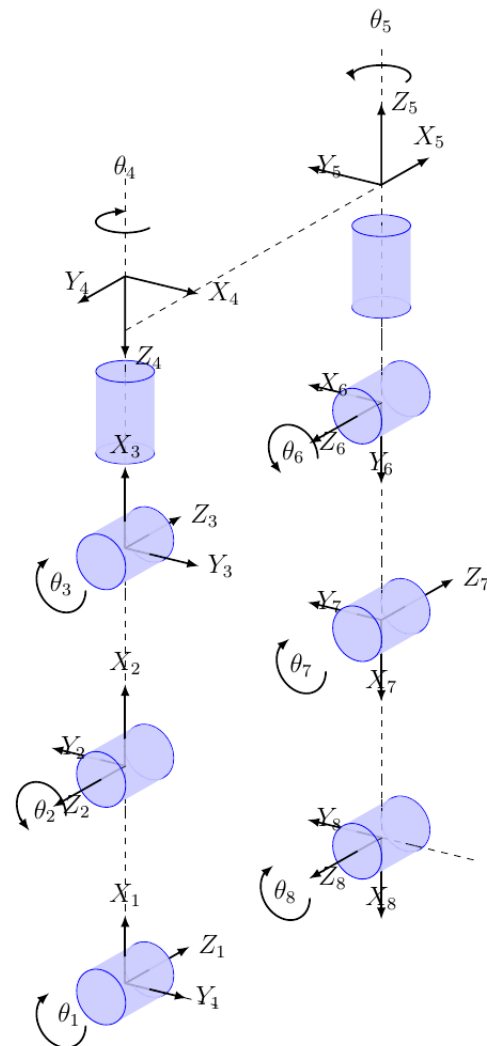
Tabela 5.1. Parametry mechaniczne konstrukcji [1].

ogniwo	długość [cm]	masa[kg]
1	27	0.4
2	48.9	0.7
3	43.6	1.2
4	74.3	2
5	43.6	1.2
6	48.9	0.7
7	27	0.4

5.2. Kinematyka układu

Poniżej przedstawiono przyjęty model łańcucha kinematycznego konstrukcji. Zaprojektowany mechanizm składa się z 4 par złącz obrotowych. Przeguby odpowiadające ruchowi w stawach skokowych i kolanowych zamodelowano jako układy o jednym stopniu swobody - prostowaniu i zginaniu kończyny. W złączu biodrowym wykorzystano układ o dwóch stopniach swobody - odpowiadający prostowaniu i zginaniu oraz odwodzeniu i przywodzeniu. Przyjęto założenie, że masa oraz długość członu łączącego złącza jest równy zero.

Rys.5.2 przedstawia usystematyzowany opis struktury kinematycznej wraz z przyjętymi zgodnie z notacją Denavita-Hartenberga lokalnymi układami współrzędnych poszczególnych złącz. Zakłada się, że układ współrzędnych 1 traktowany jest jako układ bazowy.



Rys. 5.2. Model łańcucha kinematycznego egzoszkieletu. Opracowanie własne.

Tabela 5.2. Zidentyfikowane parametry notacji DH.

przekształcenie	a	α	d	θ
0-1	l_1	180°	0	θ_1
1-2	l_2	180°	0	θ_2
2-3	0	-90°	0	$90^\circ + \theta_3$
3-4	l_4	180°	0	θ_4
4-5	0	-90°	0	$90^\circ + \theta_5$
5-6	l_6	180°	0	$90^\circ + \theta_6$
6-7	l_7	180°	0	θ_7
7-8	l_8	0°	0	$90^\circ + \theta_8$

W celu wyznaczenia położenia kolejnych ogniów manipulatora względem układu bazowego dokonano identyfikacji parametrów notacji DH.

Poniżej zamieszczono odwzorowania przekształceń następujących pomiędzy kolejnymi układami współrzędnych.

$$T_0^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 & l_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & -\cos \theta_1 & 0 & l_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$T_1^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 & 0 & l_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 & l_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$T_2^3 = \begin{bmatrix} -\sin \theta_3 & 0 & -\cos \theta_3 & 0 \\ \cos \theta_3 & 0 & -\sin \theta_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$T_3^4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & \sin \theta_4 & 0 & l_4 \cos \theta_4 \\ \sin \theta_4 & -\cos \theta_4 & 0 & l_4 \sin \theta_4 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$T_4^5 = \begin{bmatrix} -\sin \theta_5 & 0 & -\cos \theta_5 & 0 \\ \cos \theta_5 & 0 & -\sin \theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$T_5^6 = \begin{bmatrix} -\sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & -l6 \sin \theta_6 \\ \cos \theta_6 & \sin \theta_6 & 0 & l6 \cos \theta_6 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$T_6^7 = \begin{bmatrix} \cos \theta_7 & \sin \theta_7 & 0 & l7 \cos \theta_7 \\ \sin \theta_7 & -\cos \theta_7 & 0 & l7 \sin \theta_7 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$$T_7^8 = \begin{bmatrix} -\sin \theta_8 & -\cos \theta_8 & 0 & -l8 \sin \theta_8 \\ \cos \theta_8 & -\sin \theta_8 & 0 & l8 \cos \theta_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

$$T_0^8 = T_0^1 T_1^2 T_2^3 T_3^4 T_4^5 T_5^6 T_6^7 T_7^8 \quad (5.9)$$

6. Identyfikacja własności dynamicznych chodu człowieka

6.1. Opis doświadczenia

W ramach badań przeprowadzono serię eksperymentów identyfikacyjnych dynamikę chodu człowieka. W celu redukcji zakłóceń doświadczenie wykonano na zamkniętym obiekcie przy sztucznym oświetleniu - parametry oświetlenia na stałym poziomie. Jednostajną prędkość chodu oraz niezmienną ukształtowania podłoża uzyskano wykorzystując w eksperymencie bieżnię sportową. Akwizycji obrazu dokonano kamerą FLIR Blackfly z szybkością 200 klatek na sekundę.

Za model doświadczalny przyjęto kobietę w wieku 22 lat, z niestwierdzonymi wadami aparatu ruchu oraz postawy. Zaproponowano dwa scenariusze testowe: prędkość chodu 2 km/h oraz 3 km/h. W celu identyfikacji parametrów takich jak

- trajektoria ruchu stawów
- trajektoria ruchu stopy
- zmiany położenia kąтового stawów
- prędkość ruchu postępowego i obrotowego

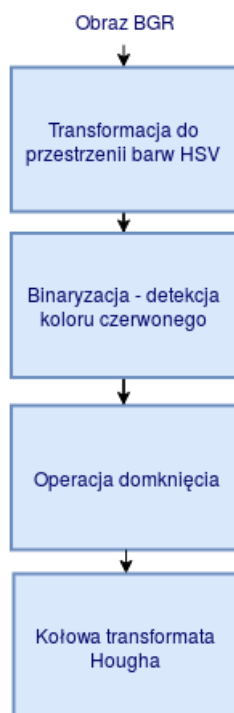
użyto markerów, których funkcją było wyznaczenie punktów początkowych układów współrzędnych przypisanych do położenia stawów.



Rys. 6.1. Po lewej stanowisko doświadczalne - rysunek poglądowy. Po prawej kamera FLIR Blackfly. Zdjęcie: H.Milanowski

6.2. Algorytm identyfikacji

W pierwszym etapie zaproponowano algorytm detekcji markerów. Na rysunku 6.1 przedstawiono sekwencję przekształceń prowadzących do detekcji interesujących obszarów obrazu.



Rys. 6.2. Model algorytmu użytego do detekcji markerów. Opracowanie własne.

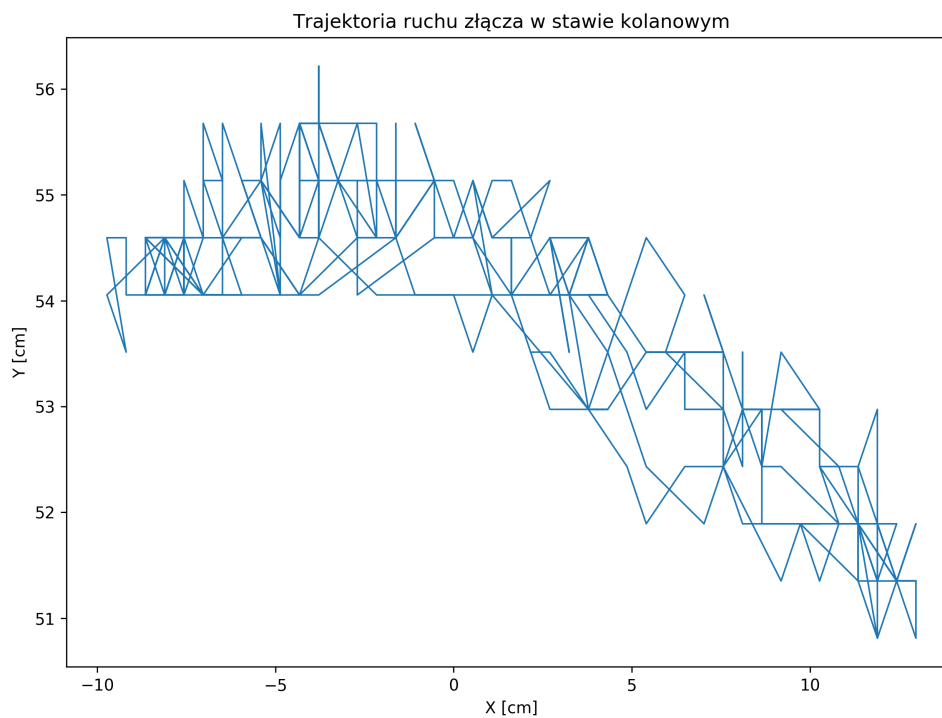
Pierwszy etap przetwarzania obrazu wymaga transformacji przestrzeni barw z systemu BGR do HSV. Podyktowane jest to następnym przekształceniem - binaryzacją. Operacja OR obrazu wejściowego oraz przyjętej maski binaryzującej umożliwia detekcję koloru czerwonego. Dzięki odpowiedniemu doborowi zakresu parametrów HSV możliwa była korekcja poziomu jasności obrazu. W celu usunięcia artefaktów na zbinaryzowanym obrazie przeprowadzono operację morfologiczną - domknięcie obrazu. Przetworzony obraz został poddany kołowej transformacji Hougha [18].

Opracowaną geometrię okręgów wykorzystano do obliczeń parametrów chodu człowieka. Identyfikację położenia kąтового oparto o podstawowe własności trygonometryczne. Kierunek oraz referencyjne wartości obrotu wyznaczono zgodnie z przyjętymi układami odniesienia złącz w łańcuchu kinematycznym. Dla potrzeb wyznaczenia trajektorii ruchu przeskalowano obraz względem wartości rzeczywistych zmierzonych podczas doświadczenia. Jako początek układu współrzędnych względem którego mierzono przemieszczenie punktów przyjęto marker umieszczony na wysokości tułowia. Założono, że dodatnia oś X układu została skierowana w kierunku ruchu, oś Y w kierunku kolejnych złącz.

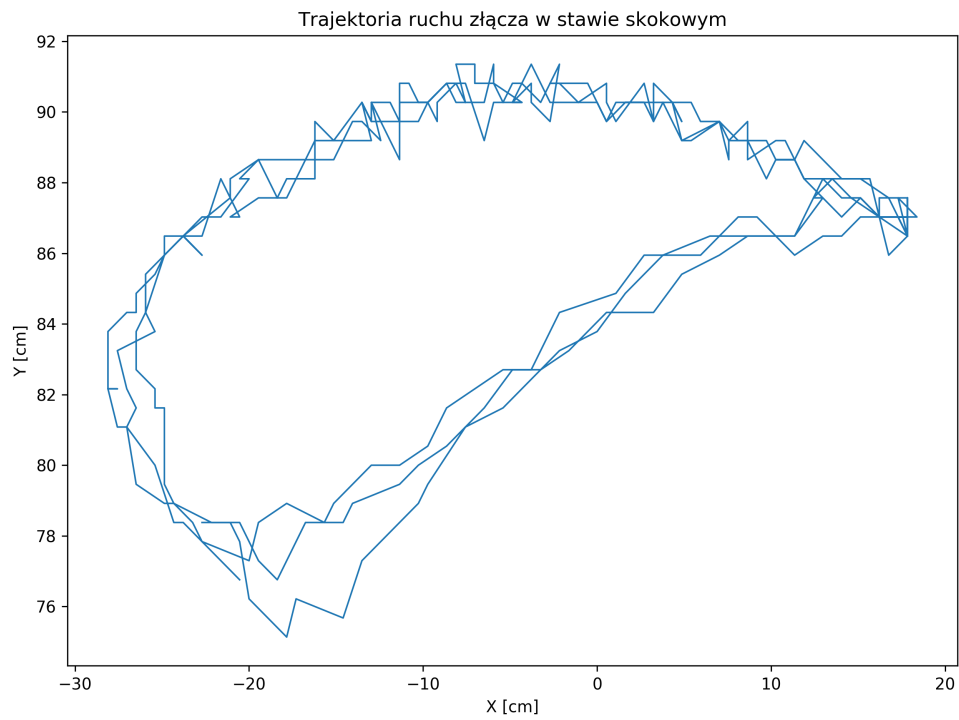


Rys. 6.3. Wizualizacja zaproponowanego modelu identyfikacji zaimplementowana przy użyciu biblioteki OpenCV. Opracowanie własne.

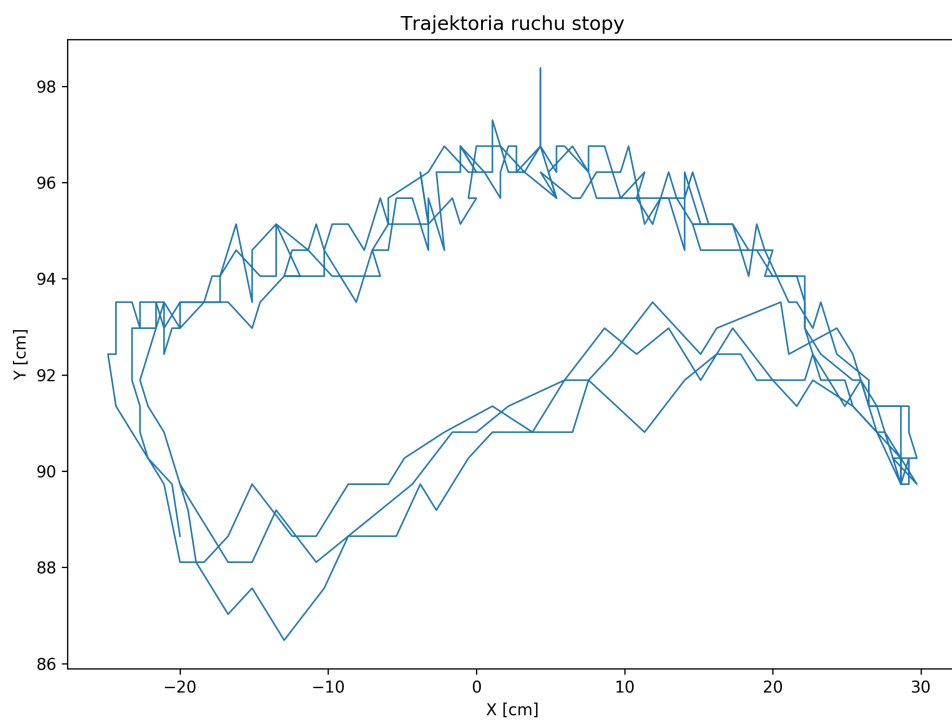
6.3. Interpretacja wyników doświadczenia



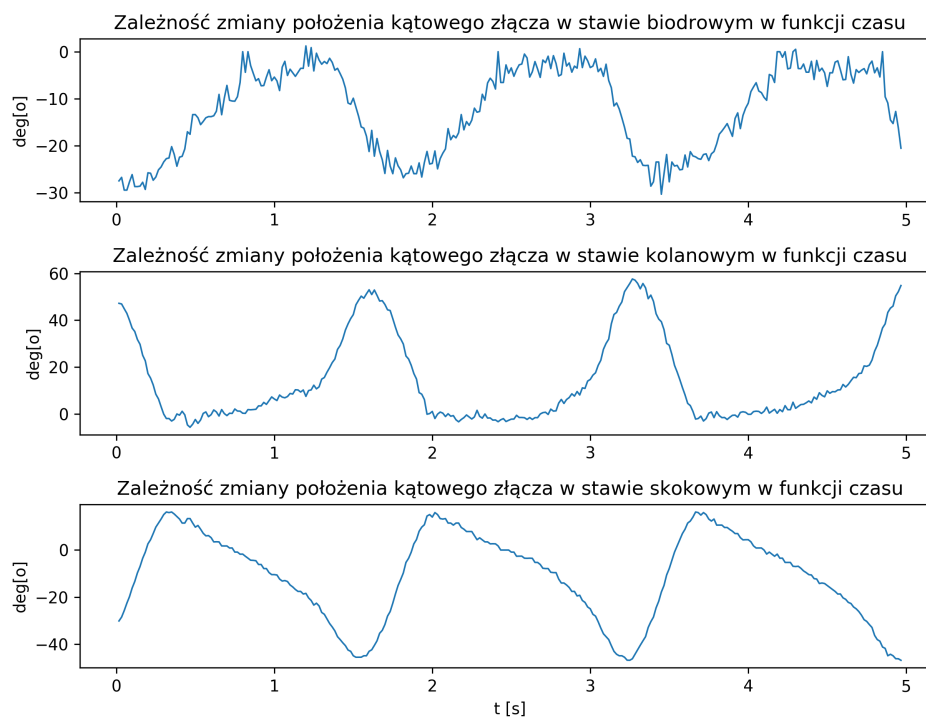
Rys. 6.4. Trajektorja ruchu stawu kolanowego. Opracowanie własne.



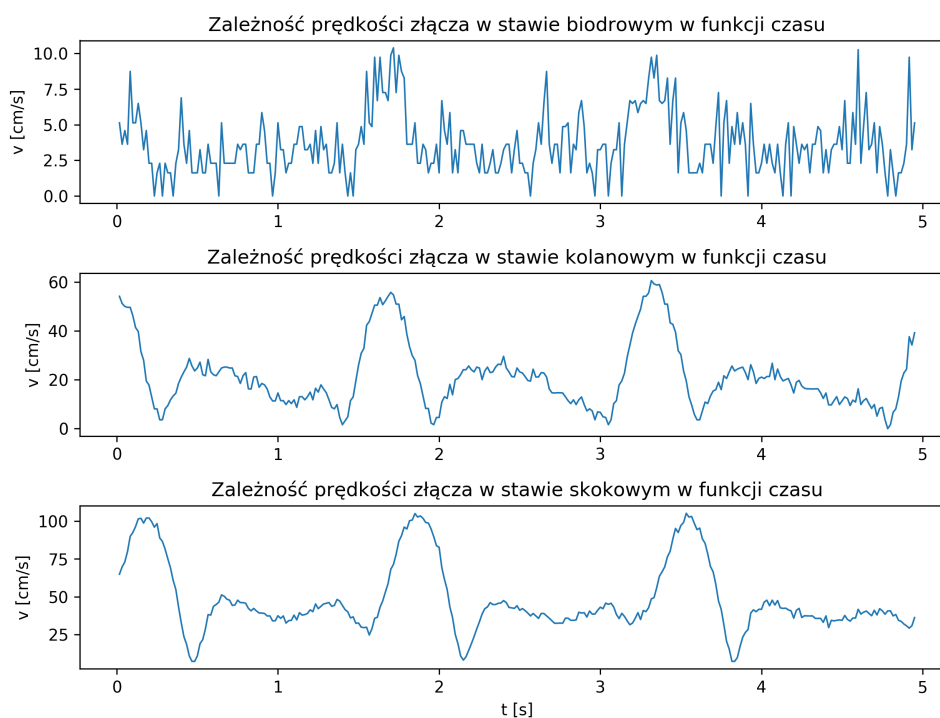
Rys. 6.5. Trajektoria ruchu stawu skokowego. Opracowanie własne.



Rys. 6.6. Trajektoria ruchu stopy. Opracowanie własne.



Rys. 6.7. Zmiana położenia kąowego stawów w funkcji czasu. Opracowanie własne.



Rys. 6.8. Zmiana prędkości postępowej stawów w funkcji czasu. Opracowanie własne.

7. Model dynamiczny

Rozdział poświęcono modelowaniu dynamiki mechanizmu egzoszkieletu. Analizę układu przeprowadzono dla jednej z faz chodu - fazy przenoszenia. W odróżnieniu od większości publikacji omówionych w rozdziale drugim, przeprowadzono obliczenia dla problemu w przestrzeni trójwymiarowej.

W odniesieniu do modelu zaprezentowanego w rozdziale 4, wprowadzono uproszczenie polegające na pominięciu ostatniego członu kończyny przenoszonej. Aby uprościć równania opisujące tensory momentów bezwładności członów konstrukcji, przyjęto założenie zunifikowanego kształtu części - elementy kończyny uproszczono jako walce, platformę urządzenia jako prostopadłościan.

Uogólnione równanie ruchu systemu opisuje się w formie

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \tau_{\theta} \quad (7.1)$$

gdzie

- $M(\theta) \in R^{n \times n}$ - macierz inercji
- $C(\theta, \dot{\theta}) \in R^n$ - wektor sił Coriolisa
- $G(\theta) \in R^n$ - wektor momentu sił grawitacji
- $\tau_{\theta} \in R^n$ - wektor zewnętrznych momentów sił oddziałujących na układ

Poniżej omówiono zmienne użyte w wyprowadzeniu równań ruchu rozważanego układu

- m_i masa członu i
- I_i tensor momentu bezwładności członu i
- l_i długość członu i
- l_{ci} odległość pomiędzy przyjętym środkiem masy i końcem członu i
- θ_i przemieszczenie kątowe złącza i

Wyznaczono równania odwzorowujące położenie środków mas (x_{ci}, y_{ci}) elementów mechanizmu zgodnie z przyjętym łańcuchem kinematycznym.

$$\begin{aligned}
x_{c1} &= l_{c1} \cos(\theta_1) \\
y_{c1} &= l_{c1} \sin(\theta_1) \\
z_{c1} &= 0 \\
x_{c2} &= l_1 \cos(\theta_1) + l_{c2} \cos(\theta_1 - \theta_2) \\
y_{c2} &= l_1 \sin(\theta_1) + l_{c2} \sin(\theta_1 - \theta_2) \\
z_{c2} &= 0 \\
x_{c3} &= l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \\
y_{c3} &= l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \\
z_{c3} &= 0 \\
x_{c4} &= l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) - l_{c4} \cos(\theta_4) (\cos(\theta_1 - \theta_2) \sin(\theta_3) + \sin(\theta_1 - \theta_2) \cos(\theta_3)) \\
y_{c4} &= l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + l_{c4} \cos(\theta_4) (\cos(\theta_1 - \theta_2) \cos(\theta_3) - \sin(\theta_1 - \theta_2) \sin(\theta_3)) \\
z_{c4} &= -l_{c4} \sin(\theta_4) \\
x_{c5} &= l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) - l_4 \cos(\theta_4) (\cos(\theta_1 - \theta_2) \sin(\theta_3) + \sin(\theta_1 - \theta_2) \cos(\theta_3)) \\
y_{c5} &= l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + l_4 \cos(\theta_4) (\cos(\theta_1 - \theta_2) \cos(\theta_3) - \sin(\theta_1 - \theta_2) \sin(\theta_3)) \\
z_{c5} &= -l_4 \sin(\theta_4) \\
x_{c6} &= l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) - l_{c6} \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_6) - l_4 \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \\
&\quad + l_{c6} \sin(\theta_4 - \theta_5) \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_6) \\
y_{c6} &= l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + l_4 \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) - l_{c6} \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_6) \\
&\quad - l_{c6} \sin(\theta_4 - \theta_5) \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_6) \\
z_{c6} &= -l_4 \sin(\theta_4) - l_{c6} \cos(\theta_4 - \theta_5) \sin(\theta_6) \\
x_{c7} &= l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) - l_6 \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_6) - l_4 \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \\
&\quad - l_{c7} \cos(\theta_7) (\cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_6) - \sin(\theta_4 - \theta_5) \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_6)) \\
&\quad - l_{c7} \sin(\theta_7) (\cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_6) + \sin(\theta_4 - \theta_5) \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_6)) \\
&\quad + l_6 \sin(\theta_4 - \theta_5) \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_6) \\
y_{c7} &= l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + l_4 \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) - l_6 \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_6) \\
&\quad - l_{c7} \cos(\theta_7) (\sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_6) + \sin(\theta_4 - \theta_5) \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_6)) \\
&\quad - l_{c7} \sin(\theta_7) (\sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_6) - \sin(\theta_4 - \theta_5) \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_6)) \\
&\quad - l_6 \sin(\theta_4 - \theta_5) \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_6) \\
z_{c7} &= -l_4 \sin(\theta_4) - l_6 \cos(\theta_4 - \theta_5) \sin(\theta_6) - l_{c7} \cos(\theta_4 - \theta_5) \sin(\theta_6 - \theta_7)
\end{aligned} \tag{7.2}$$

Prędkość postępową środków mas członów układu zapisano w postaci

$$\begin{aligned}
v_{c1} &= \begin{pmatrix} -l_{c1} \sin \theta_1 \\ l_{c1} \cos \theta_1 \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\
v_{c2} &= \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_{c2} \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ l_1 \cos \theta_1 + l_{c2} \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\theta}_1 + \begin{pmatrix} l_{c2} \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ -l_{c2} \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\theta}_2 \\
v_{c3} &= \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\theta}_1 + \begin{pmatrix} l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ -l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\theta}_2 \\
v_{c4} &= \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - l_{c4} \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) - l_{c4} \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\
&+ \begin{pmatrix} l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + l_4 \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \\ l_{c4} \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 - l_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\theta}_2 \\
&+ \begin{pmatrix} -l_{c4} \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \\ l_{c4} \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 - l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\theta}_3 \\
&+ \begin{pmatrix} l_{c4} \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin \theta_4 \\ -l_{c4} \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin \theta_4 \\ l_{c4} \cos \theta_4 \end{pmatrix} \dot{\theta}_4 \\
v_{c5} &= \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - l_4 \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) - l_4 \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\
&+ \begin{pmatrix} l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + l_4 \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \\ l_4 \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 - l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\theta}_2 \\
&+ \begin{pmatrix} -l_4 \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \\ -l_4 \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\theta}_3 \\
&+ \begin{pmatrix} l_4 \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin \theta_4 \\ -l_4 \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin \theta_4 \\ -l_4 \cos \theta_4 \end{pmatrix} \dot{\theta}_4
\end{aligned} \tag{7.3}$$

$$\begin{aligned}
v_{c6} = & \begin{pmatrix} l_{c6} \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_6 - l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - l_4 \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 - l_1 \sin \theta_1 \\ + l_{c6} \sin(\theta_4 - \theta_5) \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin \theta_6 \\ l_1 \cos(\theta_1) + l_3 \cos(\theta_1 - \theta_2) - l_{c6} \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_6 - l_4 \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \\ + l_{c6} \sin(\theta_4 - \theta_5) \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin \theta_6 \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\
+ & \begin{pmatrix} l_{c6} \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_6 - l_4 \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \\ + l_{c6} \sin(\theta_4 - \theta_5) \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin \theta_6 \\ l_{c6} \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_6 - l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + l_4 \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \\ - l_{c6} \sin(\theta_4 - \theta_5) \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin \theta_5 \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\theta}_2 \\
+ & \begin{pmatrix} l_{c6} \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_6 - l_4 \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 + l_{c6} \sin(\theta_4 - \theta_5) \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin \theta_5 \\ l_{c6} \sin(\theta_4 - \theta_5) \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin \theta_6 - l_4 \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 - l_{c6} \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_6 \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\theta}_3 \\
+ & \begin{pmatrix} \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) (l_4 \sin(\theta_4) + l_{c6} \cos(\theta_4 - \theta_5) \sin \theta_6) \\ - \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) (l_4 \sin(\theta_4) + l_{c6} \cos(\theta_4 - \theta_5) \sin \theta_6) \\ l_{c6} \cos \theta_5 \sin \theta_4 \sin \theta_6 - l_{c6} \cos \theta_4 \sin \theta_5 \sin \theta_6 - l_4 \cos \theta_4 \end{pmatrix} \dot{\theta}_4 \\
+ & \begin{pmatrix} -l_{c6} \cos(\theta_4 - \theta_5) \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin \theta_6 \\ l_{c6} \cos(\theta_4 - \theta_5) \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin \theta_6 \\ -l_{c6} \sin(\theta_4 - \theta_5) * \sin \theta_6 \end{pmatrix} \dot{\theta}_5 \\
+ & \begin{pmatrix} l_{c6} \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin \theta_6 + \sin(\theta_4 - \theta_5) \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_6 \\ l_{c6} \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \sin \theta_6 - \sin(\theta_4 - \theta_5) \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_6 \\ -l_{c6} \cos(\theta_4 - \theta_5) \cos \theta_6 \end{pmatrix} \dot{\theta}_6
\end{aligned}$$

Prędkość obrotową środków mas członów układu zapisano w postaci

$$\begin{aligned}
 \omega_{c1} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\
 \omega_{c2} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \dot{\theta}_1 + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \dot{\theta}_2 \\
 \omega_{c3} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \dot{\theta}_1 + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \dot{\theta}_2 + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \dot{\theta}_3 \\
 \omega_{c4} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \dot{\theta}_1 + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \dot{\theta}_2 + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \dot{\theta}_3 + \begin{pmatrix} -\cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \\ -\sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\theta}_4 \\
 \omega_{c5} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \dot{\theta}_1 + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \dot{\theta}_2 + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \dot{\theta}_3 + \begin{pmatrix} -\cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \\ -\sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\theta}_4 + \begin{pmatrix} \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \\ \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\theta}_5 \\
 \omega_{c6} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \dot{\theta}_1 + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \dot{\theta}_2 + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \dot{\theta}_3 + \begin{pmatrix} -\cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \\ -\sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\theta}_4 + \begin{pmatrix} \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \\ \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\theta}_5 \\
 &\quad + \begin{pmatrix} \cos(\theta_4 - \theta_5) \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \\ -\cos(\theta_4 - \theta_5) \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \\ \sin(\theta_4 - \theta_5) \end{pmatrix} \dot{\theta}_6
 \end{aligned} \tag{7.4}$$

Tensor bezwładności zapisano w postaci

$$J_i = \begin{pmatrix} \frac{1}{12} m_i l_i^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{12} m_i l_i^2 \end{pmatrix} \tag{7.5}$$

gdzie i to numer rozpatrywanego złącza.

Dokonując odwzorowania lokalnego tensora bezwładności członu względem układu bazowego uzyskano globalny tensor bezwładności kolejnych członów zapisany w postaci

$$J_0^i = R_i^0 J_i R_i^{0T} \tag{7.6}$$

gdzie R_i^0 to macierz rotacji układu i względem bazy.

Wyprowadzenie równań dynamiki systemu rozpoczęto od zapisania lagranżjanu zgodnie z definicją

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_i} - \frac{\partial K}{\partial \theta_i} + \frac{\partial U}{\partial \theta_i} = \tau_i \quad (7.7)$$

gdzie K to energia kinetyczna, U energia potencjalna. τ_i jest równoważny wypadkowemu momentowi sił oddziałującym na układ.

W ogólności energia kinetyczna K oraz energia potencjalna U wyrażona jest w formie

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{2} m v_{ci}^2 + \frac{1}{2} I \omega_{ci}^2 \\ U &= m g r_{ci} \end{aligned} \quad (7.8)$$

gdzie r_{ci} to wektor odwzorowań pozycji położenia masy punktowej.

W przypadku układów składających się z więcej niż jednego członu opis zależności energetycznych wymaga rozważenia każdego członu z osobna. W tym przypadku K i U wyraża się jako sumę energii poszczególnych elementów systemu.

$$\begin{aligned} K &= \sum_{i=1}^7 K_i \\ U &= \sum_{i=1}^7 P_i \end{aligned} \quad (7.9)$$

Wyprowadzenie równań Lagrange'a II rodzaju zakończono transformacją opisu systemu do postaci macierzowej.

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{17} \\ M_{21} & M_{22} & \cdots & M_{27} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{71} & M_{72} & \cdots & M_{77} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \vdots \\ \ddot{\theta}_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{17} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{27} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{71} & C_{72} & \cdots & C_{77} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \vdots \\ \dot{\theta}_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_7 \end{bmatrix} \quad (7.10)$$

Obliczenia symboliczne dla rozważanego układu wykonano z użyciem oprogramowania MATLAB Symbolic Toolbox.

8. Symulacja numeryczna

W rozdziale omówiono opracowane symulacje numeryczne badanego modelu dynamicznego. W pierwszej części rozdziału przedstawiono rezultaty pracy z pakietem obliczeniowym MATLAB. Następnie zaprezentowano efekty symulacji wykonanej przy użyciu pakietu MATLAB Simulink MultiBody Toolbox.

8.1. Zredukowany model systemu

Model dynamiczny wyprowadzony w oparciu o założenia mechaniki Lagrange'a rozwiązywalny jest w postaci układu równań różniczkowych nieliniowych drugiego rzędu.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \tau_{\theta} \quad (8.1)$$

Pakiet obliczeniowy Matlab narzuca implementację równań różniczkowych w postaci układu nieliniowego pierwszego rzędu. Z tego względu dokonano redukcji rzędu badanego systemu. Równanie różniczkowe nieliniowe przedstawiono w postaci

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (8.2)$$

gdzie x oznacza wektor zmiennych stanu, u wektor momentów.

W pierwszym etapie przekształcono równanie do postaci

$$\ddot{x} = M^{-1}(-C\dot{x} - g + u) \quad (8.3)$$

Następnie dokonano redukcji rzędu, układ transformowano z 7 równań różniczkowych o rzędzie stopnia drugiego do układu 14 równań różniczkowych pierwszego rzędu.

$$\begin{aligned} x_1 &= \theta_1 & x_2 &= \dot{x}_1 = \dot{\theta}_1 \\ x_3 &= \theta_2 & x_4 &= \dot{x}_3 = \dot{\theta}_2 \\ &\vdots & &\vdots \\ x_{13} &= \theta_7 & x_{14} &= \dot{x}_{13} = \dot{\theta}_7 \end{aligned} \quad (8.4)$$

System wyrażono w postaci

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2 \\
 \dot{x}_2 &= f_2(x, u) \\
 \dot{x}_3 &= x_4 \\
 \dot{x}_4 &= f_4(x, u) \\
 &\vdots \\
 \dot{x}_{13} &= x_{14} \\
 \dot{x}_{14} &= f_{14}(x, u)
 \end{aligned} \tag{8.5}$$

gdzie $f_{2i}(x, u)$ opisuje \ddot{q}_i z równania(8.1) dla $i = 1, 2, \dots, 7$, a zmienna stanu x wyraża zmienne uogólnione systemu q, \dot{q} .

8.2. Pakiet obliczeniowy MATLAB

W ramach rozdziału zaprezentowano rozważania analitycznego modelu pojedynczej nogi robota pełniącej funkcję podporu. Przeprowadzono 3 eksperymenty numeryczne. Dla pierwszego przyjęto warunki początkowe, dla których żądana jest równowaga układu. W kolejnych dwóch doświadczeniach przyjmowano warunki początkowe odpowiadające pozycjom kończyny w kolejnych fazach chodu. Zaimplementowany model rozwiązuje układ równań różniczkowych drugiego rzędu w sposób opisany w podrozdziale powyżej.

Ekseperyment I

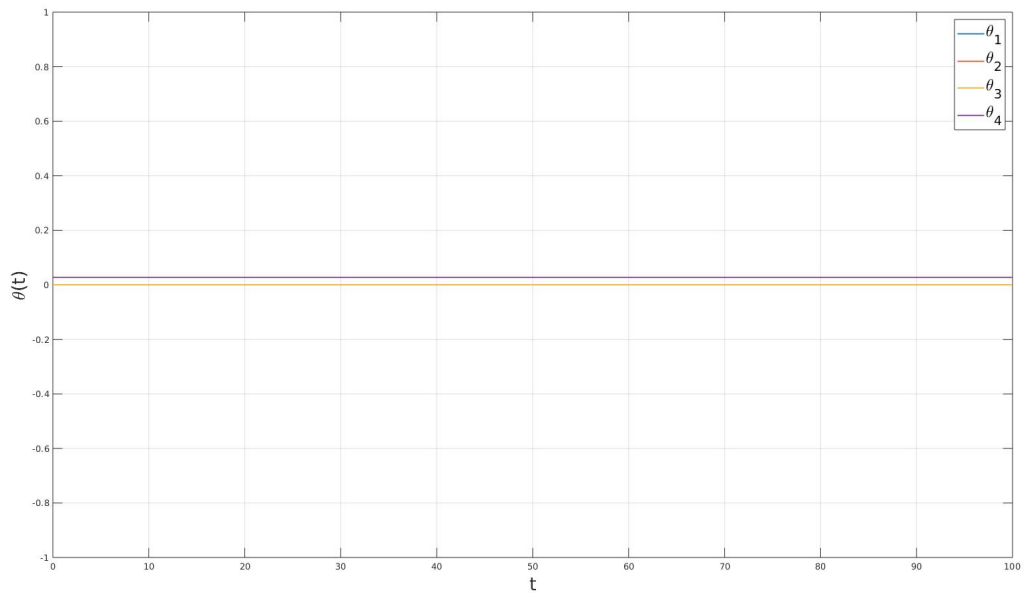
$$\begin{aligned}
 q_{des} &= \left[0 \quad \frac{\pi}{2} \quad 0 \quad \frac{\pi}{2} \right] \\
 \dot{q}_{des} &= \left[0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right]
 \end{aligned} \tag{8.6}$$

Ekseperyment II

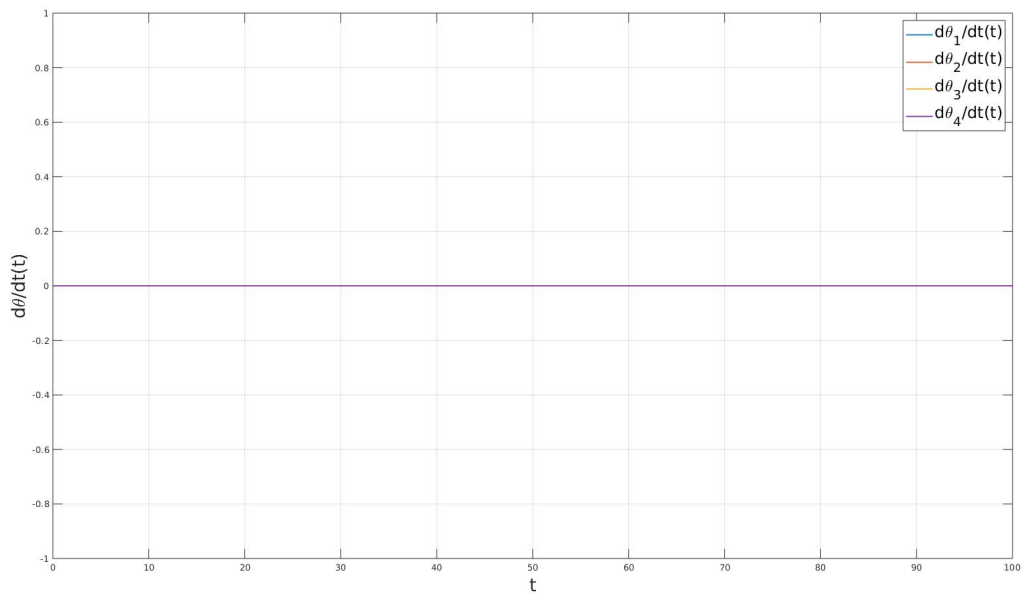
$$\begin{aligned}
 q_{des} &= \left[\frac{\pi}{9} \quad \frac{\pi}{6} \quad \frac{\pi}{18} \quad 0 \right] \\
 \dot{q}_{des} &= \left[0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right]
 \end{aligned} \tag{8.7}$$

Ekseperyment III

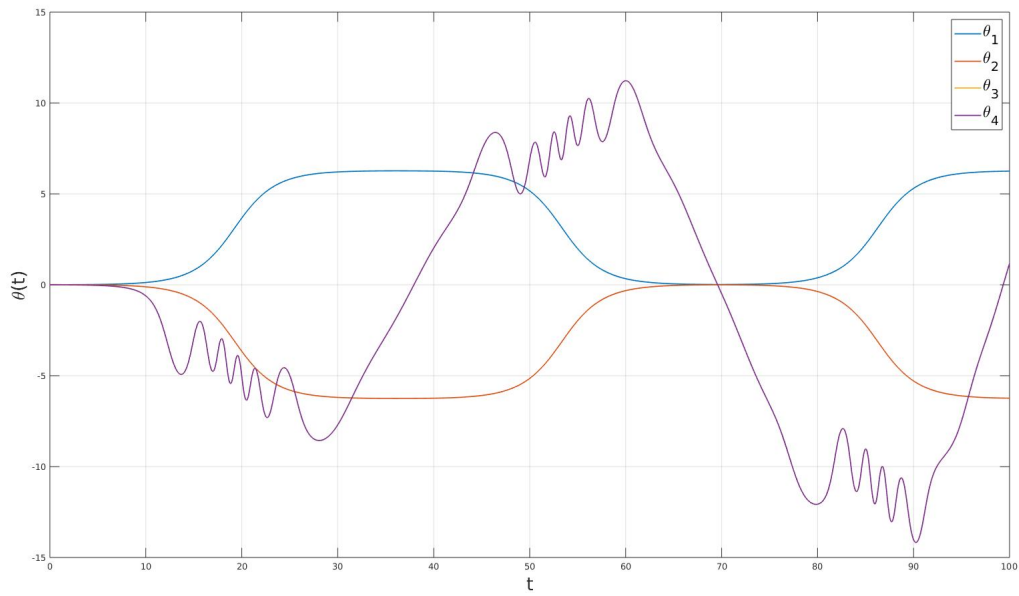
$$\begin{aligned}
 q_{des} &= \left[\frac{\pi}{6} \quad \frac{\pi}{4} \quad \frac{\pi}{9} \quad 0 \right] \\
 \dot{q}_{des} &= \left[0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right]
 \end{aligned} \tag{8.8}$$



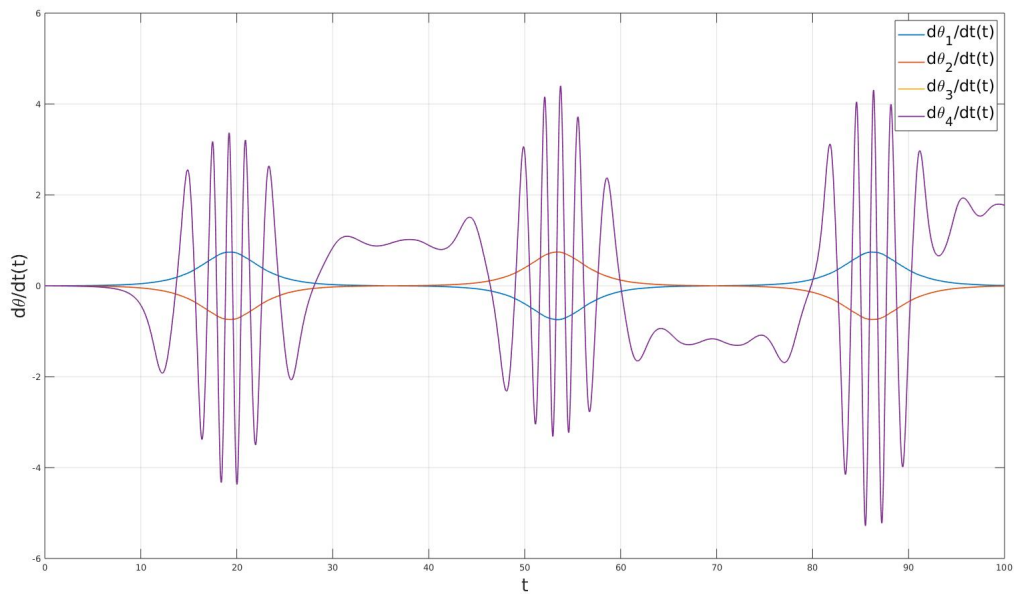
Rys. 8.1. Położenie kątowne - eksperyment I. Opracowanie własne.



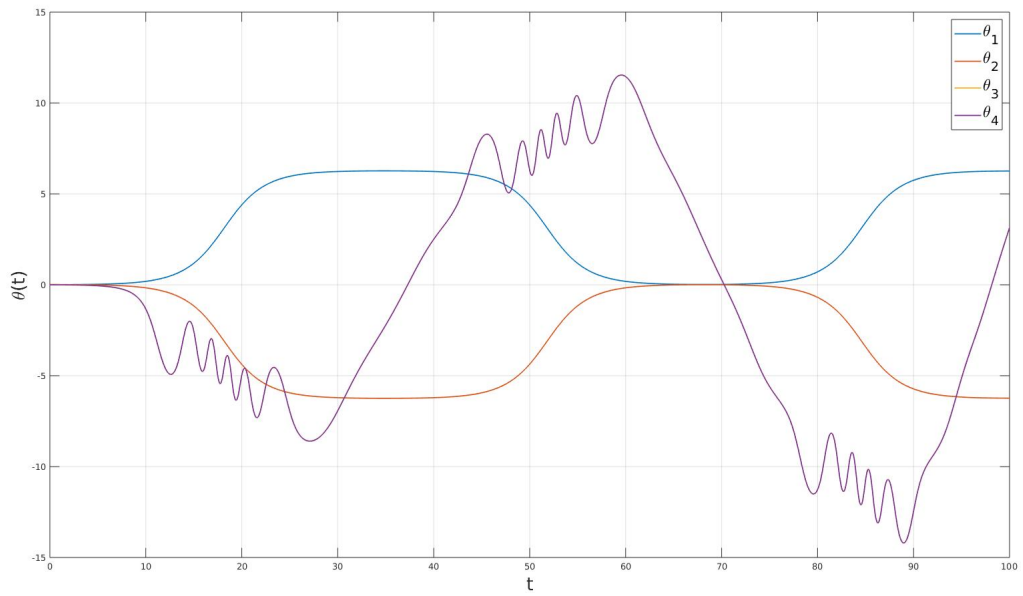
Rys. 8.2. Prędkość kątowna - eksperyment I. Opracowanie własne.



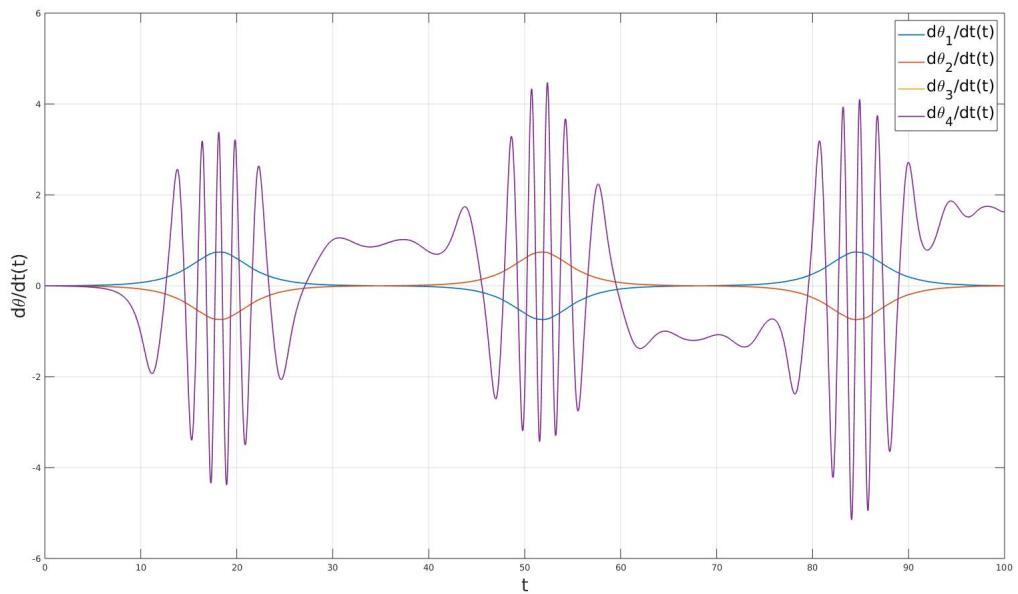
Rys. 8.3. Położenie kątowne - eksperyment II. Opracowanie własne.



Rys. 8.4. Prędkość kątowna - eksperyment II. Opracowanie własne.



Rys. 8.5. Położenie kątowe - eksperyment III. Opracowanie własne.



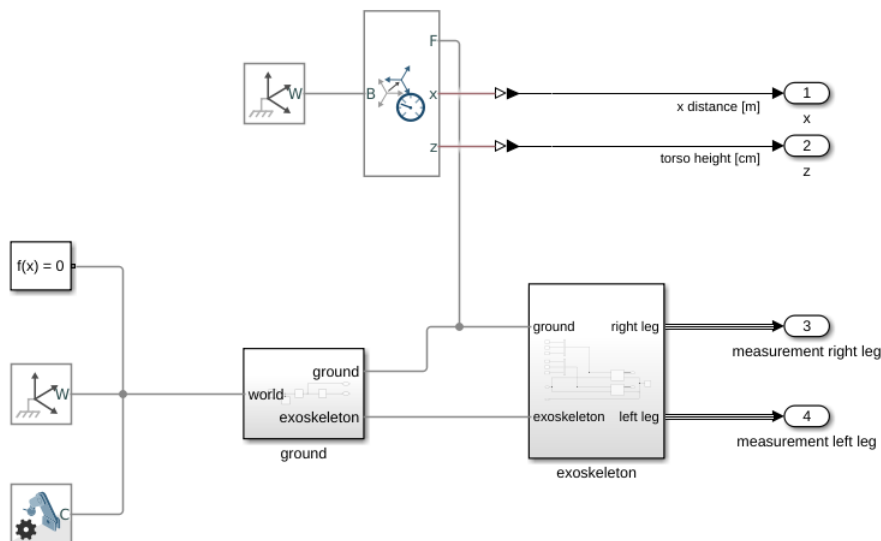
Rys. 8.6. Prędkość kątowa - eksperyment III. Opracowanie własne.

8.3. Pakiet MATLAB Simulink Simscape Multibody

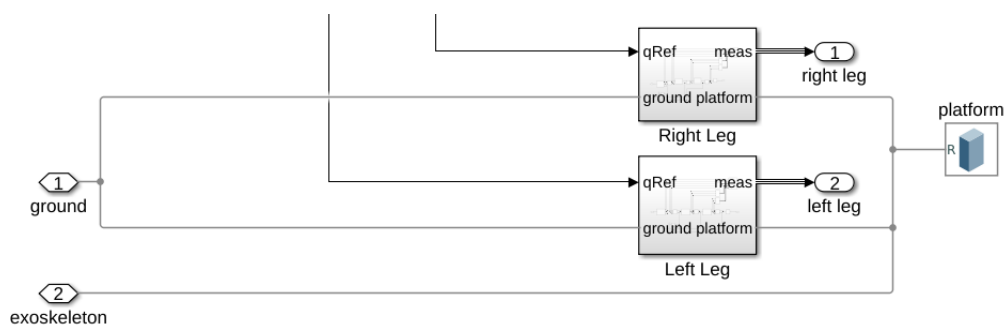
W ramach podrozdziału przedstawiony zostanie System opisany w rozdziale 5 zrealizowany przy użyciu oprogramowania MATLAB SIMULINK MultiBody. Realizację modelu dynamicznego rozszerzono o uwzględnienie oddziaływań robota z podłożem wykorzystując bibliotekę Simscape Multibody Contact Forces.

W modelu Simulink zrealizowano dwa podsystemy, odpowiadające odpowiednio za abstrakcję robota i jego otoczenia. Subsystemem *ground* odwzorowuje właściwości podłoża, po którym porusza się egzoszkielec, z uwzględnieniem gęstości, współczynnika sprężystości oraz tłumienia materiału. Blok odpowiada także za śledzenie pozycji robota w przyjętym globalnym układzie odniesienia dzięki użyciu modułu *6-DOFjoint*.

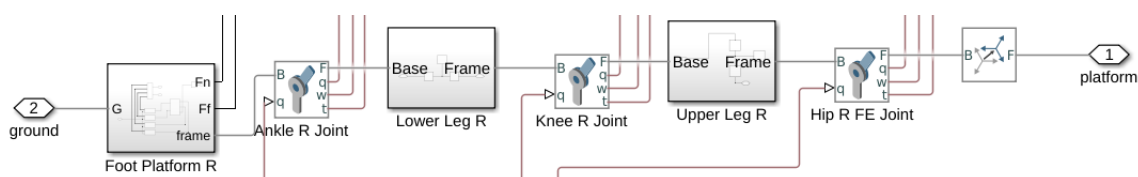
Subsystemem *exoskeleton* zawiera model mechaniczny robota, z uwzględnieniem łańcucha kinematycznego zaproponowanego w rozdziale 5. W celu uproszczenia bryły modelu mechanicznego wykonano parametryzowalny model geometryczny umożliwiający łatwiejsze rekonfigurowanie parametrów systemu. Fizyczne przeguby konstrukcji zaimplementowano używając bloku *Revolute Joint*. Wykorzystanie bloku umożliwiło badanie własności złącz takich jak sztywność, współczynnik tłumienia oraz sprężystości. Z punktu przeprowadzonych w ramach projektu dyplomowego eksperymentów numerycznych istotną funkcjonalnością bloku jest możliwość zadawania bezpośredniego położenia kąтового.



Rys. 8.7. Model systemu egzoszkielec zaimplementowany przy użyciu oprogramowania MATLAB SIMULINK. Opracowanie własne.



Rys. 8.8. Model subsytemu *exoskeleton*. Opracowanie własne.



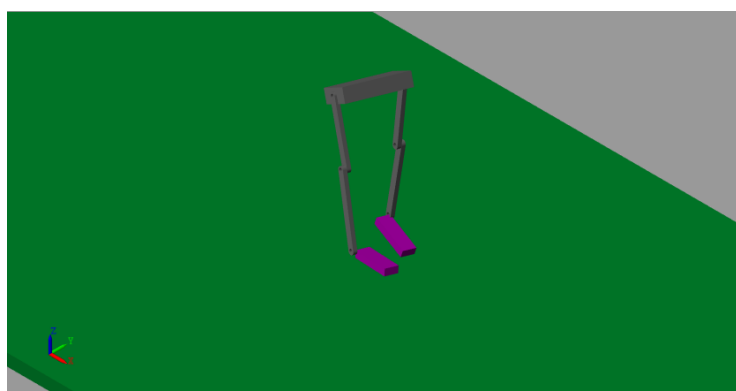
Rys. 8.9. Model subsytemu *Right Leg*. Opracowanie własne.

Dla symulacji założono następujące parametry modelu

Tabela 8.1. Parametry mechaniczne konstrukcji.

parametr	wartość	jednostka
masa stopy z platformą	1.2	kg
masa łydki z dolną częścią ramienia kończyny	4.1	kg
masa uda z górną częścią ramienia kończyny	8.7	kg
masa tułowia z platformą robota	43	kg

Przyjęte wartości podyktowane są odwzorowaniem sytuacji chodu człowieka o wzroście 1.75 metra oraz wadze 60 kilogramów korzystającego ze szkieletu bionicznego.

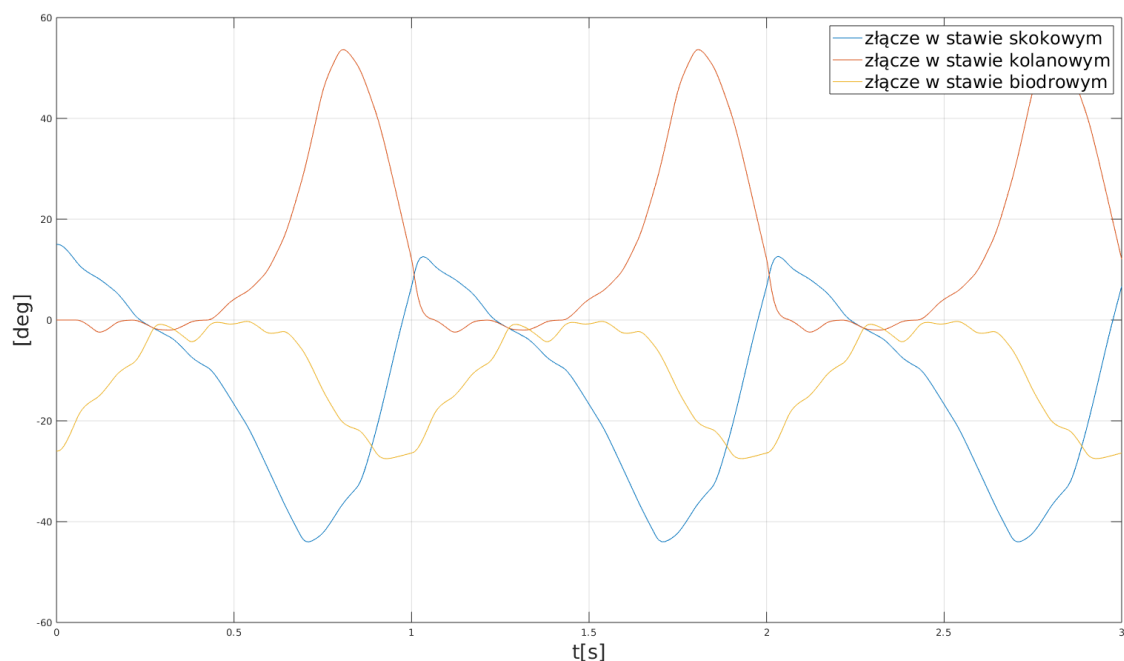


Rys. 8.10. Wizualizacja robota w środowisku MATLAB Simulink MultiBody. Opracowanie własne.

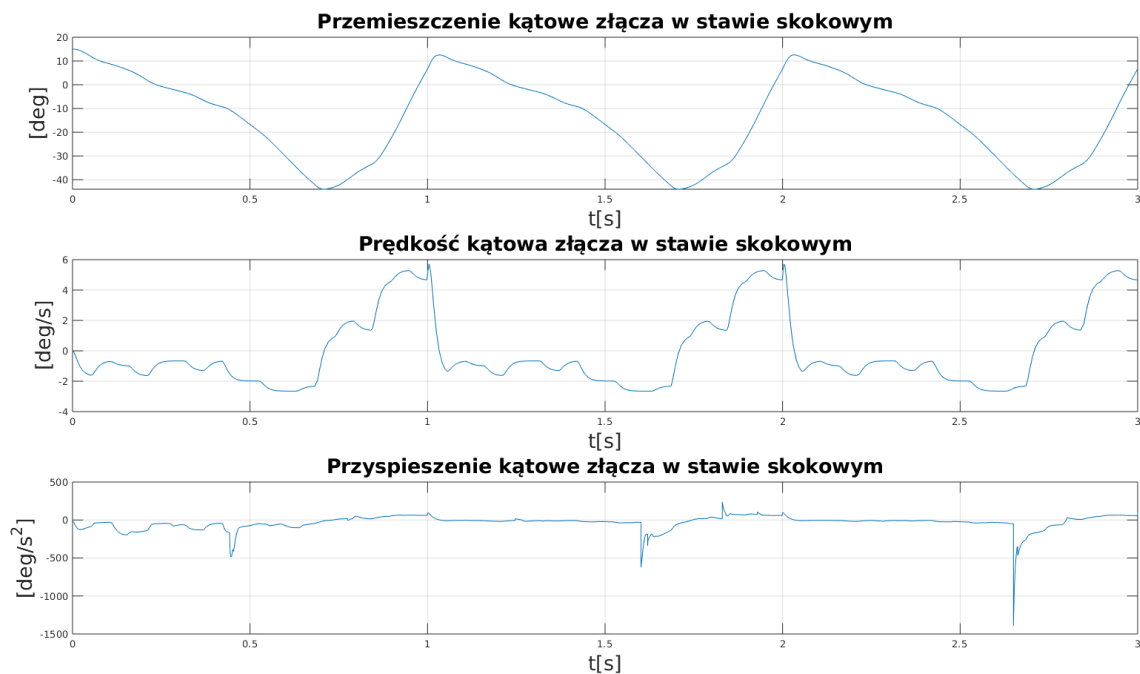
Wyniki przeprowadzonego eksperymentu numerycznego odwzorowującego sytuację chodu człowieka z prędkością 2 km/h przedstawiono na rys. 8.11÷8.16. Rysunek 8.11 zestawia przemieszczenie kątowe poszczególnych złączy kończyny w czasie. Złącze w stawie skokowym w trakcie chodu przyjmuje położenie kątowe w zakresie $[-45^\circ; 15^\circ]$, maksymalna amplituda równa 60° . Złącze w stawie kolanowym przyjmuje wartości dla przemieszczenia kąтового w przedziale $[-3^\circ; 54^\circ]$, maksymalna amplituda równa 57° . Złącze w stawie biodrowym zmienia położenie w zakresie $[-25^\circ; 0^\circ]$, maksymalna amplituda równa 25° .

Rysunki 8.12÷8.14 przedstawiają porównanie zmian położenia, prędkości i przyspieszenia kąowego w czasie odpowiednio dla złączy w stawie skokowym, kolanowym i biodrowym, zarejestrowano 3 cykle chodu. Przebiegi dla wartości osi czasu $0\div 0.6$ [s] reprezentują fazę podporu, dla $0.6\div 1$ [s] fazę przenoszenia, analogicznie dla kolejnych okresów sygnału. W złączu w stawie skokowym najszybsza zmiana prędkości następuje w fazie przenoszenia, w zakresie $[-3^\circ; 6^\circ]$. Analogicznie w złączu kolanowym największa zmiana prędkości następuje w fazie przenoszenia. Dla chwili przejścia z fazy przenoszenia do podporu w sygnale prędkości następuje skok o wartości 3° . Występuje on w momencie styku stopy z podłożem.

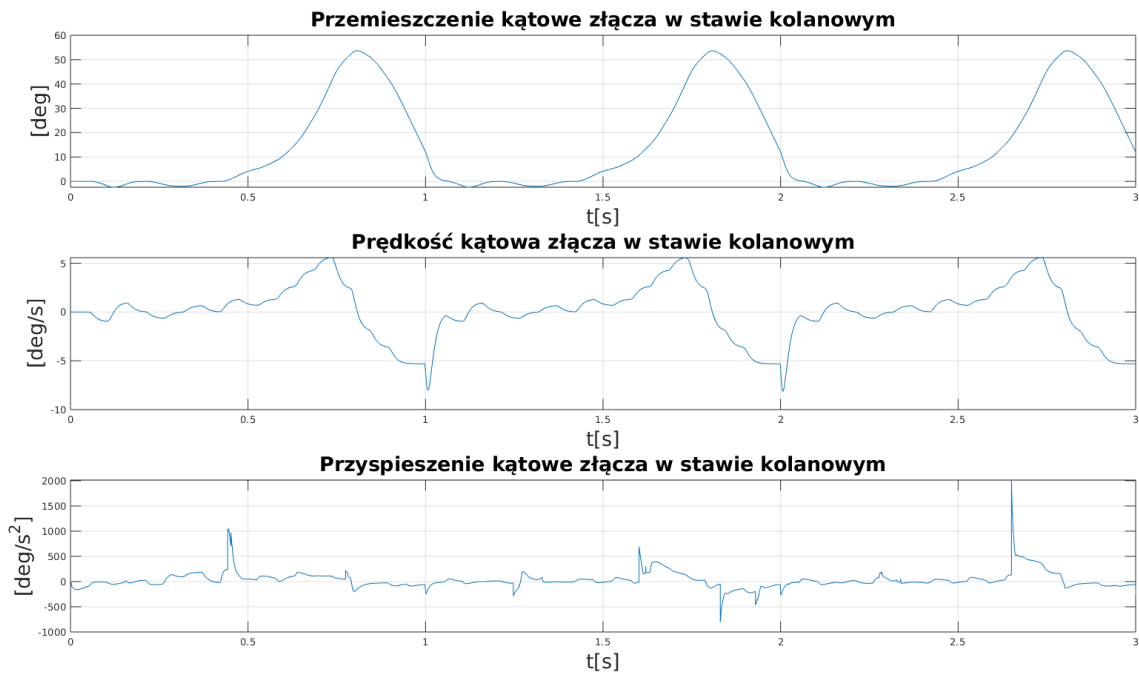
Rysunek 8.15 przedstawia zestawienie momentów obrotowych osiągniętych przez poszczególne złącza w funkcji czasu. Złącze w stawie skokowym osiąga wartości z przedziału $[-500; 200]$ [Nm], złącze w stawie kolanowym $[-800; 1000]$ [Nm], w stawie biodrowym $[-1700; 950]$ [Nm]. Znaczny wzrost wartości momentów następuje przed stykiem ramienia robota z podłożem. W przypadku drugiego zarejestrowanego cyklu chodu wzrost wartości momentów następuje w trakcie trwania fazy przenoszenia. Rysunek 8.16 prezentuje porównanie sił reakcji platform kończyn z podłożem w czasie. Siły osiągają wartości w przedziale $[0; 4000]$ [N].



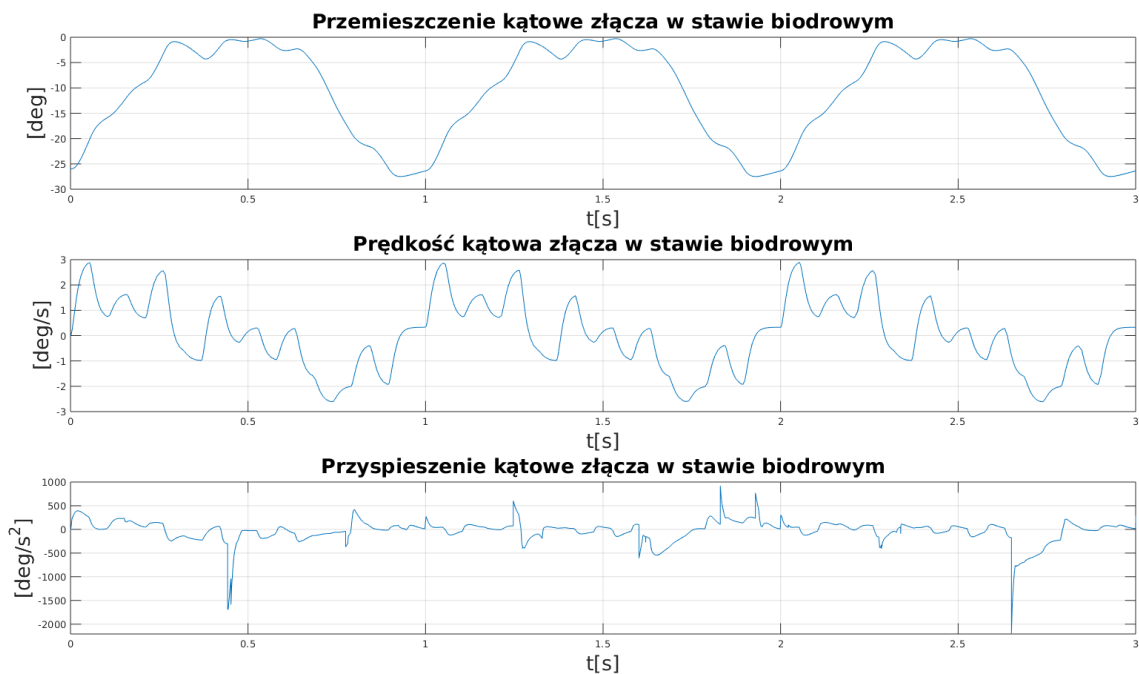
Rys. 8.11. Zestawienie przemieszczeń kątowych złączy prawej kończyny egzozszkieletu. Opracowanie własne.



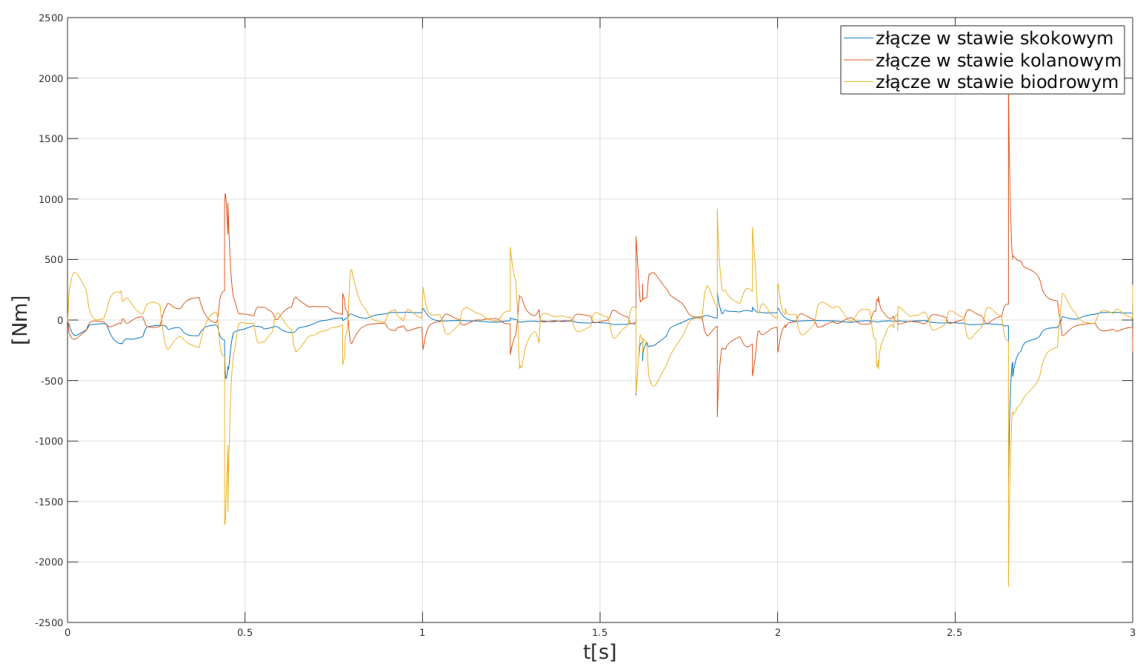
Rys. 8.12. Zestawienie parametrów dynamicznych złącza w stawie skokowym prawej kończyny egzozszkieletu. Opracowanie własne.



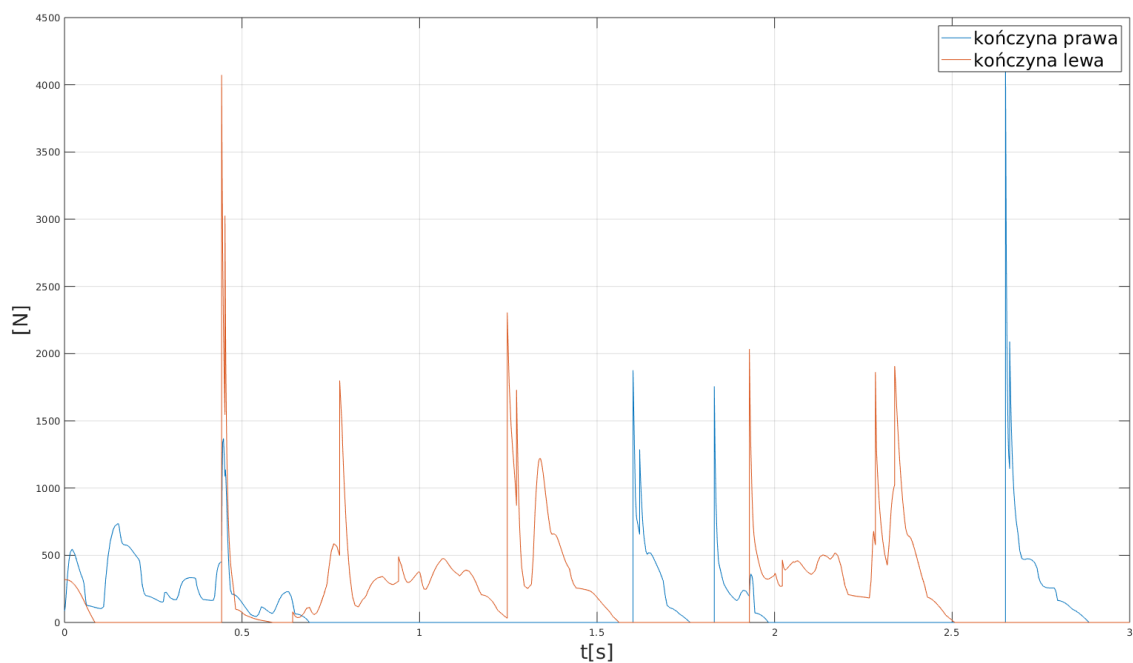
Rys. 8.13. Zestawienie parametrów dynamicznych złącza w stawie kolanowym prawej kończyny egzozszkieletu. Opracowanie własne.



Rys. 8.14. Zestawienie parametrów dynamicznych złącza w stawie biodrowym prawej kończyny egzozszkieletu. Opracowanie własne.



Rys. 8.15. Porównanie momentów obrotowych złączy prawej kończyny egzoszkieletu.
Opracowanie własne.



Rys. 8.16. Porównanie sił normalnych oddziałujących pomiędzy nogami robota a podłożem. Opracowanie własne.

9. Podsumowanie

W ramach projektu dyplomowego zaproponowano model dynamiczny egzoszkieletu wspomagającego motorykę człowieka. Rozwiązano zadanie proste kinematyki, wprowadzono łańcuch kinematyczny uwzględniający rzeczywisty kierunek obrotu poszczególnych złączy w badanej fazie ruchu. W modelu uwzględniono złącze biodrowe o dwóch stopniach swobody, z czym autor nie spotkał się w literaturze.

Przeprowadzono doświadczenie mające na celu identyfikację parametrów dynamicznych chodu człowieka. Zaprojektowano oprogramowanie służące do identyfikacji kątów zgodnie z przyjętymi lokalnymi układami współrzędnych łańcucha kinematycznego.

W ramach pracy w środowisku obliczeniowym MATLAB zaimplementowano dwie symulacje. Pierwsza wykonana przy użyciu pakietu Symbolic Toolbox analizuje układ jednej kończyny, której dynamikę można porównać z własnościami wahadła odwróconego o 3 członach. Druga symulacja zaimplementowana przy użyciu MATLAB Simulink MultiBody odwzorowuje zachowanie układu egzoszkieletu. Eksperymenty numeryczne potwierdzają silnie niestabilną naturę systemu.

9.1. Kierunki dalszych badań

W ramach dalszego rozwoju projektu kluczowe jest wdrożenie dokładniejszej metody akwizycji danych do identyfikacji parametrów dynamicznych chodu. Możliwym rozwiązaniem jest zbudowanie zestawu pomiarowego składającego się z 6 czujników IMU wysokiej klasy. Posiadanie tak uzyskanego zbioru danych pozwoliłoby na identyfikację modelu motoryki człowieka poprzez użycie metod uczenia maszynowego.

Zaproponowany model dynamiczny egzoszkieletu należy rozszerzyć o uwzględnienie dynamiki elementów wykonawczych. Po zakończonej fazie badań możliwy jest dobór aktuatorów wraz z przekładniami o punkcie pracy pozwalającym pokonać moment bezwładności uzyskany podczas eksperymentów numerycznych. Oprócz dynamiki silników należy także uwzględnić model oddziaływań człowieka z urządzeniem. W przypadku tego zagadnienia należy rozdzielić je na zbiór podproblemów zależnych od sprawności motorycznej człowieka, odpowiednio osoba o całkowitym, częściowym paraliżu oraz będąca w trakcie rekonwalescencji.

Bibliografia

- [1] Natalia Frankowska. Opiekun pracy: dr inż. Krystian Szopa. „Analiza wytrzymałościowa egzoszkieletu rehabilitacyjnego z wykorzystaniem pakietu ANSYS”. AGH, 2020.
- [2] Szymon Folek. Opiekun pracy: dr inż. Krystian Szopa. „Modelowanie i analiza kinematyczna egzoszkieletu kończyn dolnych do zastosowań medycznych”. AGH, 2020.
- [3] URL: <https://exoskeletonreport.com/product/rewalk/> (term. wiz. 2019-12-11).
- [4] URL: <https://exoskeletonreport.com/product/hal-lower-limb/> (term. wiz. 2019-12-11).
- [5] URL: <http://fizjobox.pl/stopa-biegacza> (term. wiz. 2019-12-09).
- [6] Barkan Ugurlu i in. „A Soft+Rigid Hybrid Exoskeleton Concept in Scissors-Pendulum Mode: A Suit for Human State Sensing and an Exoskeleton for Assistance”. W: *2019 IEEE 16th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)* (2019), s. 518–523.
- [7] Wei Yang i in. „Simulation of exoskeleton ZMP during walking for balance control”. W: *2018 IEEE 9th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT)* (2018), s. 172–176.
- [8] Giuseppe Menga i Marco Ghirardi. „Lower Limb Exoskeleton for Rehabilitation with Improved Postural Equilibrium”. W: *Robotics 7* (2018), s. 28.
- [9] Xianggang Zhang i in. „A Control Strategy for Maintaining Gait Stability and Reducing Body-Exoskeleton Interference Force in Load-Carrying Exoskeleton”. W: *Journal of Intelligent and Robotic Systems* (2019), s. 1–12.
- [10] Pietro Alberto Miranda-Pereira i Leonardo Paul Milián-Ccopa. „Brief biomechanical analysis on the walking for a lower-limb rehabilitation exoskeleton”. W: *2016 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS)* (2016), s. 67–72.
- [11] Ali Taherifar i in. „A fast kinematic-based control method for lower-limb power augmentation exoskeleton”. W: *2014 Second RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)* (2014), s. 678–683.
- [12] Shengli Song i in. „Dynamic Analysis and Design of Lower Extremity Power-Assisted Exoskeleton”. W: 2017.
- [13] Han Jun Wu i in. „A novel force control method of lower limb exoskeleton based on dual foot force sensors”. W: *2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)* (2018), s. 6414–6419.

-
- [14] Hosang Lee, Hyung Joo Kim i Jaeheung Park. „Control of a nonanthropomorphic exoskeleton for multi-joint assistance by contact force generation”. W: *International Journal of Advanced Robotic Systems* 15 (2018).
- [15] Eugeniusz Rosołowski. *Podstawy Modelowania Systemów - notatki do wykładu*. URL: <http://www.rose.pwr.wroc.pl/PMS/PMS.pdf> (term. wiz. 2019-11-22).
- [16] Reza N. Jazar. *Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2007.
- [17] Juliusz Grabski, Jarosław Strzałko i Bogumił Mianowski. „Podstawy mechaniki analitycznej. Materiały do wykładów i ćwiczeń.” W: 2016.
- [18] URL: https://docs.opencv.org/master/da/d53/tutorial_py_houghcircles.html (term. wiz. 2019-12-05).