



Trabalho de Conclusão de Curso

Controle de um manipulador robótico da série DENSO-VP6242 utilizando quatérnios duais

de Andressa Martins Oliveira

orientada por

Prof. Dr. Heitor Judiss Savino

Universidade Federal de Alagoas
Instituto de Computação
Maceió, Alagoas
01 de Março de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
Instituto de Computação

CONTROLE DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO DA SÉRIE DENSO-VP6242 UTILIZANDO QUATÉRNIOS DUAIS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto de Computação da Universidade
Federal de Alagoas como requisito parcial
para a obtenção do grau de Engenheiro de
Computação.

Andressa Martins Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Heitor Judiss Savino

Banca Avaliadora:

Ícaro Bezerra Queiroz de Araújo	Prof. Dr., UFAL
José Henrick Viana Ramalho	Prof. Me., IFAL
Bruno Judiss Savino	Eng. Eletricista

Maceió, Alagoas
01 de Março de 2021

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

- O48c Oliveira, Andressa Martins.
Controle de um manipulador robótico da série DENSO-VP6242 utilizando quatérnios duais / Andressa Martins Oliveira. – 2021.
38 f. : il., figs. e tabs. color.
- Orientador: Heitor Judiss Savino.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia da Computação) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Computação. Maceió, 2021.
- Bibliografia: f. 37-38.
1. Quatérnios duais. 2. Denso VP6242 (Manipulador robótico). 3. Robótica. I. Título.

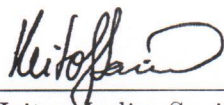
CDU: 004.896

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
Instituto de Computação

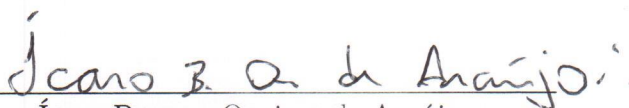
CONTROLE DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO DA SÉRIE DENSO-VP6242 UTILIZANDO QUATÉRNIOS DUAIS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto de Computação da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro de Computação.

Aprovado em 01 de Março de 2021:



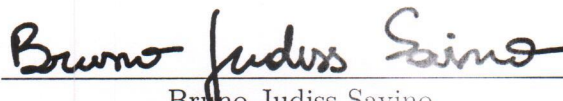
Heitor Judiss Savino,
Prof. Dr., Orientador



Ícaro Bezerra Queiroz de Araújo,
Prof. Dr., UFAL



José Henrick Viana Ramalho,
Prof. Me., IFAL



Bruno Judiss Savino,
Eng. Eletricista

Dedicatória

À minha família.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meus pais Josenildo e Gilvanice por sempre ter incentivado meus estudos e ter acreditado em mim até quando eu mesma duvidei, apoiando e aconselhando nos momentos difíceis que trilhei até chegar aqui. Agradeço à meu irmão Hugo por ser meu companheiro fiel e ser meu exemplo de resiliência, força e sabedoria. Também agradeço ao meu namorado Felipe por sempre estar apoiando minhas escolhas e me dando força em todos desafios que encontrei. Agradeço à toda minha família pelo apoio que forneceram.

Ao meu orientador Heitor Savino agradeço por ter acreditado e iniciado o capítulo estudantil de robótica, onde desde lá me proporcionou oportunidade de trabalhar, iniciar um pesquisa científica, orientação e aprendizado nessa área fascinante que é a Robótica. Ao corpo docente do IC em especial aos professores de Engenharia por ter compartilhado conhecimento, experiências em projetos que me tornaram o que posso ser hoje, Erick de Andrade , Ícaro de Araújo e Thiago Cordeiro.

Aos meus amigos que iniciaram junto a mim e me ajudaram a enfrentar os primeiros desafios, Alvino Lessa , Camylla Oliveira, Edvonaldo Horácio, Demétrios Reis , Matheus Inácio e Pedro Henrique. Aos meus amigos de pesquisa e de laboratório que sempre estavam junto compartilhado conhecimento e aprendizado, Arthur Vangasse, Bruno Lima, Bruno Georgevich, Glauber Leite, Luís Felipe, Leony Oliveira, Maria Júlia , Eduardo Miranda e Wagner Williams.

01 de Março de 2021, Maceió - AL

Não são nossas habilidades que mostram o que realmente somos. São nossas escolhas.

Albus Dumbledore, Harry Potter e a Câmara Secreta

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento da implementação da modelagem em quatérnios duais no manipulador robótico de seis graus de liberdade Denso série-VP para o controle cinemático do robô utilizando a cinemática diferencial mapeando as velocidades no espaço operacional no espaço das juntas para que o efetuador do manipulador seja capaz de chegar a uma posição desejada. A modelagem foi desenvolvida em MATLAB utilizando a biblioteca de quatérnios duais *DQ Robotics* e a toolbox *Robotics toolbox system*. Os resultados são apresentados no RViz de maneira visual e em curvas do sistema de controle da posição final do efetuador.

Palavras-chave: *Quatérnios Duais; Robótica fixa; Denso VP6242; ROS; Manipuladores.*

Abstract

This work presents the development of the implementation of modeling in dual quaternions in the Denso VP series six degrees of freedom robotic manipulator for the kinematic control of the robot using a differential kinematics mapping the velocities in the operational space in the joint spaces so that the manipulator's effector be able to reach a necessary position. The modeling was developed in MATLAB using a library of dual quaternions *DQ Robotics* and a toolbox *Robotics toolbox system*. The results are trained in the RViz visually and in curves of the control system of the final position of the end-effector.

Keywords: *Dual Quaternions; Fixed robotics; Denso VP6242; ROS; Manipulators.*

Lista de Figuras

2.1	Descrição de posição e orientação de um referencial $\{B\}$ em $\{A\}$	19
2.2	Visualização dos sistemas de referência do DENSO VP6242 em Rviz.	19
2.3	Mapeamento da cinemática direta e inversa	20
2.4	Sistemas de Frames	21
3.1	Ponto p^i do \mathcal{F}_i projetado sobre o \mathcal{F}_j rotacionado	24
3.2	Parâmetros de Denavit-Hartenberg	26
3.3	Diagrama de blocos do sistema de controle das juntas	28
4.1	<i>Screenshot</i> da tela do RViz	30
4.2	<i>rqt-graph</i> do sistema	31
5.1	Visualização da posição dos frames do efetuador para o experimento 1	33
5.2	Curvas da posição do efetuador com relação à posição desejada em quatér- nios duais para o experimento 1	33
5.3	Visualização da posição dos frames do efetuador para o experimento 2	34
5.4	Curvas da posição do efetuador com relação à posição desejada em quatér- nios duais para o experimento 2	35
5.5	Visualização da posição dos frames do efetuador para o experimento 3	35
5.6	Curvas da posição do efetuador com relação à posição desejada em quatér- nios duais para o experimento 3	36

Lista de Tabelas

2.1	Parâmetros de DH do DENSO VP6242	22
-----	--	----

Lista de Símbolos

\mathbb{R}	Conjunto dos números reais.
\mathbb{H}	Conjunto dos quatérnios.
\mathcal{H}	Conjunto dos quatérnios duais.
$\mathcal{P}(\cdot)$	Parte primal de um quatérnio dual.
$\mathcal{D}(\cdot)$	Parte secundária de um quatérnio dual.
\mathcal{F}	<i>Frame</i> de um robô
$\overset{+}{\mathbf{H}}(\cdot), \bar{\mathbf{H}}(\cdot)$	Operadores de Hamilton

Lista de Abreviaturas

IC Instituto de Computação.

DH Denavit-Hartenberg

ORG Origem

ROS Robotics Operation System

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivos Gerais	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
2	Descrição de um manipulador Robótico	18
2.1	Cinemática	20
2.1.1	Transformação Homogênea	20
2.1.2	Parâmetros de Denavit–Hartenberg	21
3	Modelagem e Controle em Quatérnios Duais	23
3.1	Quatérnios	23
3.2	Quatérnios Duais	24
3.3	Cinemática	25
3.3.1	Convenção Denavit-Hartenberg	26
3.3.2	Jacobiano	26
3.3.3	Singularidades	27
3.4	Controle	28
4	Simulação de Robôs	29
4.1	Modelo do Denso VP6242 no RViz	30
4.2	Arquitetura	30
5	Resultados	32
5.1	Implementação	32
5.2	Experimento 1	32
5.3	Experimento 2	34
5.4	Experimento 3	35
	Conclusão	37

Capítulo 1

Introdução

Com a busca por automação, inteligência, otimização de tempo e custo em processo industriais tem se tornado um grande fomento para pesquisas de robôs industriais desde 1954 com o pioneiro George Devol produzindo as primeiras máquinas de transferência programadas que tinha como objetivo levar um objeto de um ponto a outro, conhecido por Unimate [Nof, 1999]. Em 1969 surge o primeiro manipulador robótico totalmente elétrico com 6 articulações permitindo uma solução parecido com a anatomia de um braço desenvolvido por Victor Scheinman que posteriormente junto a *General Motors Company*¹ comercializou e desenvolveu a Máquina Programável Universal para Montagem, PUMA. Em 1973, a *KUKA Industrial Robots*² hoje um dos líderes mundiais na fabricação de robôs e sistemas de automação construiu o FAMULUS o primeiro robô articulado a possuir seis eixos controlados eletronicamente.

Atualmente qualquer grande processo industrial terá como parte de seu escopo ou todo o auxílios de robôs industriais e que em sua grande maioria são os manipuladores, pois dentre as diversas aplicações que existem a manipulação é essencial. Em diversas situações tem-se as atividades de apreensão, transportar, embalar e separação de objetos como os presentes no setor de alimentação onde enfrentam alguns pontos críticos como a rapidez e movimentos precisos da garra, detecção de objetos em tempo real e higienização dos manipuladores, [Caldwell, 2012]. Em [Liu et al., 2012] são mostradas soluções de processos que realizam detecção e estimativa de pose tridimensional de objetos em um compartimento não estruturado usando um novo design de câmera, coleta peças do compartimento e realiza detecção de erros e correção de pose enquanto a peça está na garra. Algoritmos de localização usando treinamento *offline* e otimização global são utilizados para aumentar a flexibilidade das soluções existentes se forem usadas como localização aproximada baseada em recursos, independente de qualquer conhecimento prévio da pose de uma peça de trabalho são utilizados em processos de soldagem, [Schleth et al., 2018].

O modelo cinemático de um robô bem descrito é essencial para o sucesso da reali-

¹<https://www.gm.com>

²<https://www.kuka.com/pt-br>

zação da tarefa. Atualmente, os modelos mais conhecidos e utilizados são as representações de posição e orientação no espaço, ângulos de Euler, eixo-ângulo, matrizes de transformações homogêneas, quatérnios citados em [Craig, 2009], [Siciliano et al., 2010]. A modelagem em quatérnios duais para um corpo rígido foi introduzida em 1963 por [Yang and Freudenstein, 1964] onde obtém expressões algébricas para deslocamento, velocidade, forças, torques, vantagens mecânicas de um corpo rígido no espaço, porém ainda não se tinha uma ideia de um manipulador. Em [Dooley and McCarthy, 1991] descritos um conjunto de equações diferenciais que prescrevem o movimento de um sistema de pêndulos duplos com quatérnios duais. Uma estrutura em desenvolvimento para análise e controle de sistemas de manipuladores com relação ao comportamento dinâmico de seus efetadores em [Khatib, 1987].

1.1 Justificativa

Com o crescimento da utilização de robôs para automação de processos industriais, sociais, ajudantes em tarefas domésticas, acesso a lugares restritos, na medicina entre outros. O controle destes robôs são de suma importância para sociedade para a realização de suas respectivas tarefas. Em especial os manipuladores robóticos das mais variadas estruturas necessitam de um modelagem da sua cinemática e dinâmica bem definida para melhor lidar com suas singularidades do mecanismo, rapidez e precisão da tarefa.

Este trabalho utiliza de uma nova abordagem da modelagem para manipuladores descritas por Ardono e aplicadas no manipulador robótico Denso série-Vp. Nesta abordagem utiliza da álgebra de quatérnios duais pois são mais compactos do que matrizes de transformação homogênea, representação mais direta do movimento rígido, torções, rotações e são usadas diretamente na lei de controle sem a necessidade de extrair parâmetros segundo [Adorno, 2015].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

Obter a modelagem do manipulador robótico utilizando a álgebra de quatérnios duais e controlar utilizando a lei de controle baseado na cinemática inversa diferencial para o controle das juntas do robô dada uma posição desejada no espaço, assim habilitando o Denso à futuros trabalhos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar a modelagem do Denso utilizando quatérnios duais.

- Implementar a modelagem do Denso
- Implementar a lei de controle utilizando a cinemática direta diferencial
- Simular o manipulador utilizando o RViz
- Analisar o comportamento do controlador

Capítulo 2

Descrição de um manipulador Robótico

Um robô pode ser classificado como base fixa, conhecidos como robôs manipuladores, e base móvel. Dentre essas duas grandes classificações são encontrados diversos tipos de robôs e suas inúmeras aplicações industriais, espaciais, mineração, fazendas etc.

Para descrever um robô é necessário definir sua localização no espaço tridimensional através de sua posição \mathbf{P} e orientação \mathbf{R} com relação a um determinado sistemas de coordenadas com eixos ortogonais unitários no \mathbb{R}_3 , como mostrado na Figura 2.1. Um ponto \mathbf{P} pertencente à um sistema de coordenadas com sua origem em $\{A\}$ e sua extremidade em $\{B\}$ pode ser pelo vetor posição ${}^A\mathbf{P}_B$ onde ${}^A\mathbf{p}_{Bx}$, ${}^A\mathbf{p}_{By}$, ${}^A\mathbf{p}_{Bz}$ são as componentes do vetor ${}^A\mathbf{P}_B \in \mathbb{R}_3$ que descreve a posição do da origem $\{B\}$ com relação a $\{A\}$

$${}^A\mathbf{P}_B = \begin{bmatrix} {}^A\mathbf{p}_{Bx} \\ {}^A\mathbf{p}_{By} \\ {}^A\mathbf{p}_{Bz} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

A orientação é dada pela descrição dos versores de um sistema de coordenadas $\{B\}$ com relação a $\{A\}$, assim fica definida a matriz de rotação como

$${}^A\mathbf{R}_B = [{}^A\hat{X}_B | {}^A\hat{Y}_B | {}^A\hat{Z}_B] \begin{bmatrix} \hat{X}_B \cdot \hat{X}_A & \hat{Y}_B \cdot \hat{X}_A & \hat{Z}_B \cdot \hat{X}_A \\ \hat{X}_B \cdot \hat{Y}_A & \hat{Y}_B \cdot \hat{Y}_A & \hat{Z}_B \cdot \hat{Y}_A \\ \hat{X}_B \cdot \hat{Z}_A & \hat{Y}_B \cdot \hat{Z}_A & \hat{Z}_B \cdot \hat{Z}_A \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

sendo ${}^A\hat{X}_B, {}^A\hat{Y}_B, {}^A\hat{Z}_B$ são vetores colunas das projeções dos versores de $\{B\}$ em relação a $\{A\}$, note que cada elemento da matriz de rotação é o produto interno entre os vetores unitários de cada sistema sendo assim igual o cosseno do ângulo formados entres eles, dessa maneira a matriz de rotação também é conhecida como Matriz de Cossenos Diretores. Esta descrição de posição e orientação de um sistema de coordenadas de maneira conjunta fica definida como Frame $\mathcal{F} = \{\mathbf{P}, \mathbf{R}\}$.

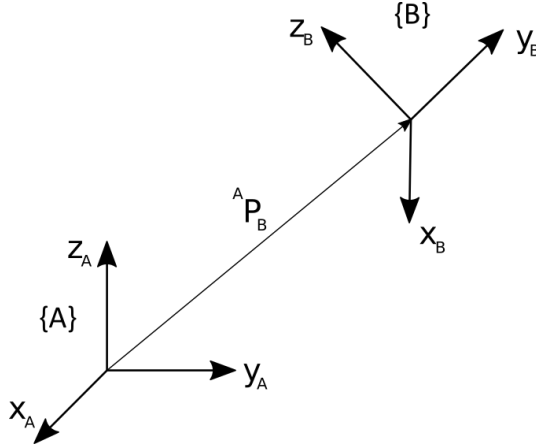


Figura 2.1: Descrição de posição e orientação de um referencial $\{B\}$ em $\{A\}$

A estrutura mecânica de um robô consiste numa sequência de corpos rígidos – *elos* – interconectados por articulações – juntas. Sendo assim, um manipulador é caracterizado por um braço que dará sua mobilidade, um punho que confere sua destreza e um efetuator final que dará a atuação requerida pela atividade do robô [Siciliano et al., 2010]. A quantidade de juntas de robô e o tipo são características que definem a complexidade do manipulador como também seu movimento no seu espaço de trabalho, definindo assim que chamamos de graus de liberdade de um robô. Para uma cadeia cinemática aberta, isto significa que temos um manipulador com apenas uma sequência de links com o começo na base e fim no efetuator e com juntas do tipo prismática ou revolução o número de graus de liberdade do robô será igual ao número de juntas existentes.

O manipulador considerado ao longo do texto é fornecido pela fabricante DENSO, série VP6242, com 6 graus de liberdade e cadeia cinemática aberta. O sistema de referência está definido da seguinte maneira: o *Frame* global na base do robô $\mathcal{F}_{\text{base_link}} = \{\mathcal{R}_{\text{base_link}}, \mathcal{P}_{\text{base_link}}, \}$ seguido das transformações realizadas por q juntas até $\mathcal{F}_{\text{link6}} = \{\mathcal{R}_{\text{link6}}, \mathcal{P}_{\text{link6}}, \}$, o *Frame* referente ao efetuator, como mostrado na Figura 2.2.

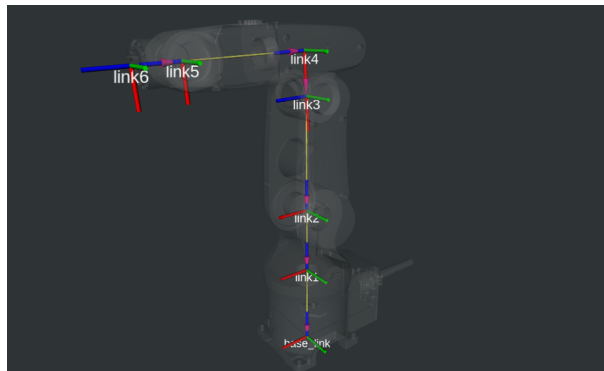


Figura 2.2: Visualização dos sistemas de referência do DENSO VP6242 em Rviz.

2.1 Cinemática

O estudo que envolve somente o movimento do robô, sem levar em conta as forças que atuam sobre ele, é conhecido por cinemática. Tem como estudo todas as variáveis derivadas de ordem superior da posição com relação ao tempo, especificamente posição, velocidade e aceleração. Portanto, o estudo da cinemática de manipuladores refere-se a todas as propriedades geométricas e baseadas no tempo do movimento [Craig, 2009]. A cinemática pode ser classificada em dois eixos, a cinemática direta que dada a posição das juntas encontrar a posição e orientação do efetuador e a cinemática inversa que é definir a posição das juntas, dada uma posição e orientação desejada do efetuador como mostra a Figura 2.3.

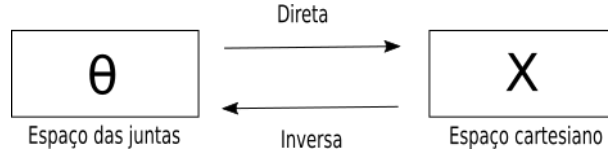


Figura 2.3: Mapeamento da cinemática direta e inversa

2.1.1 Transformação Homogênea

Define-se por Transformação Homogênea a matriz que mapeia as transformações entre *Frames*, levando em consideração as translações e rotações envolvidas.

Denotando dois *Frames* de um robô por $\mathcal{F}_{\text{link1}}$ e $\mathcal{F}_{\text{link2}}$ como mostra a Figura 2.4, sendo o vetor de deslocamento de $\mathcal{F}_{\text{link1}}$ para $\mathcal{F}_{\text{link2}}$ chamado ${}^{\text{link1}}\text{P}_{\text{link2_org}}$. A rotação de $\mathcal{F}_{\text{link2}}$ com relação ao $\mathcal{F}_{\text{link1}}$ pode ser descrito por ${}^{\text{link1}}\text{R}_{\text{link2}}$. Assim, para descrever um ponto qualquer no espaço de $\mathcal{F}_{\text{link2}}$ com relação ao $\mathcal{F}_{\text{link1}}$ seguimos a seguinte equação:

$${}^{\text{link1}}\text{P} = {}^{\text{link1}}\text{R}_{\text{link2}} {}^{\text{link2}}\text{P} + {}^{\text{link1}}\text{P}_{\text{link2_org}}, \quad (2.3)$$

podendo ${}^{\text{link1}}\text{R}_{\text{link2}} {}^{\text{link2}}\text{P}$ ser definido como a matriz de transformação ${}^{\text{link1}}\text{T}_{\text{link2}}$

$${}^{\text{link2}}\text{T}_{\text{link1}} = \begin{bmatrix} {}^{\text{link2}}\text{R}_{\text{link1}} & {}^{\text{link1}}\text{P}_{\text{link2org}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

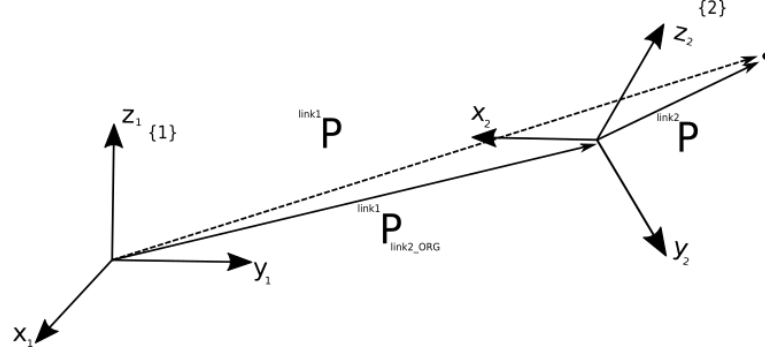


Figura 2.4: Sistemas de Frames

Dada uma sequência *Frames* $\mathcal{F}_0, \mathcal{F}_1, \dots, \mathcal{F}_i$, a composição de transformações de \mathcal{F}_{i-1} para \mathcal{F}_i pode ser dada por

$${}^0T_i = {}^0T_1 T_1T_2 \dots T_{i-1}T_i. \quad (2.5)$$

2.1.2 Parâmetros de Denavit–Hartenberg

A convenção de *Denavit-Hartenberg* propõe definir a posição relativa entre dois sistemas de coordenadas a partir de quatro parâmetros:

- rotação θ_i em torno do eixo da junta (z_{i-1});
- translação ao longo do eixo da junta (z_i) dado pelo afastamento entre juntas (d_i);
- translação ao longo do eixo do elo (x_i) dado pelo seu próprio comprimento (a_i);
- rotação α_i do eixo da junta (z_i) em torno do eixo longitudinal (x_i) do elo.

A transformação de uma junta i com relação a junta $i - 1$ pode ser escrita em termos de matrizes de transformação homogênea como

$${}^{i-1}T_i = T_{R_z}(\theta_i)T_{P_z(d_i)}T_{P_x(a_i)}T_{R_x}(\alpha_i) = DH(\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i). \quad (2.6)$$

onde

$$T_{R_z}(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$T_{P_z(d_i)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$T_{P_x}(a_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$T_{R_x}(\alpha_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Para o manipulador DENSO VP6242 os parâmetros de DH podem ser descritos como mostra a Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Parâmetros de DH do DENSO VP6242

Elo	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	l_{1z}	l_{1x}	$\pi/2$
2	$\theta_2 + \pi/2$	0	l_2	0
3	$\theta_3 - \pi/2$	0	$-l_{3x}$	$-\pi/2$
4	θ_4	$l_{3z} + l_4$	0	$\pi/2$
5	θ_5	0	0	$-\pi/2$
6	θ_6	l_5	0	0

Com a definição de um modelo cinemático manipulador nas abordagens clássicas da robótica o próximo capítulo irá abordar a modelagem utilizando a álgebra de quatérnios duais.

Capítulo 3

Modelagem e Controle em Quatérnios Duais

3.1 Quatérnios

Para descrever um corpo rígido no espaço, além da utilização de vetores de posição, matrizes de rotação e transformações homogêneas, em 1844, foi introduzida por Hamilton uma nova abordagem utilizando uma extensão de números complexos chamada Quatérnios. O quatérnio h , pertencente ao grupo dos quatérnios \mathbb{H} , possui quatro componentes denotados por: um valor real qualquer; mais três valores imaginários $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$, chamados de unidades imaginárias [Hamilton, 1844]. As unidades imaginárias possuem a seguinte propriedade:

$$\hat{i}^2 = \hat{j}^2 = \hat{k}^2 = \hat{i}\hat{j}\hat{k} = -1. \quad (3.1)$$

Dessa maneira definimos formalmente um quatérnio como

$$h \triangleq \{h_1 + \hat{i}h_2 + \hat{j}h_3 + \hat{k}h_4 : h_1, h_2, h_3, h_4 \in \mathbb{R}\}. \quad (3.2)$$

As propriedades de adição/subtração seguem as definições dos números complexos, associatividade, existência de elemento neutro, existência de inverso e comutatividade, porém, quando se trata da multiplicação a comutatividade não se aplica aos quatérnios pois envolve produto vetorial entre eles. A multiplicação entre quatérnios pode ser proposta de forma matricial utilizando os denominados de operadores Hamiltonianos $\hat{\mathbf{H}}(\cdot)$ e $\bar{\mathbf{H}}(\cdot)$ [Adorno, 2015] que satisfazem a propriedade de comutatividade

$$vec_4(hh') = \hat{\mathbf{H}}(h) vec_4(h') = \bar{\mathbf{H}}(h') vec_4(h), \quad (3.3)$$

$${}^+\mathbf{H}_4(h) = \begin{bmatrix} h_1 & -h_2 & -h_3 & -h_4 \\ h_2 & h_1 & -h_4 & h_3 \\ h_3 & h_4 & h_1 & -h_2 \\ h_4 & -h_3 & h_2 & h_1 \end{bmatrix}, {}^-\mathbf{H}_4(h') = \begin{bmatrix} h'_1 & -h'_2 & -h'_3 & -h'_4 \\ h'_2 & h'_1 & h'_4 & -h'_3 \\ h'_3 & -h'_4 & h'_1 & h'_2 \\ h'_4 & h'_3 & -h'_2 & h'_1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

onde o vetor vec_4 é o mapeamento de um quatérnio no espaço vetorial \mathbb{R}_4 , $vec_4 h = [h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4]^T$.

Uma translação em quatérnio $p = p_x\hat{i} + p_y\hat{j} + p_z\hat{k}$ é descrita por somente sua parte imaginária, denominando o conjunto de quatérnios puros $\mathbb{H}_p \in \mathbb{H}$. A rotação ϕ torno de um vetor $u \in \mathbb{H}_p \rightarrow \mathbb{R}_3$ é dada por um quatérnio unitário r onde $\|r\| = 1$ e é definida como

$$R(u) = r u r^* \quad (3.5)$$

com $r = \cos(\phi/2) + \mathbf{n}\sin(\phi/2)$, sendo ϕ o ângulo de rotação em torno de um eixo arbitrário $n = n_x\hat{i} + n_y\hat{j} + n_z\hat{k}$. A representação de um ponto p^i pertencente ao sistema \mathcal{F}_i em \mathcal{F}_j em dada por

$$p^j = r_i^j p^i (r_i^j)^* \quad (3.6)$$

sendo r_i^j a rotação do \mathcal{F}_i com relação ao \mathcal{F}_j como mostra a Figura 3.1.

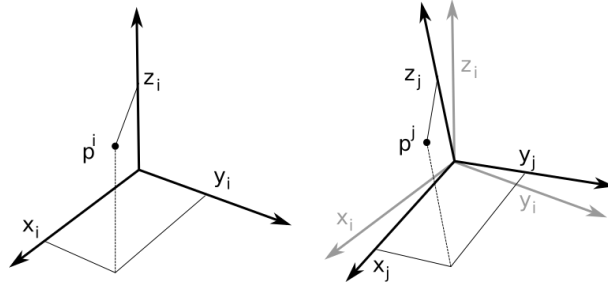


Figura 3.1: Ponto p^i do \mathcal{F}_i projetado sobre o \mathcal{F}_j rotacionado

3.2 Quatérnios Duais

Os quatérnios duais fazem parte da álgebra dos números duais, introduzidos por Clifford. Um número dual $z = a + b\varepsilon$ é composto por a, b que podem ser escalar, número complexo e, neste caso, por um quatérnio, e pela unidade dual ε , que segue as seguintes propriedades: $\varepsilon \neq 0$; e $\varepsilon^2 = 0$ [Clifford, 1873].

Dessa maneira a representação formal de um quatérnio dual, definindo o conjunto \mathcal{H} , é dada por

$$\left\{ h \in \mathcal{H}, h \triangleq h_1 + \varepsilon h_2 : h_1, h_2 \in \mathbb{H}, \varepsilon \neq 0, \varepsilon^2 = 0 \right\}. \quad (3.7)$$

Defini-se a parte primária de um quatérnio dual pelo operador $\mathcal{P}(h) = h_1$ e a sua parte

dual $\mathcal{D}(h) = h_2$.

As propriedades de soma/subtração e multiplicação seguem a álgebra dos quatérnios, neste caso pra um quatérnios dual deve-se somar as partes primárias $\mathcal{P}(\cdot)$ e sua parte dual $\mathcal{D}(\cdot)$, i.e. dados $h, h' \in \mathcal{H}$,

$$h \pm h' = (\mathcal{P}(h) \pm \mathcal{P}(h')) \pm \varepsilon (\mathcal{D}(h) \pm \mathcal{D}(h')) \quad (3.8)$$

Assim a multiplicação resulta na seguinte forma

$$hh' = (\mathcal{P}(h) + \varepsilon \mathcal{D}(h)) (\mathcal{P}(h') + \varepsilon \mathcal{D}(h')) \quad (3.9)$$

$$= \mathcal{P}(h) \mathcal{P}(h') + \varepsilon (\mathcal{P}(h) \mathcal{D}(h') + \mathcal{D}(h) \mathcal{P}(h')) \quad (3.10)$$

Similar aos quatérnios a comutatividade não está definida na multiplicação de quatérnios duais, por isomorfismo é possível a representação de um $\mathcal{H} \rightarrow \mathbb{R}_8$ de forma matricial

$$vec_8(h) = \begin{bmatrix} vec_4(\mathcal{P}(h)) \\ vec_4(\mathcal{D}(h)) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

sendo a multiplicação de h e h' pode ser representada

$$vec_8(hh') = \overset{+}{\mathbf{H}}(h) vec_8(h') = \bar{\mathbf{H}}(h') vec_8(h) \quad (3.12)$$

onde $\overset{+}{\mathbf{H}}_8$ e $\bar{\mathbf{H}}_8$ são os operadores de Hamilton definidos para os quatérnios duais

$$\overset{+}{\mathbf{H}}_8(h) = \begin{bmatrix} \overset{+}{\mathbf{H}}_4(\mathcal{P}(h)) & 0_4 \\ \overset{+}{\mathbf{H}}_4(\mathcal{D}(h)) & \overset{+}{\mathbf{H}}_4(\mathcal{P}(h)) \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{H}}_8(h') = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{H}}_4(\mathcal{P}(h')) & 0_4 \\ \bar{\mathbf{H}}_4(\mathcal{D}(h')) & \bar{\mathbf{H}}_4(\mathcal{P}(h')) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Um quatérnio dual com sua norma unitária representa o movimento de um corpo rígido no espaço através de uma translação e rotação definidos como

$$\mathbf{h} = \mathbf{r} + \varepsilon \frac{1}{2} \mathbf{p} \mathbf{r}, \mathbf{h} \in \mathcal{H} \quad (3.14)$$

com $\mathbf{r} = \cos(\phi/2) + \sin(\phi/2)\mathbf{n}$, onde $\mathbf{n} = \hat{i}n_x + \hat{j}n_y + \hat{k}n_z$ e $\mathbf{p} = \hat{i}p_x + \hat{j}p_y + \hat{k}p_z$

3.3 Cinemática

A representação da cinemática direta de um manipulador de cadeia aberta são descritas pelas transformações da sequência de links que o descrevem representados por um quatérnio dual unitário como visto na equação 3.14. Considerando o manipulador de cadeia aberta com n juntas o modelo de cinemático direto que descreve a posição do efetuador

é dado pela composição de transformações ao longo da cadeia

$$x_E = x_1^0 x_2^1 \cdots x_n^{n-1} \quad (3.15)$$

3.3.1 Convenção Denavit-Hartenberg

Assim como no espaço dos reais a convenção de *Denavit-Hartenberg* também está definida para os quatérnios duais onde é possível representar a transformação entre frames utilizando somente quatro parâmetros de rotação e translação descritos na Seção 2.1.2 como mostra a Figura 3.2 e equação 3.16

$$x_{DH} = r_{z,\theta} p_{z,d} p_{x,a} r_{x,\alpha} \quad (3.16)$$

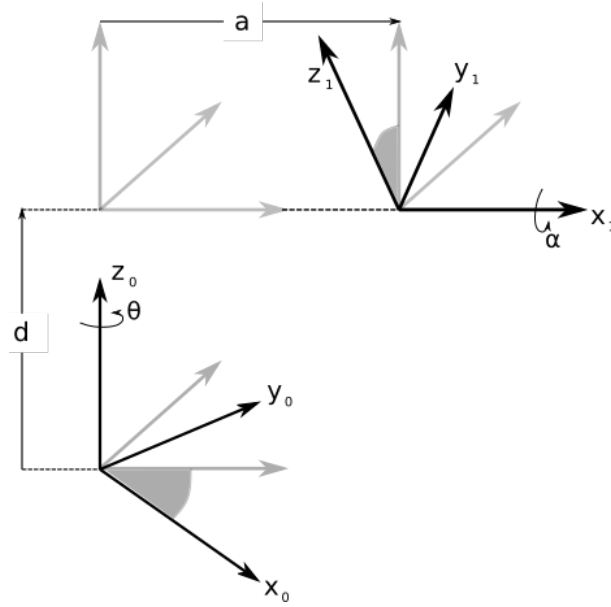


Figura 3.2: Parâmetros de Denavit-Hartenberg

onde

$$\begin{cases} r_{z,\theta} = \cos(\frac{\theta}{2}) + \text{sen}(\frac{\theta}{2})\hat{k} \\ p_{z,d} = 1 + (\frac{1}{2}d)\hat{k}\varepsilon \\ p_{x,a} = 1 + (\frac{1}{2}a)\hat{i}\varepsilon \\ r_{x,\alpha} = \cos(\frac{\alpha}{2}) + \text{sen}(\frac{\alpha}{2})\hat{i} \end{cases} \quad (3.17)$$

3.3.2 Jacobiano

A matriz Jacobiana é a matriz formada pela derivadas de primeira ordem de uma função vetorial definida como

$$\dot{Y} = J_{F_x} \dot{X} \quad (3.18)$$

sendo

$$J_{F_x}(x_1, \dots, x_n) = \frac{\partial F}{\partial X} = \frac{\partial(F_1, \dots, F_n)}{\partial(x_1, \dots, x_n)} \quad (3.19)$$

No campo da robótica a Jacobiana relaciona a velocidades das juntas com as velocidade cartesiana de um robô descritas pela equação em quatérnios duais utilizando a cinemática diferencial como

$$vec_8 \dot{x}_e = J \dot{\theta} \quad (3.20)$$

onde \dot{x}_E é a primeira derivada da representação em quatérnio dual da posição do efetuador, $\theta = [\theta_0 \dots \theta_{n-1}]^T$ é o vetor n juntas do robô e J é a matriz que representa a derivada $\partial x_E \setminus \partial \theta$. Seja $x_E = x_1^0 \dots x_n^{n-1}$ sua primeira derivada é dada por

$$\dot{x}_E = \sum_{i=0}^{n-1} x_i^0 \dot{x}_{i+1}^i x_n^{i+1} \quad (3.21)$$

a relação entre a derivada de um quatérnio dual e a rotação é definida como

$$\dot{x}_{i+1}^i = \frac{1}{2} \xi_{i+1}^{i+1} x_{i+1}^i \quad (3.22)$$

como x_{i+1}^i está em função de θ_{i+1} podemos escrever

$$\begin{aligned} \xi_{i+1}^i &= 2 \dot{x}_{i+1}^i (x_{i+1}^i)^* \\ &= 2 \frac{\partial x_{i+1}^i}{\partial \theta_{i+1}} (x_{i+1}^i)^* \dot{\theta}_{i+1} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Tome

$$\omega_{i+1}^i = 2 \frac{\partial x_{i+1}^i}{\partial \theta_{i+1}} (x_{i+1}^i)^* \quad (3.24)$$

consequentemente

$$\dot{x}_E = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} x_i^0 \omega_{i+1}^i x_0^i x_E \dot{\theta}_{i+1} \quad (3.25)$$

comparando a equações 3.20 e 3.25, com $J = [j_1 \dots j_i]$ uma matriz $m \times n$ com n colunas igual ao número de juntas do robô e m linhas igual ao número de variáveis que representam no espaço assim temos que a jacobiana é dada por

$$j_{i+1} = vec_8 \left(\frac{1}{2} x_i^0 \omega_{i+1}^i (x_i^0)^* x_E \right), \quad i = 0, \dots, n-1 \quad (3.26)$$

3.3.3 Singularidades

Quando o Jacobiano de um manipulador é singular, isto é, não apresenta mais *rank* completo temos singularidades no mecanismo e dessa maneira o manipulador perde um ou mais graus de liberdade no espaço cartesiano, isso significa que para algumas configurações

será impossível mover a posição do efetuador. Essas singularidades podem ocorrer em dois momentos, nos limites do espaço de trabalho (com o braço estendido) ou dentro do espaço de trabalho, geralmente devido ao aliamento de dois ou mais eixos de juntas. Quando não tratadas no controlador essas singularidades podem levar a um esforço nas juntas do manipulador por conta de velocidades de juntas muito elevadas.

3.4 Controle

Com a abordagem da cinemática diferencial descrita pela equação 3.20 têm-se o mapeamento da velocidade do espaço cartesiano na velocidade do espaço das juntas, como o objetivo deste trabalho é dado um posição no espaço cartesiano fazer com que o efetuador alcance a posição desejada é de interesse utilizar a cinemática inversa descrita na sessão 2.1. Dessa maneira temos que encontrar $\dot{\theta}$ em função de \dot{x}_E e J , porém como nem sempre a matriz jacobiana será inversível por conta das singularidades encontradas no mecanismo do robô é necessário utilizar a pseudo-inversa da jacobiana.

$$\begin{aligned}\dot{x}_E &= J\dot{\theta} \\ J^T \dot{x}_E &= J^T J\dot{\theta} \\ (J^T J)^{-1} J^T \dot{x}_E &= (J^T J)^{-1} J^T J\dot{\theta} \\ J^+ \dot{x}_E &= \dot{\theta}\end{aligned}\tag{3.27}$$

onde $J^+ = (J^T J)^{-1} J^T$.

A lei de controle do sistema esta demonstrada na Figura 3.3 através do diagrama de blocos

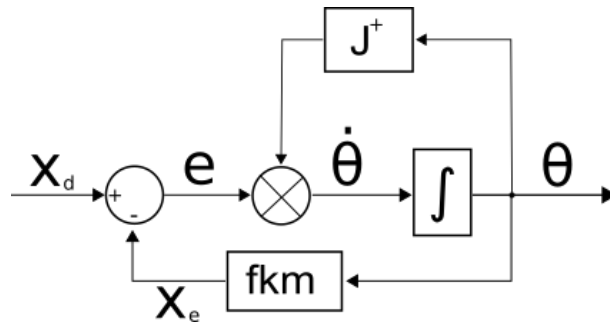


Figura 3.3: Diagrama de blocos do sistema de controle das juntas

onde x_d é a posição no espaço do objetivo o qual o manipulador deve chegar, x_e a posição atual do efetuador obtido pela cinemática direta (fkm) ambas em quatérnios dual. A velocidades das juntas é $\dot{\theta}$ composta pela pseudo-inversa da jacobiana J^+ multiplicado pelo erro da posição do efetuador e .

Capítulo 4

Simulação de Robôs

A simulação de robôs é de grande importância para a robótica pois um dos desafios é validar e testar os projetos antes de sua execução pois dessa maneira economiza-se recursos financeiros e tempo testando todas as possíveis modelagens, sensores e designer do robôs assim tendo uma rápida construção do mesmo através de características físicas presentes na maioria dos simuladores, evita-se dano ao robô podendo realizar inúmeras configurações, algoritmos em um ambiente similar ao do robô real com vento, correnteza, obstáculos assim diminuindo os acidentes e aumentando a segurança e melhorando a performance do hardware e software.

Dentre os simuladores presentes atualmente a grande maioria utiliza bastante o ROS¹, do inglês *Robot Operating System*, é uma coleção de *frameworks* de software para desenvolvimento de robôs que fornece a funcionalidade de um sistema operacional e atualmente bastante difundido na comunidade de robótica por oferecer suporte à reutilização de código na pesquisa e desenvolvimento de robótica. O ROS é composto de vários nós independentes, cada um deles se comunicando com outros nós. A estrutura do ROS como explicado acima é uma composição de vários nós independentes, começando com Mestre que permite que todos os outros nós conversem entre si utilizando o princípio de sistemas distribuídos conhecido por comunicação indireta Publicar e Sobrescrever, onde os publicadores divulgam tópicos estruturados para um serviço de assinantes. Ao publicar ou sobrescrever em um tópico, é necessário especificar qual o tipo de mensagem que será usado, isto é, qual o tipo de dado que serão escritos ou lido.

Uma das ferramentas utilizadas para visualização de robôs é o RViz², ele fornece uma visão do modelo do seu robô, captura as informações do sensor dos sensores do robô e reproduz os dados capturados. Ele pode exibir dados de câmeras, lasers, de dispositivos 3D e 2D, incluindo imagens e nuvens de pontos.

¹<https://www.ros.org>

²<http://wiki.ros.org/rviz>

4.1 Modelo do Denso VP6242 no RViz

No RViz um robô é descrito através de uma linguagem descritiva em *XML* chamada por URDF, *Unified Robot Description Format*. Neste tipo de arquivo é possível definir a cinemática, dinâmica, representação visual e modelo de colisão do robô, no caso de manipuladores robótico a estrutura do URDF se assemelha a uma árvore, descrevendo as conexões entre elos e juntas na sequência determinada pela cadeia de elos do robô, como mostra a Figura 4.1, disponível no repositório ³.

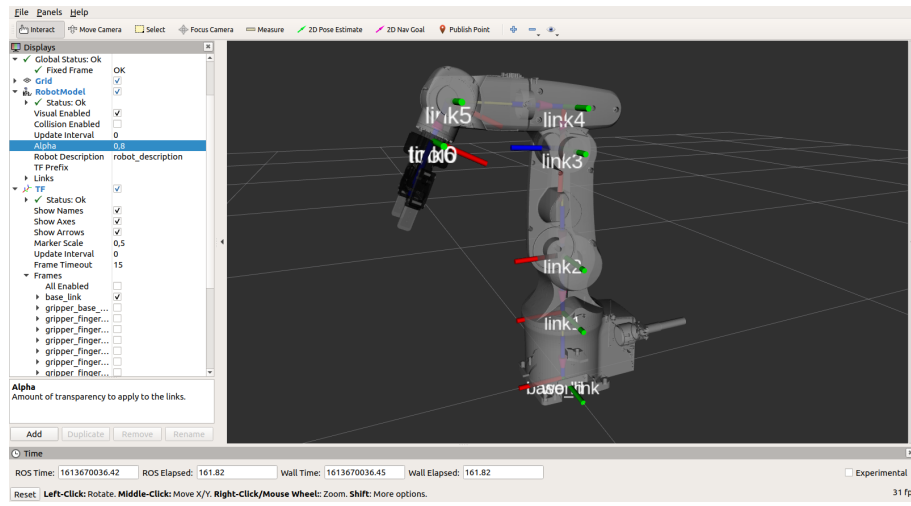


Figura 4.1: *Screenshot* da tela do RViz

4.2 Arquitetura

Pela descentralização que o ROS proporciona é possível através de sua arquitetura criar um sistema distribuído robótico integrando software de visualização, controladores e simulações

A construção do sistema inicia pelo nó `/posestamped_im` que é responsável pelo gerenciamento dos tópicos `/posestamped_im/feedback` e `/posestamped_im/update` que publicam e atualizam a posição do marcador interativo na cena do Rviz, este marcador será a referência da posição que o efetuador do Denso deve chegar e pode ser atualizado a cada instante pelo usuário. O próximo nó `/tf_interactive_maker` obtém a transformação entre os frames `/goal` e `/base_link` ao longo do tempo utilizando do pacote `tf`, estas coordenadas são enviadas através de `/posestamped` que será recebida pelo nó `matlab_global`. Neste nó contém toda lógica do controle e utiliza-se do pacote de modelagem em quatérnios duais desenvolvidos pela DQ Robotics ⁴ [Adorno and Marinho, 2020] para modelar a cinemática do Denso. Com a saída da lei de controle é o conjunto de valores da juntas,

³Disponível em https://github.com/bglima/vp6242_robotiq85_ros

⁴<https://dqrobotics.github.io>

estas são publicadas na simulação através do tópico `/joint_state_publisher` que será uma mensagem do tipo `joint_states` já estruturada. A Figura 4.2 foi extraída através de um *pugin* pertencente ao ROS, *rqt_graf*. Para que ocorresse a integração entre o MATLAB e o ROS foi necessário utilizar da *toolbox* Robotic System ⁵.

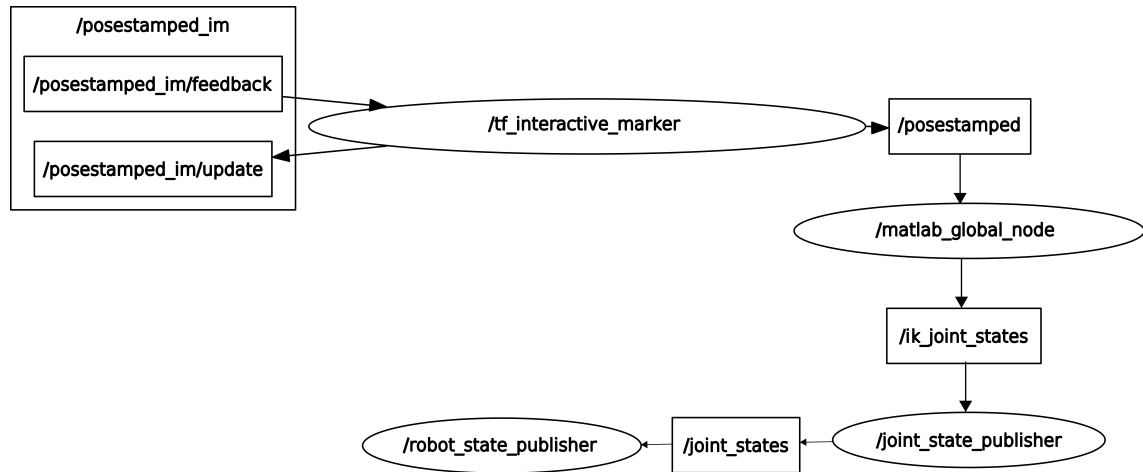


Figura 4.2: *rqt-graph* do sistema

Com a construção da arquitetura e integralização do ROS e MATLAB o próximo capítulo trata-se dos resultados obtidos com as simulações destacadas nesse capítulo.

⁵<https://www.mathworks.com/products/robotics.html>

Capítulo 5

Resultados

Neste capítulo são apresentados as implementações das leis de controle e resultados de experimentos estabelecidos para avaliar o comportamento do manipulador em algumas situações. Para cada experimento foram escolhidos valores diferentes da posição desejada final dentro do espaço de trabalho do manipulador alterando sua posição e orientação no espaço. As implementações e o vídeo da simulação podem ser encontradas no repositório EASY-SPARC¹.

5.1 Implementação

A implementação do controle do manipulador foi elaborada utilizando o MATLAB. A lei de controle observada na Figura 3.3 foi implementada com base no erro da posição do efetuador. Para os experimentos, foi definido com um valor mínimo de 0.02 para o final da simulação.

5.2 Experimento 1

Para este experimento a posição escolhida foi $p = [0.3892, 0, 0.1981]$ e uma rotação no eixo y de $\pi/2$. A Figura 5.1 demonstra a posição dos frames do efetuador ao longo da tarefa.

¹<https://github.com/EASY-SPARC/TCC-Andressa>

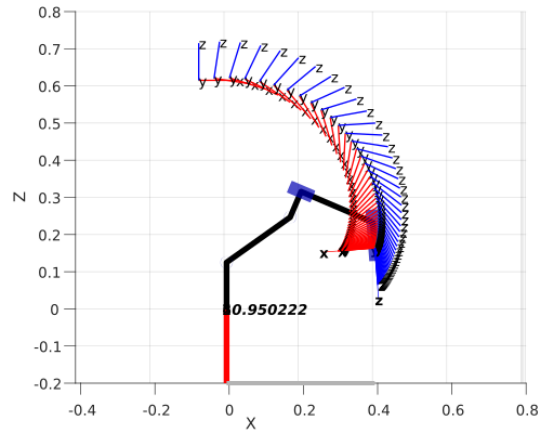


Figura 5.1: Visualização da posição dos frames do efetuador para o experimento 1

Ao final da simulação é possível analisar a relação entre a posição desejada e a posição final do efetuador em cada parte do quatérnio dual como observados na Figura 5.2.

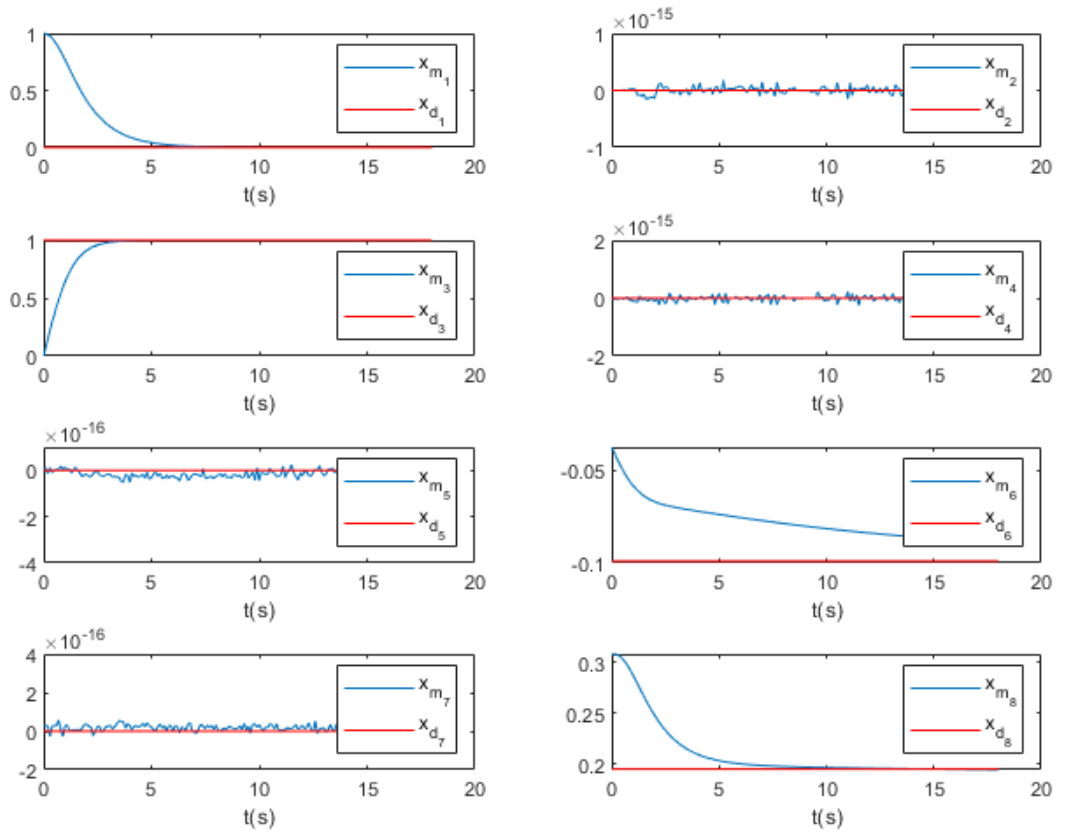


Figura 5.2: Curvas da posição do efetuador com relação à posição desejada em quatérnios duais para o experimento 1

Podemos ver que cada valor da posição mensurada do efetuador ao longo do tempo

converge para a posição desejada.

5.3 Experimento 2

Neste experimento mantém-se a posição do experimento porém adiciona-se uma rotação no eixo y seguida de uma rotação no eixo z de $\pi/2$ sobre x_d .

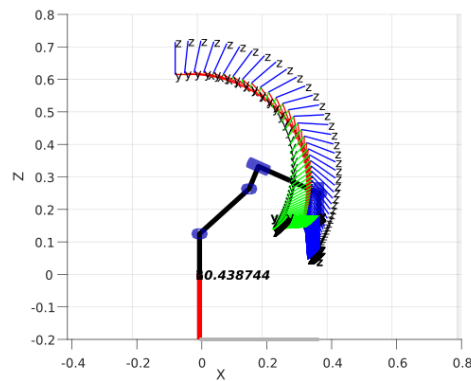


Figura 5.3: Visualização da posição dos frames do efetuador para o experimento 2

Observa-se na Figura 5.6 que mesmo com adição de mais rotações sobre x_d o controle cinemático diferencial ainda conseguiu resolver as equações e fazer com que o efetuador alcance a referência desejada.

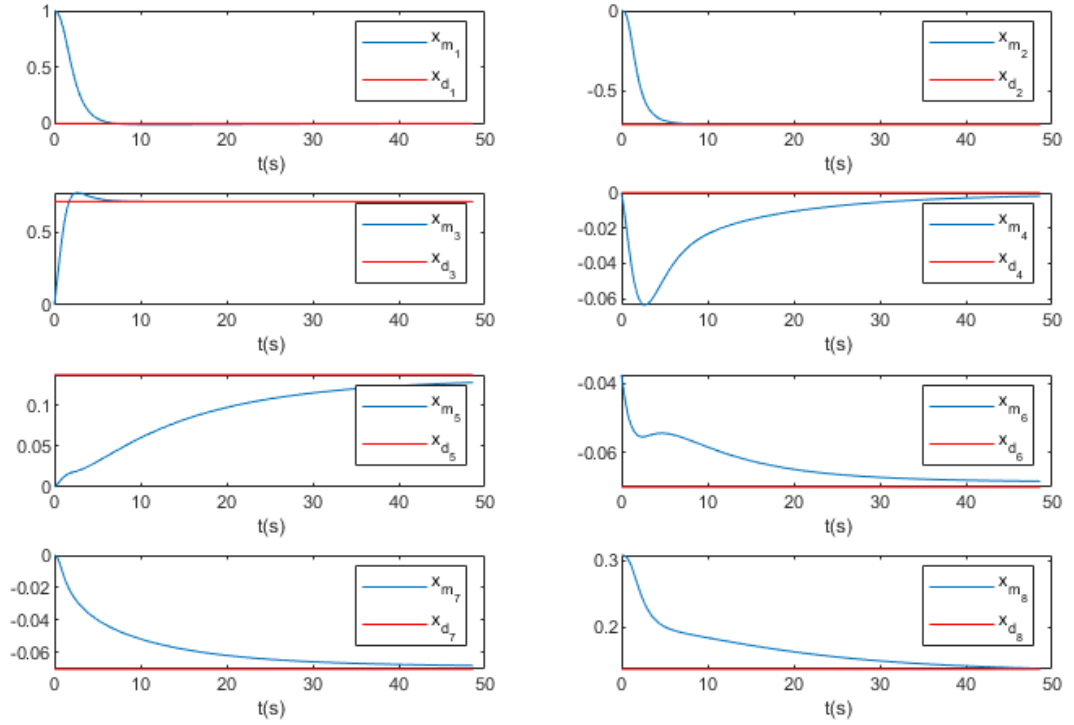


Figura 5.4: Curvas da posição do efetuador com relação à posição desejada em quaternions duais para o experimento 2

5.4 Experimento 3

Neste experimento mantém-se as rotação no eixo y seguida da rotação em z e altera-se a posição desejada para $p = [0.3, 0.1, 0.2]$. Na Figura 5.5 observa-se que as rotações ao longo da simulação e mudança da posição no eixo-y do robô.

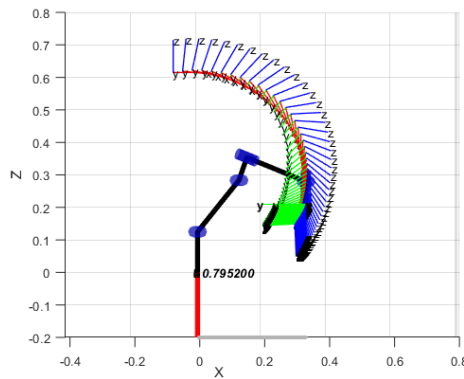


Figura 5.5: Visualização da posição dos frames do efetuador para o experimento 3

Assim como nos resultados, anteriores o manipulador consegue se aproximar da posição

desejada do efetuator como mostra a Figura 5.6.

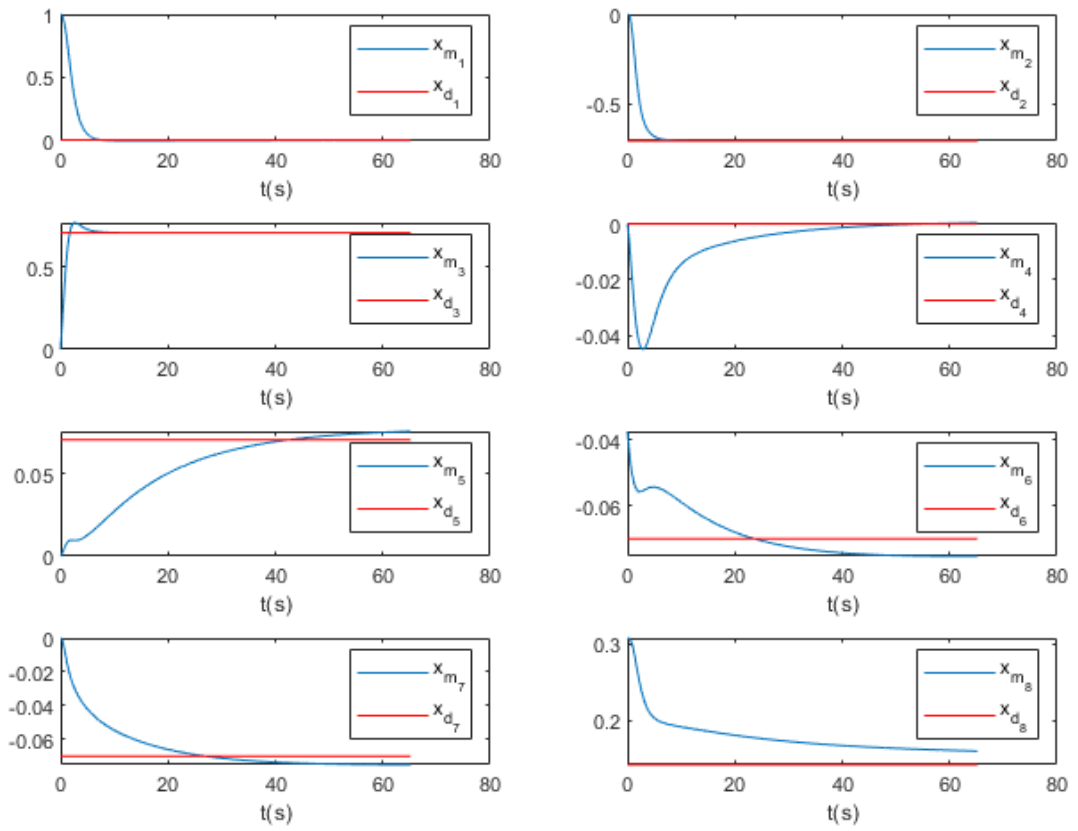


Figura 5.6: Curvas da posição do efetuator com relação à posição desejada em quatérnios duais para o experimento 3

Conclusão

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma análise sobre o comportamento do manipulador Denso-VP6242 utilizando a modelagem em quatérnios duais com o objetivo de melhorar a representação do modelo cinemático para ter um melhor controle sobre movimento do robô, tendo em vista que essa teoria reduz erros na implementação pois relacionam de uma forma mais direta a modelagem e controle.

Observa-se que os experimentos realizados neste trabalho apresentaram bons resultados demonstrando que para dadas posições diferentes da posição desejadas ao longo do tempo as curvas da posição do efetuador convergem para posição final, ainda que neste trabalho não foram consideradas restrições cinemáticas. Além dos resultados das curvas apresentados também foi possível analisar o comportamento do robô utilizando dos recursos que o visualizador dos ROS proporciona com o Rviz.

Com estes resultados obtidos é possível expandir para utilização de controladores mais robustos e que trabalhem com as restrições do modelo, desvios de obstáculos para garantir melhor eficácia da atividade do manipulador como também a segurança do movimento.

Bibliografia

- [Adorno, 2015] Adorno, B. V. (2015). Robot Kinematic modeling and control: a dual quaternion approach. page 70.
- [Adorno and Marinho, 2020] Adorno, B. V. and Marinho, M. M. (2020). Dq robotics: A library for robot modeling and control. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pages 1–15.
- [Caldwell, 2012] Caldwell, D. G. (2012). *Robotics and automation in the food industry: Current and future technologies*. Elsevier.
- [Clifford, 1873] Clifford, P. (1873). [Bead June 12th, 1873.].
- [Craig, 2009] Craig, J. J. (2009). *Introduction to robotics: mechanics and control*, 3/E. Pearson Education India.
- [Dooley and McCarthy, 1991] Dooley, J. R. and McCarthy, J. M. (1991). Spatial rigid body dynamics using dual quaternion components. In *Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 90–95 vol.1.
- [Hamilton, 1844] Hamilton, W. R. (1844). Lxxviii. on quaternions; or on a new system of imaginaries in algebra: To the editors of the philosophical magazine and journal. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 25(169):489–495.
- [Khatib, 1987] Khatib, O. (1987). A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 3(1):43–53.
- [Liu et al., 2012] Liu, M.-Y., Tuzel, O., Veeraraghavan, A., Taguchi, Y., Marks, T. K., and Chellappa, R. (2012). Fast object localization and pose estimation in heavy clutter for robotic bin picking. *The International Journal of Robotics Research*, 31(8):951–973.
- [Nof, 1999] Nof, S. Y. (1999). *Handbook of industrial robotics*. John Wiley & Sons.

- [Schleth et al., 2018] Schleth, G., Kuss, A., and Kraus, W. (2018). Workpiece localization methods for robotic welding - a review. In *ISR 2018; 50th International Symposium on Robotics*, pages 1–6.
- [Siciliano et al., 2010] Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., and Oriolo, G. (2010). *Robotics: modelling, planning and control*. Springer Science & Business Media.
- [Yang and Freudenstein, 1964] Yang, A. T. and Freudenstein, F. (1964). Application of dual-number quaternion algebra to the analysis of spatial mechanisms.