

Politechnika Wrocławska
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów

KIERUNEK: Automatyka i Robotyka (AIR)

**PRACA DYPLOMOWA
INŻYNIERSKA**

TYTUŁ PRACY:
System wizualizacji kinematyk
manipulatorów

AUTOR:
Kyryl Kurdiukov

PROMOTOR:
Dr inż. Robert Muszyński,
Katedra Cybernetyki i Robotyki

Streszczenie

Tematem pracy dyplomowej jest system wizualizacji kinematyk manipulatorów. Celem tej pracy jest opracowanie systemu wspomagającego pracę inżyniera robotyka. System pozwoli na wizualizację schematów kinematycznych manipulatorów szeregowych. Za pomocą często stosowanej w robotyce konwencji Denavita-Hartenberga zostanie opisana kinematyka robotów na podstawie 4 parametrów, które są elementami macierzy podstawach przekształceń. System został wyposażony w interfejs użytkownika. Po wprowadzeniu niezbędnych parametrów do opisu kinematyki użytkownik takiego systemu potrafi manipulować położeniami przegubów manipulatora oraz śledzić ruch efektora przy poruszaniu poszczególnymi przegubami. W celu osiągnięcia wymaganej funkcjonalności zostało wybrane środowisko programistyczne Mathematica do opracowania takiego systemu.

Słowa kluczowe: manipulator, kinematyka, Denavit-Hartenberg, Mathematica

Abstract

The subject of the diploma thesis is a visualisation of manipulator kinematics. The goal of this work is to develop a system supporting the work of a robotics engineer. The system will allow visualization of kinematic schemes of serial manipulators. Using the Denavit-Hartenberg convention, which is often used in robotics, the kinematics of robots will be described on the basis of 4 parameters, which are elements of the base transformation matrix. The system has been equipped with a user interface. After introducing the necessary parameters to describe the forward kinematics, the user of such system could manipulate the positions of the manipulator joints and track the movement of the end effector when moving individual joints. In order to achieve the required functionality, the Mathematica programming environment was chosen to develop such a system.

Keywords: manipulator, kinematics, Denavit-Hartenberg, Mathematica

Spis treści

1	Wstęp	3
2	Podstawy teoretyczne	5
2.1	Ruch bryły sztywnej	5
2.1.1	Ruch postępowy	5
2.1.2	Ruch obrotowy	6
2.2	Kinematyka manipulatorów	7
2.2.1	Notacja Denavita-Hartenberga (DH)	7
2.2.2	Przypisywanie układów współrzędnych	9
3	System wspomagający	10
3.1	Środowisko pracy	10
3.1.1	Kryteria wyboru środowiska	10
3.1.2	Pakiety systemu Mathematica	11
3.2	Opis systemu	11
3.2.1	Użyte funkcje	11
3.2.2	Interfejs użytkownika	12
4	Zastosowanie systemu	14
4.1	Przykłady zastosowań	14
4.1.1	Manipulator typu SCARA	14
4.1.2	Manipulator FANUC typu LR Mate	15
4.1.3	Manipulator kartezjański	15
5	Podsumowanie	20
	Literatura	22
	Spis tabel	24
	Spis rysunków	25

Rozdział 1

Wstęp

Czas płynie nieubłaganie, czy tego chcemy czy nie. W połowie ubiegłego wieku, kiedy pojawiła się pilna potrzeba złagodzenia i przyspieszenia pracy człowieka, amerykański inżynier Raymond C. Görtz stworzył pierwszy automatyczny manipulator pokazany na rysunku 1.1, który powtarzając ruchy operatora, przenosił materiały radioaktywne. To stało się początkiem ery manipulatorów w przemyśle. Zaraz po kilkudziesięciu latach amerykańska firma **Unimation** (Danbury, stan Connecticut) pod kierownictwem Josepha F. Engelbergera i George'a Devol sprzedali pierwsze, najpopularniejsze ramię robota przemysłowego PUMA, pokazane na ilustracji 1.2, które zostało opracowane przez Victora Davida Scheinmana w 1978 roku podczas pobytu na Uniwersytecie Stanforda [HMN06, Wikb].

Czym tak naprawdę jest manipulator? Manipulator to sterowane urządzenie lub maszyna, która wykonuje funkcje motoryczne podobne do funkcji ludzkiej ręki podczas przesuwania obiektów bez bezpośredniego kontaktu fizycznego człowieka. Obiekty te mogą być chwyte, przenoszone, przesuwane lub obracane. Połączenie tych ruchów daje dużą swobodę w operowaniu obiektami, utożsamianą z pojęciem manipulacji. Stąd też takie osprzęty nazywa się manipulatorami bądź też „mechanicznym ramieniem”. Dla opisu takiego ramienia wprowadzone zostały takie pojęcia jak: człon automatyki (ogniwo), współrzędne lokalne, współrzędne globalne, kinematyka manipulatora, stopnie swobody oraz notacja Denavita-Hartenberga (DH). Pojęcia te pozwalają w sformalizowany sposób opisać budowę manipulatora oraz zależności występujące pomiędzy kolejnymi elementami składowymi [Wika].

W ostatnich latach następuje dynamiczny rozwój manipulatorów w obszarze ich struktur, ze względu na nowe technologie doskonalące istniejące, co wówczas czasami komplikuje odczyt schematów kinematycznych takich manipulatorów. Celem tej pracy jest opracowanie systemu wspomagającego pracę inżyniera robotyka za pomocą narzędzi do wizualizacji kinematyk manipulatorów. Opracowany system pozwoli na przygotowanie schematów kinematycznych manipulatorów szeregowych na podstawie czterech parametrów opisujących przekształcenia podstawowe układów [DH22]. W zakres pracy wchodzi realizacja następujących zadań:

- Przegląd i wybór narzędzi przydatnych w procesie wizualizacji kinematyk manipulatorów,
- Propozycja prototypowych rozwiązań systemu,
- Ewaluacja propozycji prototypowej i wybór rozwiązania docelowego,



Rysunek 1.1 Mechaniczny manipulator slave-master



Rysunek 1.2 Manipulator Puma firmy Unimation

- Przygotowanie systemu wizualizacji,
- Przykładowe zastosowania systemu dla przygotowania schematów kinematycznych manipulatorów.

Układ pracy jest następujący. W rozdziale 2 pracy zostały omówione podstawy teoretyczne niezbędne do zrozumienia podjętego tematu takie jak ruch bryły sztywnej oraz szczegółowy opis notacji DH, która pozwala na wyznaczenie kinematyki robotów. Rozdział 3 opisuje sposób rozwiązania postawionego zadania opracowania systemu wizualizacji kinematyk robotów za pomocą odpowiednich narzędzi wspomagających. W rozdziale 4 umieszczono przykłady wizualizacji schematów kinematycznych dla różnych manipulatorów o różnej liczbie stopni swobody. Rozdział 5 zawiera podsumowanie i najważniejsze wnioski, które pozwolą na wyrobienie wyrazistego poglądu podjętej tematyki pracy.

Rozdział 2

Podstawy teoretyczne

Niniejszy rozdział zawiera krótkie przypomnienie wiadomości z zakresu podstawowych pojęć robotyki. Podstawą wszystkich działań robota jest ruch jego roboczego ciała. Intuicyjnie, aby przemieścić punkt końcowy manipulatora, konieczne jest przemieszczenie jego ogniwa. Tutaj ważne jest zrozumienie kinematyki robota, mianowicie jak działa, jak połączone są jego ogniwa, które przeguby są rotacyjne, a które wykonują ruch translacyjny. By móc w pełni skorzystać z przedstawianego w pracy narzędzia, niezbędnym jest zrozumienie podstawowych zagadnień kinematycznych.

2.1 Ruch bryły sztywnej

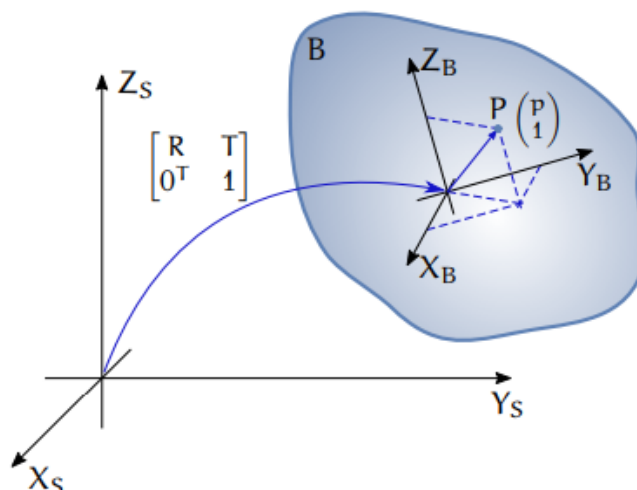
Ciało sztywne, w mechanice, jest układem punktów materialnych, których odległości się nie zmieniają. Ruch bryły sztywnej jest złożeniem dwóch podstawowych ruchów - obrotu i przesunięcia (rysunek 2.1). Opis takich ruchów bazuje się na trójelementowym wektorze położenia (x, y, z) z elementami x, y, z , które również określają położenie w przestrzeni euklidesowej \mathbb{E}^3 w postaci macierzowego układu. Niestety taki opis jest nieliniowy, dlatego nie jesteśmy w stanie zapisać takiej transformacji równań za pomocą jednej macierzy, co znacząco utrudnia rachunki. Z tego powodu do opisu ruchu w mechanice należy wprowadzić współrzędne jednorodne $x = (x, y, z, 1)$, gdzie x, y, z jednoznacznie określają położenie w przestrzeni euklidesowej \mathbb{E}^3 . Takie przekształcenie liniowe pozwala na całkowity opis kinematyczny bryły sztywnej w \mathbb{E}^3 [TM18, Oro18]. Elementy wykorzystane do takiej transformacji należą do specjalnej grupy euklidesowej $\mathbb{SE}(3)$. Elementy grupy $\mathbb{SE}(3)$ można utożsamić z macierzami 4×4 przyjmującymi postać

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^\top & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

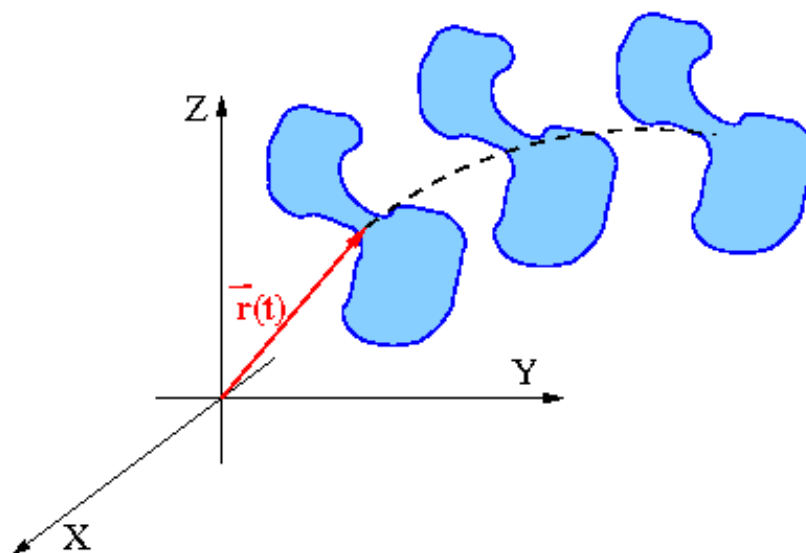
gdzie \mathbf{R} – macierz 3×3 opisująca część rotacyjną ruchu, \mathbf{T} – trójelementowy wektor opisujący część translacyjną ruchu.

2.1.1 Ruch postępowy

Ruch postępowy bryły sztywnej charakteryzuje się tym, że dowolny odcinek łączący dwa punkty bryły sztywnej zachowuje w stosunku do siebie położenie rów-



Rysunek 2.1 Przeszczenie ciała sztywnego [TM18]

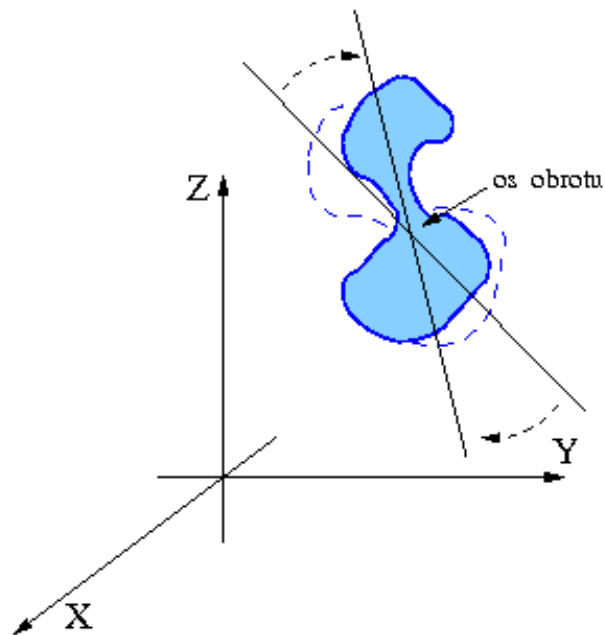


Rysunek 2.2 Ruch postępowy bryły sztywnej [Bw]

noległe (rysunek 2.2). Wszystkie punkty bryły sztywnej w ruchu postępowym mają te same prędkości, przyspieszenie i poruszają się po torach o takim samym kształcie. Ruch taki można sprowadzić do ruchu punktu materialnego. Zwykle w takim przypadku rozpatrujemy środek masy bryły sztywnej [Sci].

2.1.2 Ruch obrotowy

Ruch obrotowy bryły sztywnej to taki ruch, w którym wszystkie punkty bryły sztywnej poruszają się po okręgach, których środki leżą na jednej prostej, zwanej osią obrotu (rysunek 2.3). Punkty na osi obrotu nie poruszają się. Pozostałe punkty poruszają się po łukach. Ich prędkości kątowe są równe [Sci].



Rysunek 2.3 Ruch obrotowy bryły sztywnej [Bw]

2.2 Kinematyka manipulatorów

Kinematyka jest działem opisującym ruchy ciał sztywnych w przestrzeni trójwymiarowej, bez uwzględnienia sił je powodujących. Kinematykę manipulatora o n stopniach swobody, z rozmiernością przegubową \mathcal{Q} i rozmiernością zadaniową $\mathcal{Z} \subset \mathbb{SE}(3)$ oznaczamy jako \mathbf{K} [TM18]

$$\mathbf{K} : \mathcal{Q} \rightarrow \mathcal{Z}. \quad (2.2)$$

Dla przyjętej parametryzacji \mathbf{y} przestrzeni zadaniowej \mathcal{Z} , kinematykę \mathbf{k} można wyrazić zależnością

$$\mathbf{y} = \mathbf{k}(\mathbf{q}), \quad (2.3)$$

gdzie $\mathbf{q} \in \mathcal{Q}$ oznacza wektor współrzędnych przegubowych.

Wyznaczenie punktu w przestrzeni zadaniowej \mathbf{y} na podstawie znajomości współrzędnych przegubowych \mathbf{q} , nazywamy prostym zadaniem kinematyki [Jam17]. Do opisu kinematyki prostej niezbędne jest podanie równań kinematyki robota. Zadanie kinematyki prostej można określić następująco: posiadając dane o zmiennych przegubowych należy określić pozycję i orientację końcówki roboczej. Równania kinematyki mogą zostać wyznaczone wykorzystując metody stosowane w mechanice klasycznej lub wykorzystując notację Denavita-Hartenberga jak zostało to pokazane w podsekcji 2.2.1 poniżej.

2.2.1 Notacja Denavita-Hartenberga (DH)

Umiejętność rozwiązywania prostego zadania kinematyki jest najbardziej podstawową umiejętnością z zakresu robotyki. Algorytm Denavita-Hartenberga jest często spotykaną praktyką w robotyce, który pozwala na wyznaczenie kinematyki szeregowego manipulatora sztywnego. Algorytm ten polega na wyznaczeniu transformacji

Tabela 2.1 Parametry Denavita-Hartenberga manipulatora typu SCARA.

Człon	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	q_1	d_1	a_1	0
2	q_2	0	a_2	0
3	0	q_3	0	0
4	q_4	0	0	0

$A_{i-1}^i(q_i)$ pomiędzy układami współrzędnych kolejnych ogniw łańcucha kinematycznego, gdzie q_i reprezentuje zmienną przegubową ogniwa

$$q_i = \begin{cases} \theta_i & \text{gdy przegub } i \text{ jest obrotowy} \\ d_i & \text{gdy przegub } i \text{ jest postępowy} \end{cases}, \quad (2.4)$$

a następnie złożeniu tych transformacji w celu uzyskania kinematyki robota $\mathbf{K}(\mathbf{q})$ [TMM⁺00]

$$\mathbf{K}(\mathbf{q}) = \prod_{i=1}^n \mathbf{A}_{i-1}^i(q_i) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_0^n(\mathbf{q}) & \mathbf{T}_0^n(\mathbf{q}) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

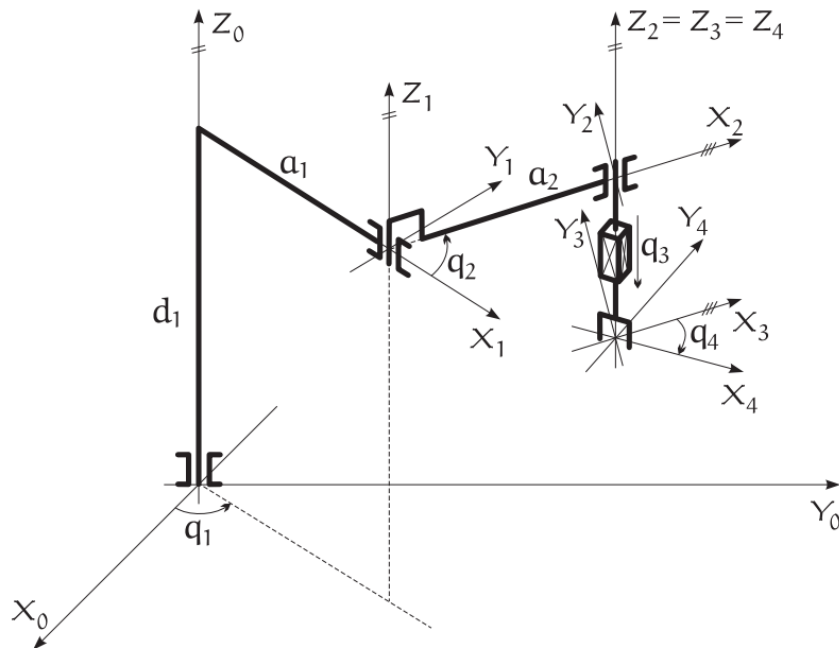
gdzie \mathbf{A}_{i-1}^i oznacza złożenie macierzy podstawowych przekształceń

$$\mathbf{A}_{i-1}^i = \mathbf{Rot}(Z, \theta_i) \mathbf{Trans}(Z, d_i) \mathbf{Trans}(X, a_i) \mathbf{Rot}(X, \alpha_i), \quad (2.6)$$

gdzie **Rot** i **Trans** to odpowiednio rotacja i translacja w osi Z i X, a parametry $\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i$ charakteryzują i-te ogniwa manipulatora. Interpretacja fizyczna parametrów DH określające geometrię ramienia manipulatora wygląda następująco [prDH]:

- θ_i : kąt przegubu, kąt między X_{i-1} i X_i (mierzony wokół Z_{i-1}),
- d_i : odsunięcie przegubu, odległość między O_0 a przecięciem osi Z_{i-1} i X_i (wzdłuż Z_{i-1}),
- a_i : długość członu, odległość między osiami Z_{i-1} i Z_i (wzdłuż X_i),
- α_i : skrzywienie członu, kąt między Z_{i-1} i Z_i (mierzony wokół X_i).

Rozwiązując podobne problemy w oparciu o uproszczone schematy kinematyczne należy pamiętać o wybraniu globalnego układu współrzędnych stanowiska, w którym pracuje manipulator i względem którego wykonywane są wszystkie jego czynności. Współrzędne globalne opisane są względem układu podstawy. Kolejnym krokiem jest przypisanie lokalnych układów współrzędnych w pewien specyficzny sposób dla każdego członu, co daje możliwość opisu transformacji czterema parametrami w oparciu o notację Denavita-Hartenberga. Przykładowa interpretacja parametrów DH została pokazana na rysunku 2.4 dla schematu kinematycznego manipulatora typu SCARA, a w tabeli 2.1 zostały zebrane parametry opisujące kinematykę tego robota.



Rysunek 2.4 Interpretacja fizyczna parametrów DH manipulatora typu SCARA [TMM+00]

2.2.2 Przypisywanie układów współrzędnych

Ten krok polega na związaniu z przegubami manipulatora układów współrzędnych, na podstawie których zostaną wyznaczone parametry i zmienne przegubowe, co pozwoli na wyznaczenie macierzy podstawowych przekształceń A_{i-1}^i .

1. Każdy stopień swobody manipulatora ma swój lokalny układ współrzędnych przymocowany na geometrycznym końcu ogniwa
2. Początek lokalnego układu X_{i-1}, Y_i, Z_i to koniec ogniwa.
3. Oś Z_i należy zamocować w taki sposób, aby zmienna przegubowa q_i wykonywała względem niej ruch.
4. Oś Z_n (ostatnia) może być wybrana dowolnie (nie ma tam stopnia swobody)
5. Jeśli dwie kolejne osie Z_{i-1} i Z_i
 - przecinają się, to oś $X_i = \pm Z_{i-1} \times Z_i$,
 - są równoległe, to $X_i \perp Z_i$ i $X_i \perp Z_{i-1}$, to oś X_i powinna przechodzić wzdłuż ogniwa,
 - są skośne (nie są \parallel , nie przecinają się) $X_i \perp Z_i$ i $X_i \perp Z_{i-1}$, to oś X_i powinna być jak najbliżej osi Z_{i-1}, Z_i .
6. Jeśli lokalne układy współrzędnych zostały wybrane zgodnie z punktami (1-5), to można zapisać następującą transformację A_{i-1}^i pomiędzy układem $(i-1)$ oraz i dla i -tego stopnia swobody manipulatora.

Rozdział 3

System wspomagający

3.1 Środowisko pracy

W celu implementacji systemu wspomagającego należy użyć środowisko programistyczne, które pozwoli na łatwe uzyskanie wymaganej funkcjonalności. Środowisko programistyczne to przede wszystkim zestaw narzędzi, które pozwalają na stworzenie oprogramowania. W skład takiego środowiska może wchodzić system operacyjny, system kontroli wersji, środowisko uruchomieniowe, narzędzia do testowania, zaawansowany edytor kodu, który pozwala jednym naciśnięciem przycisku uruchomić debugger, a sam kompilator i jego język, który umożliwi uruchamianie programu linia po linii. Istnieje dużo środowisk dedykowanych dla konkretnym językom programowania ze względu na specyfikę wykonywanych zadań.

3.1.1 Kryteria wyboru środowiska

Na potrzeby realizacji tej pracy wytypowano 3 środowiska programistyczne najbardziej pasujące do realizacji systemu wspomagającego. W celu dokonania wyboru najlepszego z nich posłużono się 8 kryteriami, które zebrano w tabeli 3.1. Każdemu kryterium przypisano wagę od 1 do 5 oraz punkty w skali 1-3, gdzie 3 oznacza najlepsze dopasowanie.

Tabela 3.1 Zestawienie cech wybranych środowisk programistycznych

Kryteria	Waga	Python	Matlab	Mathematica
Wizualizacja 2D i 3D	5	1	2	3
Obliczenie symboliczne i numeryczne	5	2	1	3
Narzędzia wspomagające	3	3	2	1
Tworzenie aplikacji	4	1	2	3
Koszt	4	3	2	1
Wydajność	2	1	2	3
Interfejs użytkownika	2	1	2	3
System podpowiedzi	1	1	2	3
Średnia ważona		1.74	1.81	2.46

Jak wynika z tabeli najlepiej nadającym się do realizacji systemu wspomagającego środowiskiem jest system Mathematica. Środowisko Mathematica firmy Wolfram Research, Inc. to wszechstronne środowisko realizacji obliczeń matematycznych, składu dokumentu technicznego i tworzenia aplikacji. Jest komercyjnym systemem obliczeń symbolicznych i numerycznych opracowany w 1988 przez Stephena Wolframa. W ciągu swojego istnienia stał się popularny w środowisku naukowców i inżynierów [Mat].

3.1.2 Pakiety systemu Mathematica

Środowiska Mathematica nie może się pochwalić szerokim wyborem pakietów jak Python bądź Matlab a szczególnie pakietami, które są dedykowane robotyce. Z dostępnych pakietów dla Mathematica wybrano pakiet Robotica [SB17], który zawiera w sobie zbiór przydatnych funkcji rozwiązywania problemów robotyki. Autorami pakietu wspomagającego są John Nethery i M.W. Spong, który został zaktualizowany przez Mohammada Sultana i Aarona T. Beckera [SB]. Pakiet Robotica umożliwia między innymi [JM18]:

- opisanie kinematyki robota z użyciem parametrów DH,
- wyliczenie macierzy podstawowych przekształceń i całej kinematyki,
- wyliczenie elipsoidy manipulowalności, gdy są podane wartości zmiennych przegubowych,
- wyprowadzenie modelu dynamiki poprzez podanie współrzędnych środka masy, mas i macierzy inercji poszczególnych przegubów,
- wyliczenie macierzy modelu dynamiki według formalizmu Eulera-Lagrange'a.

3.2 Opis systemu

Opracowany system wizualizacji kinematyk manipulatorów pozwala na wizualizację schematów manipulatorów szeregowych na podstawie podanych przez użytkownika parametrów Denavita-Hartenberga. Na podstawie tych parametrów system wyliczy macierze podstawowych przekształceń w układach oraz kinematykę robota. Robot może być wyposażony w różną liczbę przegubów i różne typy przegubów. Wystarczy tylko podać wartości parametrów DH oraz rodzaj przegubu. W celach pokazania, że opracowany system potrafi zwizualizować manipulator o różnych parametrach i kształtach w rozdziale 4 poniżej zostały umieszczone przykłady różnych typów manipulatorów.

3.2.1 Użyte funkcje

Do opracowania systemu zostały wykorzystane następujące funkcje środowiska Mathematica.

- **Manipulate**[$expr, \{u, u_{min}, u_{max}\}$] – dba o interfejs dla zademonstrowania, co się stanie, gdy będą zmieniane wybrane parametry. Generuje wersję $expr$ z dodanymi kontrolkami, aby umożliwić interaktywną manipulację wartością u .
- **Graphics3D**[$primitives, options$] – reprezentuje obraz graficzny w przestrzeni trójwymiarowej, gdzie $primitives$ są obiektami, a $options$ są dodatkowymi opcjami.
- **Control**[u, dom] – reprezentuje kontrolkę interaktywną dla zmiennej u w domenie dom .
- **RotationTransform**[θ, w] – przekształcenie obrotowe. Pozwala na obrót 3D θ wokół kierunku wektora 3D w .
- **TranslationTransform**[v] – przekształcenie postępowe punktów przez wektor v .
- **MemberQ**[$lista, forma$] – zwraca wartość `True`, jeśli element listy pasuje do $forma$, a wartość `False` w przeciwnym razie.

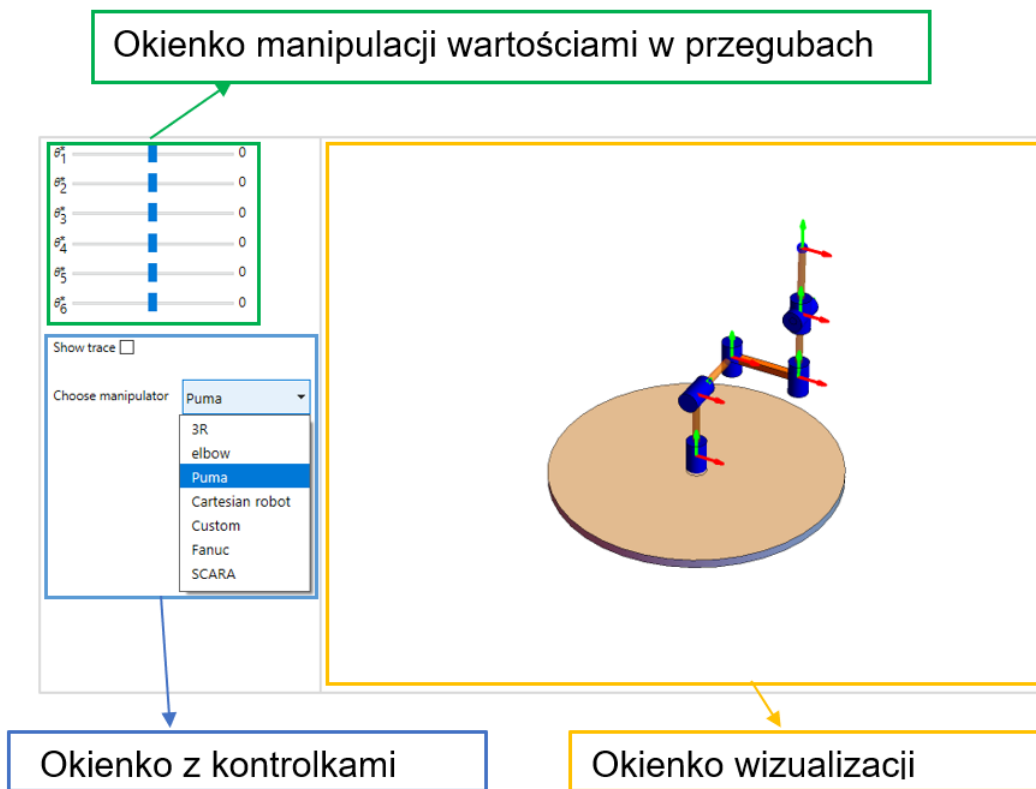
W trakcie implementacji systemu zostały przygotowane poniższe funkcje:

- **drawJoint**[α, d, r, θ] – funkcja służąca do rysowania ogniw manipulatora, na podstawie parametrów DH,
- **drawCoordAxes** – rysowanie osi układów współrzędnych,
- **DHTransform**[θ, d, r, α] – funkcja reprezentująca macierze podstawowych przekształceń, A_{i-1}^i opisane równanie (2.6),
- **PlotManipulator**[$DHParameters$] – funkcja służąca do rysowania całego manipulatora na podstawie parametrów DH opisujących przekształcenia w układach.

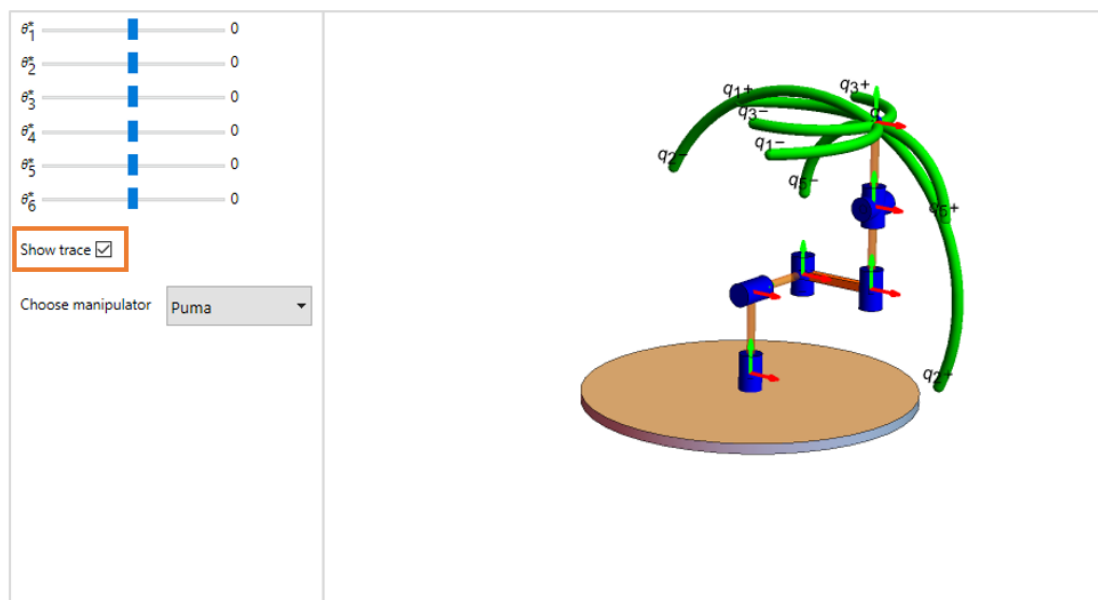
3.2.2 Interfejs użytkownika

System do wizualizacji został wyposażony w interfejs sterowania wizualizacją. Interfejs można podzielić na 3 okienka (zobacz rysunek 3.1):

1. okienko wizualizacji schematu kinematycznego robota,
2. okienko manipulacji położeniami przegubów,
3. okienko z kontrolkami wyboru modeli robota, zaznaczenie śladu ruchu efektor (obrotu bądź przesunięcia) przy poruszaniu poszczególnymi przegubami (rysunek 3.2).



Rysunek 3.1 Interfejs użytkownika



Rysunek 3.2 Zaznaczenie śladu ruchu efektora

Rozdział 4

Zastosowanie systemu

4.1 Przykłady zastosowań

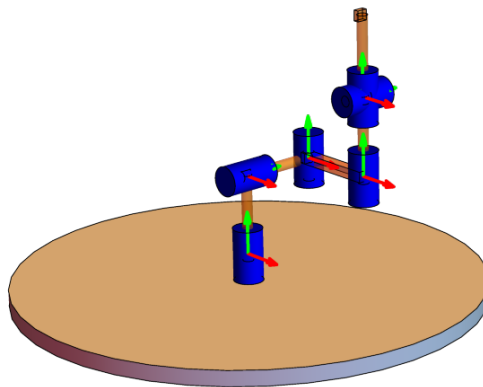
W celu ilustracji funkcjonalności opracowanego systemu w rozdziale przedstawimy kilka przykładów jego zastosowań. Dla rozpoczęcia wizualizacji kinematyki na przykładzie manipulatora PUMA „o 6 stopniach swobody (4.1)” należy wprowadzić niezbędne parametry DH w odpowiedniej formie jak pokazano poniżej

$$\text{DHParameters} = \begin{pmatrix} q1 & 0.5 & 0 & -\frac{\pi}{2} \\ q2 & 0.5 & 0 & \frac{\pi}{2} \\ q3 & 0 & 0.5 & 0 \\ q4 & 0.5 & 0 & -\frac{\pi}{2} \\ q5 & 0 & 0 & \frac{\pi}{2} \\ q6 & 0.5 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Dla zdefiniowanych parametrów zostanie wyliczona macierz podstawowych przekształceń $A_{i-1}^i(q_i)$ dla każdego przegubu, a w przypadku Puma przemnożone macierze od $A_0^1(q_1)$ do $A_5^6(q_6)$ pozwolą na uzyskanie kinematyki całego robota. Po uzyskaniu kinematyki robota zostanie przeprowadzona wizualizacja szkieletu manipulatora oraz jego przegubów w postaci walców (obrót) bądź sześcianów (przesunięcie) w zależności od rodzaju zmiennej przegubowej. Wynik wizualizacji kinematyki dla manipulatora PUMA można zobaczyć na rysunku 4.1. Z tego względu, że robot Puma nie posiada przegubów postępowych nie zobaczymy żadnych sześcianów lecz tylko walce.

4.1.1 Manipulator typu SCARA

Roboty typu SCARA (Selective Compliant Assembly Robot Arm) (rysunek 4.2) [SCA] charakteryzują się prostą budową wykorzystującą przeguby obrotowe z pionową osią obrotu. Głównie są one wykorzystywane do przenoszenia, pakowania i montażu obiektów. Wizualizacja śladu ruchu efektora dla manipulatora SCARA została pokazana na rysunku 4.5.



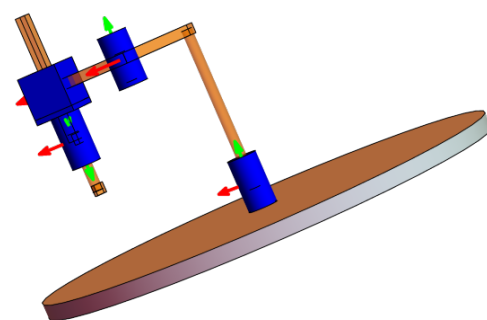
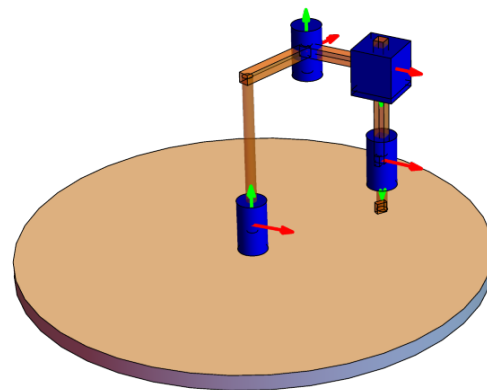
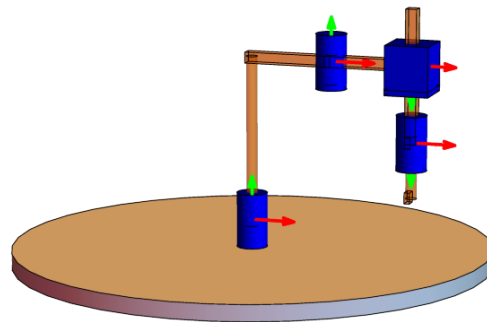
Rysunek 4.1 Wizualizacja kinematyki manipulatora typu PUMA

4.1.2 Manipulator FANUC typu LR Mate

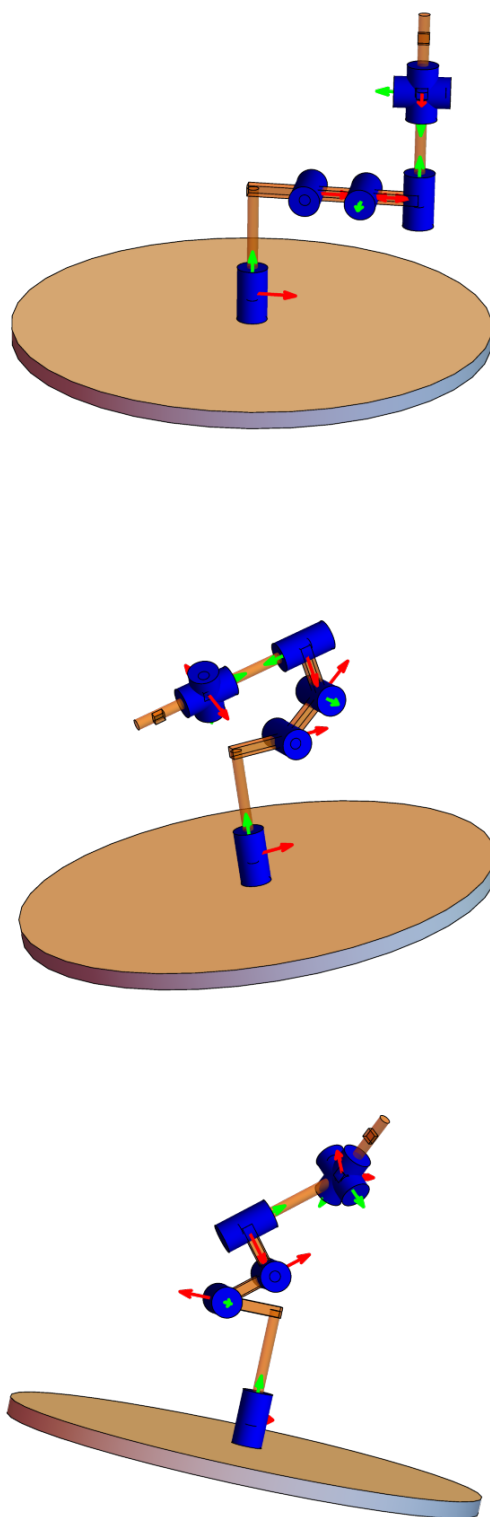
FANUC LR Mate (rysunek 4.3) [tLM] to kompaktowy 6-osiowy robot o zasięgu mniej więcej ludzkiego ramienia. Charakteryzuje się zaawansowaną serwotechnologią i niezwykle sztywnym ramieniem. Służy do uniwersalnych zastosowań w aplikacjach przemysłowych. Wizualizacja śladu ruchu efektora dla manipulatora FANUC LR Mate została pokazana na rysunku 4.5.

4.1.3 Manipulator kartezyjski

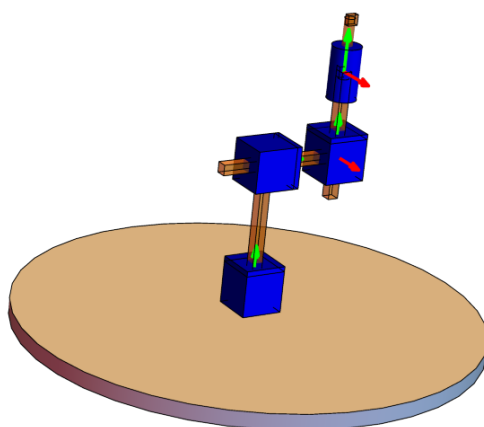
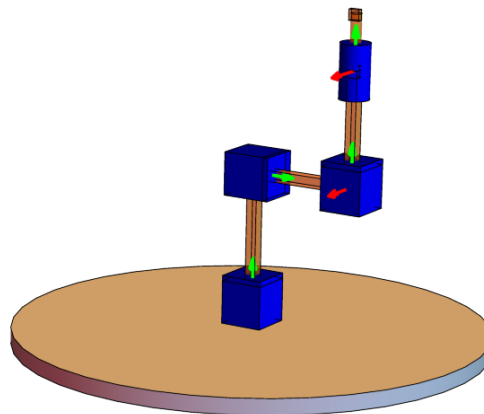
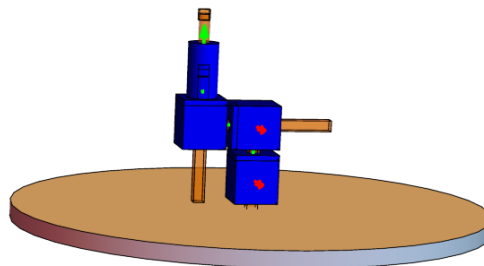
Robot kartezyjski (rysunek 4.4) charakteryzuje się 3 postępowymi przegubami, które pozwalają na przesuwanie nadgarstka w górę i w dół, do wewnątrz i na zewnątrz oraz do tyłu i do przodu. Używany głównie do przenoszenia różnorodnych materiałów na liniach produkcyjnych. Wizualizacja śladu ruchu efektora dla manipulatora kartezyjskiego została pokazana na rysunku 4.5.



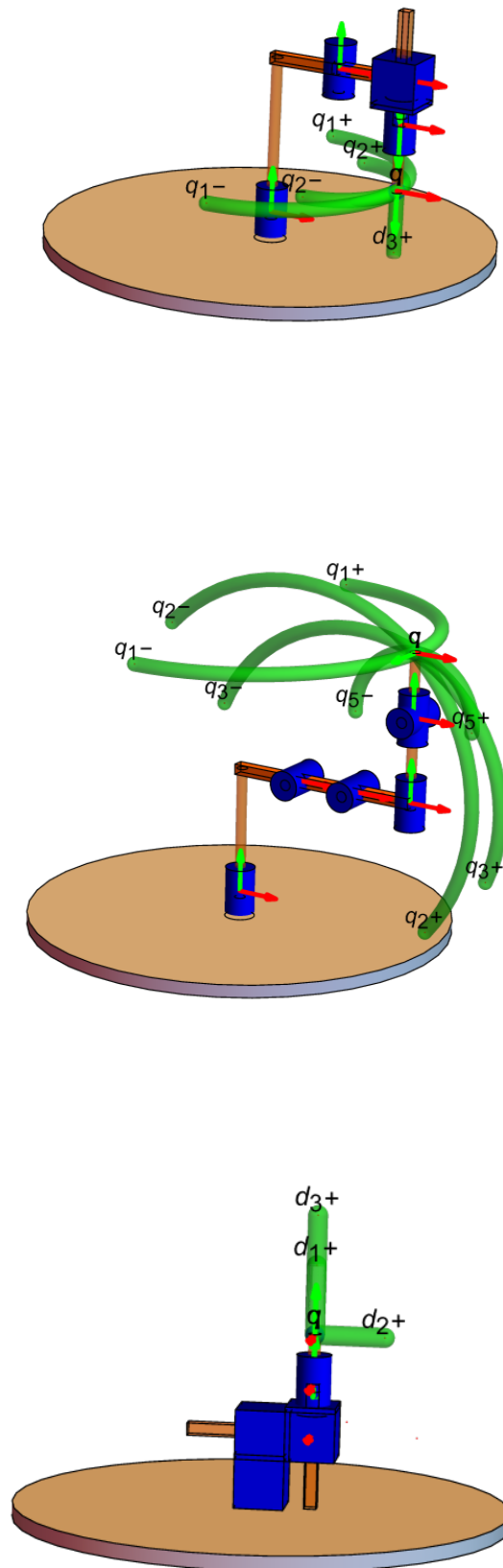
Rysunek 4.2 Wizualizacja kinematyki manipulatora typu SCARA



Rysunek 4.3 Wizualizacja kinematyki manipulatora FANUC typu LR Mate



Rysunek 4.4 Wizualizacja kinematyki manipulatora kartezyjskiego



Rysunek 4.5 Wizualizacja śladu ruchu efektora dla manipulatorów 4.1.1, 4.1.2 i 4.1.3

Rozdział 5

Podsumowanie

W tym rozdziale wymienione najważniejsze wnioski, które pozwolą na wyrobienie wyrazistego poglądu na daną tematykę. Celem pracy było opracowanie systemu wspomagającego prace inżyniera robotyka. W ramach pracy opracowano system wizualizacji kinematyk manipulatorów, który upraszcza proces poznania struktury manipulatora, pozwala na wizualizację schematów manipulatorów szeregowych na podstawie podanych przez użytkownika parametrów Denavita-Hartenberga. Na podstawie tych parametrów system wyliczył macierze podstawowych przekształceń w układach oraz kinematykę robota. Robot może być wyposażony w różną liczbę przegubów i różne typy przegubów. Wystarczy tylko podać wartości parametrów DH. W pracy przytoczono podstawy matematyczne niezbędne do zrozumienia przedstawianych zagadnień takich jak opis ruchu bryły sztywnej, w tym ruchu postępowego i obrotowego, z wykorzystaniem elementów specjalnej grupy euklidesowej $SE(3)$ [Oro18]. Scharakteryzowano pojęcie kinematyki K ciała sztywnego, a także podano jej „interpretację macierzową (2.5)”.

Została opisana notacja Denavita-Hartenberga (DH), mianowicie interpretacja używanych parametrów i sposób związania z przegubami manipulatora układów współrzędnych na podstawie których te parametry wyznaczono, która pozwala na rozwiązywanie prostego zadania kinematyki 4 parametrami. Algorytm ten wyznaczał „macierze podstawowych przekształceń (2.6)” pomiędzy lokalnymi układami współrzędnych członów, które po przemnożeniu pozwalały na uzyskanie kinematyki całego robota.

W pracy kolejno przeprowadzono analizę 3 potencjalnych środowisk programistycznych najbardziej pasujących do realizacji systemu wspomagającego. Za pomocą tabeli 3.1 podjęto odpowiednią decyzję opracowania systemu w środowisku Wolfram Mathematica, co pozwoliło na uzyskanie wymaganej funkcjonalności. Pakiet Robotica 3.1.2 zdecydowanie uprościł proces programowania.

Oceniając zaprezentowane przykłady wizualizacji schematów kinematycznych w rozdziale 4 można stwierdzić, iż opracowany system spełnia założone wymagania, lecz na pewno by się przydało poddać taki system ocenie przez szersze grono użytkowników w celach rzetelniejszej weryfikacji realizacji postawionych założeń, co pozwoli na uzyskanie cennych opinii. System został wyposażony w interfejs, który w logiczny sposób pozwala na interakcję użytkownika z robotem. Użytkownik potrafi zmieniać położenie przegubów, przełączać się pomiędzy schematami kinematycznymi, włączyć śledzenie śladu ruchu końcówki efektora i zmieniać perspektywę

roboty za pomocą okienka interakcji. Wizualizacja schematów kinematycznych jest bardzo przydatnym narzędziem dla inżynierów a szczególnie robotyków.

Jedną z potencjalnych dróg rozwoju systemu jest zdefiniowanie odpowiedniej trajektorii ruchu końcówki efektora przy użyciu algorytmu kinematyki odwrotnej. Kolejną z wielu innych potencjalnych opcji jest możliwość wyliczenia elipsoidy manipulowalności robota. Opis kinematyki robota jest bardzo ważnym elementem projektowania manipulatora lecz nie jest dość łatwym. Mamy nadzieję, iż opracowany system uprości czytelnikom zainteresowanym w dziedzinie robotyki proces zapoznania się z tematyką oraz projektowaniem szkieletów manipulatorów.

Literatura

- [Bw] Brain-wiki. Bryły sztywne. https://brain.fuw.edu.pl/edu/index.php/FizykaI_FMiN/Bryły_szttywne_1.
- [DH22] Notacja Denavita-Hartenberga. <https://robotyka.pl/5-4-notacja-denavita-hartenberga/>, 2022.
- [HMN06] HMN.wiki. Unimacja. <https://hmn.wiki/pl/Unimation>, 2006.
- [Jam17] S. Jamroziński. Charakterystyki geometryczno-ruchowe stacjonarnych robotów manipulacyjnych. https://kcir.pwr.edu.pl/~mucha/Pracki/Sebastian_Jamrozinski_praca_inzynierska.pdf, 2017.
- [JM18] Janusz Jakubiak, Robert Muszyński. Narzędzia komputerowe w robotyce - modelowanie kinematyki i dynamiki. http://diablo.kcir.pwr.edu.pl/~jjakubia/ProjektPrzejsciowy/docs/projprze_modelowanie_narzedzia.pdf, 2018.
- [Mat] Wolfram Mathematica. <https://www.wolfram.com/mathematica/>.
- [Oro18] Roberto Orozco. Błąd jaki jest każdy widzi. studium zachowań, 2018.
- [prDH] Kinematyka prosta: reprezentacja Denavita-Hartenberga. http://staff.uz.zgora.pl/wpaszke/materialy/air/PRwyklad_4.pdf.
- [SB] Mohammad Sultan, Aaron T. Becker. Robotica. <https://github.com/aabecker>.
- [SB17] Mohammad Sultan, Aaron T. Becker. Robotica. <https://github.com/RoboticSwarmControl/robotica>, 2017.
- [SCA] Robot SCARA. <https://zrobotyzowany.pl/informacje/publikacje/3235/roboty-scara-przeglad-rynku>.
- [Sci] Sciaga. Ruch postępowy i obrotowy bryły sztywnej. <https://sciaga.pl/slowniki-tematyczne/3661/ruch-postepowy-i-obrotowy-bryly-szttywnej/>.
- [tLM] Robot Fanuc typu LR Mate. <https://www.fanuc.eu/pl/pl/roboty>.
- [TM18] K. Tchoń, R. Muszyński, *Robotyka. Notatki do wykładów z dziedziny automatyki i robotyki*. Katedra Cybernetyki i Robotyki, Wydział Elektroniki, Politechnika Wroclawska, https://kcir.pwr.edu.pl/~mucha/Skrypty/KTRM_Robotyka.pdf, 2018.
- [TMM+00] K. Tchoń, R. Muszyński, A. Mazur, I. Dulęba, R. Hossa, *"Manipulatory i roboty mobilne: modele, planowanie ruchu, sterowanie*. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 2000.

-
- [Wika] Wikipedia. Manipulator robotyczny. https://pl.wikipedia.org/wiki/Manipulator_robotyczny.
- [Wikb] Wikipedia. Scheinman. https://en.wikipedia.org/wiki/Victor_Scheinman.

Spis tabel

2.1	Parametry Denavita-Hartenberga manipulatora typu SCARA.	8
3.1	Zestawienie cech wybranych środowisk programistycznych	10

Spis rysunków

1.1	Mechaniczny manipulator slave-master	4
1.2	Manipulator Puma firmy Unimation	4
2.1	Przemieszczenie ciała sztywnego [TM18]	6
2.2	Ruch postępowy bryły sztywnej [Bw]	6
2.3	Ruch obrotowy bryły sztywnej [Bw]	7
2.4	Interpretacja fizyczna parametrów DH manipulatora typu SCARA [TMM+00]	9
3.1	Interfejs użytkownika	13
3.2	Zaznaczenie śladu ruchu efektora	13
4.1	Wizualizacja kinematyki manipulatora typu PUMA	15
4.2	Wizualizacja kinematyki manipulatora typu SCARA	16
4.3	Wizualizacja kinematyki manipulatora FANUC typu LR Mate	17
4.4	Wizualizacja kinematyki manipulatora kartezjańskiego	18
4.5	Wizualizacja śladu ruchu efektora dla manipulatorów 4.1.1, 4.1.2 i 4.1.3	19