

Obtenção de Informações para Prensão e Movimento em Manipuladores Robóticos através de Técnicas além da Visão

FILIPE DANIEL DE JESUS OLIVEIRA CAMPOS

Setembro de 2024

POLITÉCNICO DO PORTO
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

Obtenção de Informações para Preensão e Movimento em Manipuladores Robóticos através de Técnicas além da Visão

Filipe Daniel de Jesus Oliveira Campos

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Automação e Sistemas



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto

Setembro, 2024

Esta dissertação satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Área de Especialização em Automação e Sistemas.

Candidato: Filipe Daniel de Jesus Oliveira Campos, N.º 1220593,
1220593@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Doutor Manuel Fernando dos Santos Silva,
mss@isep.ipp.pt

Empresa: INESC TEC

Orientador: Doutor João Pedro Carvalho de Souza,
joao.p.souza@inesctec.pt



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto

Setembro, 2024

Agradecimentos

Ao meu orientador, Manuel Silva, expresso o meu mais sincero agradecimento pelo apoio, orientação e dedicação incansáveis ao longo de todo este processo.

Agradeço ao INESC TEC, em especial ao João Souza, pela sua valiosa contribuição técnica e científica, estando sempre disponível com incessante dedicação para oferecer sugestões de melhoria que impulsionaram a minha evolução.

Aos meus pais, Artur Campos e Albina Campos, e à minha namorada, Ana Silva, agradeço por todo o apoio incondicional e por acreditarem sempre em mim.

A todos, mais uma vez, o meu muito obrigado!

Resumo

Neste trabalho, são estudadas tecnologias de percepção sensorial proprioceptiva e exteroceptiva física, com foco na obtenção de informações sobre o contacto e o objeto, que podem ser utilizadas para ajustar comportamentos em caso de escorregamento do objeto, corrigir trajetórias ou cancelar um procedimento com base na resposta do objeto manipulado. A integração de informações adicionais além da visão permite aumentar a robustez do sistema robótico, evitando a sua dependência exclusiva da visão, que pode ser limitada em ambientes de baixa visibilidade ou com oclusões.

Especificamente, este estudo utiliza tecnologias de percepção sensorial proprioceptiva, com um sensor de Força e Binário (F/B) de 6 *Degrees of Freedom* (DoF) instalado no punho de um manipulador robótico, para obter informações sobre o contacto entre o objeto e a ferramenta, bem como características do próprio objeto durante tarefas de manipulação. As informações obtidas incluem a detecção de objeto e de escorregamento total, a transformação das componentes de F/B para uma referência de preensão, a estimativa da massa e da posição do Centro de Massa (CoM) do objeto, a classificação de objetos e a estimativa da orientação unidimensional do objeto. O trabalho é desenvolvido no ambiente *Robot Operating System* (ROS), utilizando a ferramenta de simulação Gazebo e o *software* Octave. O ambiente de simulação inclui o manipulador robótico UR5, o sensor de F/B Robotiq FT 300, e a garra de dois dedos Robotiq 2F-85.

Para validar o sistema proposto e demonstrar os resultados obtidos, são realizados testes de manipulação de três objetos com diferentes propriedades físicas ao longo de quatro trajetórias. Três dessas trajetórias são executadas sem escorregamento entre o objeto e a ferramenta, enquanto uma inclui a presença de escorregamento, permitindo evidenciar as vantagens e limitações da solução desenvolvida. Os testes apresentaram bons resultados durante a execução das trajetórias, após a fase de preensão e antes do posicionamento do objeto. No entanto, a estimativa da posição do CoM do objeto durante o escorregamento requer mais investigação para garantir a convergência do método de orientação. São apresentadas sugestões de melhoria com base nos resultados, que poderão servir como base para investigações futuras.

Palavras-Chave: percepção sensorial, preensão, manipulação, escorregamento, pose, força, binário

Abstract

In this work, proprioceptive and exteroceptive sensory perception technologies are studied, with a focus on obtaining information about contact and the object, which can be used to adjust behaviours in cases of object slippage, correct trajectories, or cancel a procedure based on the response of the manipulated object. The integration of additional information beyond vision increases the robustness of the robotic system, preventing it from relying exclusively on vision, which can be limited in environments with low visibility or occlusions.

Specifically, this study uses proprioceptive sensory perception technologies, with a 6-Degrees of Freedom (DoF) Force/Torque (F/T) sensor installed on the wrist of a robotic manipulator, to obtain information about the contact between the object and the tool, as well as characteristics of the object itself during manipulation tasks. The information obtained includes object and full-slip detection, the transformation of F/T components to a grasping reference, the estimation of the object's mass and Center of Mass (CoM) position, object classification, and the estimation of the object's one-dimensional orientation. The work is developed in the ROS environment, using the Gazebo simulation tool and Octave software. The simulation environment includes the UR5 robotic manipulator, the Robotiq FT 300 force/torque sensor, and the Robotiq 2F-85 two-finger gripper.

To validate the proposed system and demonstrate the results obtained, manipulation tests are carried out with three objects with different physical properties along four trajectories. Three of these trajectories are performed without slippage between the object and the tool, while one includes slippage, highlighting the advantages and limitations of the developed solution. The tests showed good results during the execution of the trajectories, after the grasping phase and before object positioning. However, the estimation of the object's CoM position during slippage requires further investigation to ensure the convergence of the orientation method. Suggestions for improvement are presented based on the results, which could serve as a foundation for future investigations.

Keywords: sensory perception, grasping, manipulation, slip, pose, force, torque

Índice

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Acrónimos	xv
Lista de Símbolos	xvii
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Definição do Problema	2
1.2.1 Objetivos	2
1.2.2 Análise e Identificação dos Requisitos do Problema	2
1.2.3 Resultados Esperados	2
1.3 Plano de Trabalho	3
1.4 Organização do Documento	3
2 Fundamentação Teórico-Técnica	5
2.1 Álgebra Linear Aplicada à Robótica	5
2.1.1 Matrizes de Rotação no Espaço Tridimensional	5
2.1.2 Matriz Antissimétrica de um Vetor de Três Dimensões	7
2.1.3 Vetores Linearmente Independentes e Característica de uma Matriz	8
2.1.4 Valores e Vetores Próprios de uma Matriz	8
2.1.5 Técnica <i>Singular Value Decomposition</i>	9
2.1.6 Método dos Mínimos Quadrados Aplicado a um Sistema de Equações	10
2.2 Ferramentas para o Desenvolvimento e Simulação Robótica	12
2.2.1 <i>Robot Operating System</i>	12
2.2.2 Gazebo	12
2.2.3 MoveIt	13
2.2.4 Rviz	13

3	Revisão Bibliográfica	15
3.1	Conceito de Propriocepção e Exterocepção	15
3.2	Informações sobre o Contacto	17
3.2.1	Geometria de Contacto	17
3.2.2	Forças e Binário de Contacto	17
3.2.3	Eventos de Contacto	19
3.2.4	Propriedades da Superfície do Objeto	21
3.3	Informações sobre o Objeto	21
3.3.1	Pose do Objeto	21
3.3.2	Geometria do Objeto	22
3.3.3	Centro de Massa e Massa do Objeto	22
3.3.4	Conteúdo do Objeto	22
3.4	Tecnologias de Percepção Proprioceptiva	22
3.4.1	Sensores de Força e Binário	23
3.4.2	Sensores de Posição e Velocidade	27
3.4.3	Informações sobre o Contacto e o Objeto Obtidas através de Sensores de Força, Binário e de Posição	27
3.5	Tecnologias de Percepção Exteroceptiva Física	28
3.5.1	Mecanorreceptores e Analogia com Sensores Táteis	28
3.5.2	Sensores Táteis	30
3.5.3	Informações sobre o Contacto e o Objeto Obtidas através de Sensores Táteis	38
3.5.4	Abordagens para a Detecção de Informações sobre o Contacto e o Objeto através de Sensores Táteis	38
4	Metodologia	45
4.1	Motivação	45
4.2	Abordagem Proposta	46
4.2.1	Informações Extraídas através da Abordagem	47
4.2.2	Etapas da Abordagem	48
4.2.3	Limitações da Abordagem	48
4.2.4	Vantagens da Abordagem	49
4.3	Componentes de Força e Binário Medidas pelo Sensor de 6 DoF Ins- talado no Punho do Robô	49
4.3.1	Referências e Desvios Angulares	49
4.3.2	Componentes Totais	50
4.3.3	Componentes Internas e Externas	52
4.4	Método de Calibração	53
4.4.1	Equações de Força e Binário	53
4.4.2	Descrição do Método de Calibração	55

4.5	Método de Compensação	63
4.6	Análise das Componentes do Objeto Devidas à Gravidade	64
4.6.1	Informações sobre o Objeto	64
4.6.2	Informações sobre o Contacto	72
4.7	Conclusão	74
5	Implementação e Resultados	75
5.1	Ambiente de Simulação	75
5.2	Arquitetura do Sistema	77
5.3	Algoritmos	79
5.3.1	Octave	79
5.3.2	ROS	79
5.4	Resultados	80
5.4.1	Método de Calibração	80
5.4.2	Método de Compensação	85
5.4.3	Filtragem do Sinal e Transformação das Componentes de F/B do Objeto para Uma Nova Referência	87
5.4.4	Informações sobre o Contacto e o Objeto	90
5.5	Conclusão	105
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	107
6.1	Conclusões	107
6.2	Trabalhos Futuros	109
	Referências	110
	Anexo A Algoritmos	129
A.1	Algoritmo para Estimar as Componentes da Ferramenta e os Desvios	130
A.2	Algoritmo para Estimar as Componentes de F/B do Objeto	131
A.3	Algoritmo para Filtragem das Componentes de F/B do Objeto	132
A.4	Algoritmo para Transformação das Componentes de F/B do Objeto Para Uma Nova Referência	133
A.5	Algoritmo para Obtenção das Informações Sobre o Contacto e o Objeto	134
A.6	Algoritmo para Estimar a Pose do Objeto	135
	Anexo B Matrizes de Orientação Utilizadas no Método de Calibração	
	LRO	137
B.1	Matrizes B	138
B.2	Matrizes E	139

Lista de Figuras

1.1	Calendarização do projeto.	3
3.1	Percepção sensorial humana: a) proprioceptiva e b) exteroceptiva. . .	16
3.2	Geometria de contacto. Figura baseada em Li <i>et al.</i> [19].	17
3.3	Forças e binário de contacto. Figura baseada em Li <i>et al.</i> [19].	18
3.4	Preensão de um objeto através de uma garra paralela de dois dedos, considerando apenas a componente vertical.	18
3.5	Eventos de contacto. Figura baseada em Li <i>et al.</i> [19].	19
3.6	Comportamento da força de atrito, obtido através de dados experimentais, durante a estabilidade, durante o escorregamento iminente e durante o escorregamento total. Figura adaptada de Neta [25]. . .	20
3.7	Movimento de um objeto com formato cilíndrico devido à presença de escorregamento total, manipulado através de uma garra paralela de dois dedos.	20
3.8	Propriedades da superfície do objeto. Figura baseada em Li <i>et al.</i> [19].	21
3.9	Estruturas elastómeras que utilizam extensómetros resistivos para medição de força.	24
3.10	Sistemas de deteção de força que utilizam o efeito piezoelétrico e o efeito capacitivo.	24
3.11	Sistemas de deteção de força que utilizam sensores optoeletrónicos. .	25
3.12	Mecanorreceptores e a região de percepção sensorial na ponta dos dedos. Figura adaptada de [69].	29
3.13	Utilização de sensores táteis piezoresistivos durante tarefas de manipulação de objetos.	31
3.14	Utilização de sensores táteis resistivos durante tarefas de manipulação de objetos.	32
3.15	Utilização de sensores táteis capacitivos durante tarefas de manipulação de objetos.	33
3.16	Utilização de sensores táteis piezoelétricos durante tarefas de manipulação de objetos.	34
3.17	Utilização de sensores táteis triboelétricos durante tarefas de manipulação de objetos.	35

3.18	Utilização de sensores visuo-táteis durante tarefas de manipulação de objetos.	36
3.19	Reconstrução da superfície de um objeto utilizando um sensor visuo-tátil: a) abordagem seguida por Johnson e Adelson [143] e b) abordagem seguida por Johnson <i>et al.</i> [112]. Figura adaptada de Johnson <i>et al.</i> [112].	41
3.20	Deteção de escorregamento iminente: a) angular e b) linear. A região verde representa a área da superfície do objeto em contacto com o gel. A região verde escuro destaca a periferia dessa área. As setas pretas indicam os vetores de escorregamento e os pontos azuis mostram onde ocorreu escorregamento [116].	42
3.21	Resultados obtidos do modelo de Inteligência Artificial (IA) desenvolvido por Yuan <i>et al.</i> [114] para calcular as forças e binário de contacto utilizando sensor visuo-tátil: a) força tangencial, b) força tangencial, c) força normal e d) binário normal. Figura adaptada de Yuan <i>et al.</i> [114].	42
3.22	Método TEG-Track desenvolvido por Liu <i>et al.</i> [124].	43
3.23	Estimativa da pose de um objeto manipulado através de uma garra paralela de dois dedos utilizando apenas o localizador de pose 6D generalizável <i>Category-level Pose Tracking for Rigid and Articulated Objects from Point Clouds</i> (CAPTRA) [127] e o método TEG-Track [124]. Figura adaptada de Liu <i>et al.</i> [124].	44
4.1	Simulação no Gazebo [147] de uma tarefa de manipulação de um objeto utilizando o manipulador robótico <i>Universal Robots</i> (UR) 5 [148], equipado com o sensor de Força e Binário (F/B) de 6 <i>Degrees of Freedom</i> (DoF) FT-300 [149] e com a garra 2F-85 [150], ambos da Robotiq.	47
4.2	Manipulador robótico equipado com uma garra paralela de dois dedos. São apresentados os desvios entre a base de fixação e a referência da gravidade e entre o punho do robô e o sensor de F/B.	50
4.3	As componentes medidas por um sensor de F/B de 6 DoF instalado no punho do robô.	51
4.4	As componentes medidas por um sensor de F/B de 6 DoF instalado no punho do robô durante uma tarefa de manipulação de um objeto. Nesta representação considera-se acelerações e velocidades reduzidas sem que haja contacto da ferramenta e do objeto com o robô e o ambiente, durante a tarefa de manipulação.	52
4.5	Representação das componentes do binário exercidas no sensor de F/B de 6 DoF $\{S\}$ devidas ao deslocamento do Centro de Massa (CoM) e à força gravítica da ferramenta.	55

4.6	Diferentes tipos de instalação de um manipulador robótico, mostrando a variação do ângulo de instalação $\alpha \in]0, 360^\circ]$ entre a referência da gravidade e a base do robô [151].	60
4.7	Fluxograma utilizado para classificar o objeto manipulado.	66
4.8	Preensão de um perfil de alumínio através de uma garra paralela de dois dedos. Figuras adaptadas de Kang <i>et al.</i> [158].	66
4.9	Abordagem utilizada para estimar a orientação unidimensional do objeto durante uma tarefa de manipulação, baseada na análise de amostras da posição do CoM do objeto.	68
4.10	Exemplos de amostras que podem levar à divergência da abordagem para estimar o ângulo α que representa a orientação unidimensional do objeto.	69
4.11	Metodologia utilizada para o tratamento das amostras do centro de massa do objeto antes de aplicar a abordagem para estimar a orientação unidimensional do objeto.	70
4.12	Fluxograma para estimar a orientação unidimensional do objeto manipulado através de uma garra paralela de dois dedos.	71
4.13	Fluxograma com a representação da abordagem utilizada para detetar a presença ou ausência do objeto.	72
4.14	Fluxograma com a representação da abordagem utilizada para detetar escorregamento total.	73
4.15	Preensão de um objeto através de uma garra paralela de dois dedos. A referência $\{P\}$ foi definida com o plano $Y-Z$ paralelo às superfícies de preensão.	74
5.1	Manipulador robótico UR 5 [148], sensor de F/B Robotiq FT-300 [149] e garra Robotiq 2F-85 [150] no ambiente de simulação Gazebo [147].	76
5.2	Diagrama de blocos com a implementação.	77
5.3	Ferramentas utilizadas para teste do método de calibração no ambiente de simulação Gazebo.	81
5.4	Componentes de velocidade e aceleração linear durante a execução das trajetórias de teste do método de compensação.	85
5.5	Componentes de força e binário durante a execução das trajetórias de teste do método de compensação, com a barra cúbica instalada no sensor.	86
5.6	Componentes de força e binário durante a execução das trajetórias de teste do método de compensação, com a garra Robotiq 2F-85 instalada no sensor.	87
5.7	Componentes de força e binário do objeto de 1 kg manipulado pela garra Robotiq 2F-85.	88

5.8	Resposta em amplitude e fase, e mapa de zeros e polos do filtro digital Butterworth passa-baixo <i>Infinite Impulse Response</i> (IIR) de 3ª ordem com frequência de corte de 1,5 Hz.	89
5.9	Componentes de força e binário do objeto de 1 kg manipulado pela garra Robotiq 2F-85, após filtragem e transformadas para a posição do CoM do objeto.	90
5.10	Objetos utilizados para teste dos métodos de obtenção das informações sobre o contacto e o objeto.	91
5.11	Espaço de trabalho do manipulador robótico no simulador Gazebo. .	91
5.12	Tarefas de manipulação consideradas para teste dos métodos de obtenção das informações sobre o contacto e o objeto.	92
5.13	Resultados obtidos para o método de obtenção de informações sobre o contacto e o objeto durante as tarefas de manipulação n.º 1 e 2, manipulando a barra de 0,2 kg com a garra Robotiq 2F-85.	94
5.14	Resultados obtidos para o método de obtenção de informações sobre o contacto e o objeto durante as tarefas de manipulação n.º 3 e 4, manipulando a barra de 0,2 kg com a garra Robotiq 2F-85.	95
5.15	Resultados obtidos para o método de obtenção de informações sobre o contacto e o objeto durante as tarefas de manipulação n.º 1 e 2, manipulando a barra de 0,5 kg com a garra Robotiq 2F-85.	97
5.16	Resultados obtidos para o método de obtenção de informações sobre o contacto e o objeto durante as tarefas de manipulação n.º 3 e 4, manipulando a barra de 0,5 kg com a garra Robotiq 2F-85.	98
5.17	Resultados obtidos para o método de obtenção de informações sobre o contacto e o objeto durante as tarefas de manipulação n.º 1 e 2, manipulando a barra de 1 kg com a garra Robotiq 2F-85.	100
5.18	Resultados obtidos para o método de obtenção de informações sobre o contacto e o objeto durante as tarefas de manipulação n.º 3 e 4, manipulando a barra de 1 kg com a garra Robotiq 2F-85.	101
5.19	Resultados obtidos para o método de estimativa da orientação unidimensional do objeto, manipulado com a garra Robotiq 2F-85 durante a tarefa de manipulação n.º 4.	104

Lista de Tabelas

3.1	Vantagens e desvantagens de várias tecnologias utilizadas em sensores de F/B de 6 DoF, nomeadamente: Viga Cruzada (VC), Plataforma Paralela (PP), Capacitivo (Ca), Piezoelétrico (Pe) e Ótico (Ot).	26
3.2	Informações sobre o contacto: Geometria de Contacto (GC), Forças e Binário de Contacto (FBC), Eventos de Contacto (EC) e Propriedades da Superfície do Objeto (PSO), e informações sobre o objeto, obtidas através de sensores proprioceptivos, nomeadamente: sensor de F/B de 6 DoF instalado no punho do robô e sensores de posição e velocidade.	28
3.3	Tipos de mecanorreceptores dos grupos de Adaptação Lenta (AL) e Adaptação Rápida (AR) e as suas características [20].	29
3.4	Vantagens e desvantagens das várias tecnologias de sensores táteis: Piezoresistivo (Pr), Resistivo (Re), Capacitivo (Ca), Piezoelétrico (Pe), Triboelétrico (Te) e Visuo-tátil (VT).	37
3.5	Informações sobre o contacto: Geometria de Contacto (GC), Forças e Binário de Contacto (FBC), Eventos de Contacto (EC) e Propriedades da Superfície do Objeto (PSO), e informações sobre o objeto, obtidas através de várias tecnologias de sensores táteis: Piezoresistivo (Pr), Resistivo (Re), Capacitivo (Ca), Piezoelétrico (Pe), Triboelétrico (Te) e Visuo-Tátil (VT).	38
3.6	Abordagens para obtenção de informações sobre o contacto e o objeto utilizando sensores táteis. Na condição de teste, número (R) ou número (F) significa quantidade de objetos rígidos ou flexíveis a teste, respetivamente.	39
5.1	Estrutura da mensagem <i>Robot Operating System</i> (ROS) <code>ObjectStamped</code> .	78
5.2	Componentes das ferramentas: barra cúbica (F1) e garra Robotiq 2F-85 (F2), e os desvios angulares e mecânicos a serem estimados através do método de calibração. Os valores nas células representam as componentes nas direções x , y , z ou nos ângulos $roll$, $pitch$, yaw . As matrizes de rotação estão representadas pelos ângulos Tait-Bryan na ordem $Z - Y - X$.	82

5.3	Orientações do punho do robô em relação à sua base utilizadas para o teste do método de calibração.	83
5.4	Resultados obtidos para a estimativa das componentes das ferramentas: barra cúbica (F1) e garra Robotiq 2F-85 (F2), utilizando os métodos <i>Special Robot Orientation</i> (SRO) e <i>Limited Robot Orientation</i> (LRO) e as orientações de A a E.	83
5.5	Resultados obtidos para a estimativa das matrizes de rotação, representadas pelos ângulos Tait-Bryan na ordem $Z - Y - X$, utilizando os métodos SRO e LRO e as orientações de A a E.	84
5.6	Resultados obtidos para as estimativas dos desvios mecânicos do sensor, utilizando os métodos SRO e LRO e as orientações de A a E. . .	84
5.7	Parâmetros utilizados nos métodos para obtenção das informações sobre o contacto e o objeto.	93
5.8	Parâmetros utilizados no algoritmo para estimar a orientação unidimensional do objeto manipulado.	103

Lista de Acrónimos

AL	Adaptação Lenta
ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
AR	Adaptação Rápida
Ca	Capacitivo
CAPTRA	<i>Category-level Pose Tracking for Rigid and Articulated Objects from Point Clouds</i>
CNN	<i>Convolution Neural Networks</i>
CoM	Centro de Massa
CSV	<i>Comma-Separated Values</i>
DoF	<i>Degrees of Freedom</i>
EC	Eventos de Contacto
F/B	Força e Binário
FBC	Forças e Binário de Contacto
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>
FCL	<i>Fully-Connected Layers</i>
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>
FSR	<i>Force Sensitive Resistor</i>
GC	Geometria de Contacto
IA	Inteligência Artificial
IIR	<i>Infinite Impulse Response</i>
LRO	<i>Limited Robot Orientation</i>
LSM	<i>Least-Squares Method</i>

LSTM	<i>Long Short-Term Memory</i>
Ot	Ótico
Pe	Piezoelétrico
PID	Proporcional Integral Derivativo
PP	Plataforma Paralela
Pr	Piezoresistivo
PSO	Propriedades da Superfície do Objeto
PVDF	Polifluoreto de Vinilideno
Re	Resistivo
RGB	<i>Red, Green and Blue</i>
RGB-D	<i>Red, Green, Blue and Depth</i>
ROC	<i>Receiver Operaiting Characteristic</i>
ROS	<i>Robot Operating System</i>
SRO	<i>Special Robot Orientation</i>
STFT	<i>Short-Time Fourier Transform</i>
SVD	<i>Singular Value Decomposition</i>
Te	Triboelétrico
TENG	<i>Triboelectric Nanogenerator</i>
UR	<i>Universal Robots</i>
URDF	<i>Unified Robot Description Format</i>
VC	Viga Cruzada
VT	Visuo-Tátil

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição	Unidades
$\hat{\mathbf{A}}$	Estimativa de uma matriz $\mathbf{A}$	
$\hat{\mathbf{v}}$	Estimativa de um vetor $\mathbf{v}$	
$\hat{x}$	Estimativa de um escalar x	
a_{ij}	Elemento da linha i e da coluna j de uma matriz $\mathbf{A}$	
$\mathbf{A}^T$	Transposta de uma matriz $\mathbf{A}$	
$\mathbf{V}^A$	Matriz antissimétrica de um vetor $\mathbf{v}$	
$\mathbf{A}^+$	Pseudoinversa de uma matriz $\mathbf{A}$	
$\det(\mathbf{A})$	Determinante de uma matriz $\mathbf{A}$	
$\text{tr}(\mathbf{A})$	Traço de uma matriz $\mathbf{A}$	
$\text{car}(\mathbf{A})$	Característica de uma matriz $\mathbf{A}$	
$\ \mathbf{A}\ _F$	Norma de Frobenius de uma matriz $\mathbf{A}$	
$\mathbf{I}_n$	Matriz identidade de dimensão $n \times n$	
$\mathbf{0}_{m \times n}$	Matriz nula de dimensão $m \times n$	
$\mathbf{A}_{m \times n}$	Matriz $\mathbf{A}$ qualquer de dimensão $m \times n$	
${}^B\mathbf{R}_A$	Matriz de rotação que descreve a orientação de uma referência $\{A\}$ em relação a uma referência $\{B\}$	
${}^B\mathbf{T}_A$	Matriz de transformação homogênea que descreve a transformação de uma referência $\{A\}$ em relação a uma referência $\{B\}$	
${}^B\mathbf{v}$	Vetor $\mathbf{v}$ representado em relação a uma referência $\{B\}$	
f	Força	N
$\mathbf{f}$	Componentes totais de força	N
$\mathbf{f}_{\text{fer}}$	Componentes de força devidas à gravidade da ferramenta	N
$\mathbf{f}_{\text{obj}}$	Componentes de força devidas à gravidade do objeto	N
$\mathbf{f}_{\text{dsv}}$	Componentes de força devidas a desvios mecânicos do sensor	N

Símbolo	Descrição	Unidades
τ	Binário	N m
$\boldsymbol{\tau}$	Componentes totais de binário	N m
$\boldsymbol{\tau}_{\text{fer}}$	Componentes de binário devidas à gravidade da ferramenta	N m
$\boldsymbol{\tau}_{\text{obj}}$	Componentes de binário devidas à gravidade do objeto	N m
$\boldsymbol{\tau}_{\text{dsv}}$	Componentes de binário devidas a desvios mecânicos do sensor	N m
$\mathbf{w}$	Vetor composto pelas componentes totais de força $\mathbf{f}$ e de binário $\boldsymbol{\tau}$	
$\mathbf{w}_{\text{fer}}$	Vetor composto pelas componentes de força $\mathbf{f}_{\text{fer}}$ e de binário $\boldsymbol{\tau}_{\text{fer}}$ devidas à gravidade da ferramenta	
$\mathbf{w}_{\text{obj}}$	Vetor composto pelas componentes de força $\mathbf{f}_{\text{obj}}$ e de binário $\boldsymbol{\tau}_{\text{obj}}$ devidas à gravidade do objeto	
$\mathbf{w}_{\text{dsv}}$	Vetor composto pelas componentes de força $\mathbf{f}_{\text{dsv}}$ e de binário $\boldsymbol{\tau}_{\text{dsv}}$ devidas a desvios mecânicos do sensor	
$\mathbf{w}_{\text{int}}$	Vetor composto pelas componentes internas de força $\mathbf{f}$ e de binário $\boldsymbol{\tau}$	
$\mathbf{w}_{\text{ext}}$	Vetor composto pelas componentes externas de força $\mathbf{f}$ e de binário $\boldsymbol{\tau}$	
m	Massa	kg
m_{obj}	Massa do objeto	kg
$\mathbf{p}_{\text{fer}}$	Componentes de posição do centro de massa da ferramenta	m
$\mathbf{p}_{\text{obj}}$	Componentes de posição do centro de massa do objeto	m
g	Aceleração da gravidade	m s^{-2}

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo apresentam-se a contextualização, a definição do problema, o plano de trabalho e a organização do documento.

1.1 Contextualização

A manipulação de objetos com segurança e precisão exige a integração de vários tipos de sensibilidade, incluindo a sensibilidade tátil, visual e proprioceptiva. Isto foi demonstrado por Rotwell *et al.* [1], que estudaram um homem com lesões neurológicas que, apesar de não ter nenhum problema motor e ser capaz de realizar a maioria das tarefas utilizando apenas a visão para controlar os seus movimentos, falhou quando foi solicitado a realizar tarefas de precisão, como apertar um botão ou utilizar uma caneta para escrever.

No contexto da robótica, a integração de vários tipos de sensibilidade representa um desafio, mas é essencial para o desenvolvimento de robôs mais autônomos e seguros. Esta integração permite que os robôs realizem tarefas de elevada precisão em diversas áreas, tais como a hospitalar, industrial e alimentar. No domínio hospitalar, por exemplo, permite a realização de cirurgias minimamente invasivas. Na indústria, facilita a inserção de componentes em espaços com tolerâncias reduzidas. No setor alimentar, permite a prensão e manipulação de alimentos, como frutas e legumes, sem os danificar. Além disso, em ambientes colaborativos, os robôs podem auxiliar pessoas com mobilidade reduzida nas tarefas do dia a dia, garantindo a segurança da pessoa, do robô e do ambiente envolvente.

1.2 Definição do Problema

Nesta secção apresentam-se os objetivos deste trabalho, a análise e identificação dos requisitos do problema, assim como os resultados esperados.

1.2.1 Objetivos

Pretende-se, com este trabalho, utilizar tecnologias para além da visão, como a propriocepção e a exterocepção física, com o objetivo de obter informações sobre o contacto e o objeto durante tarefas de preensão e manipulação de objetos, através de manipuladores robóticos. Estas informações poderão ser utilizadas individualmente ou em conjunto com outras tecnologias, de forma a permitir uma preensão e manipulação de objetos com maior precisão e segurança. Adicionalmente, o objetivo deste trabalho é encontrar uma solução que seja generalizável e durável, ou seja, que possa ser implementada em diferentes manipuladores robóticos, com diferentes métodos de preensão, assegurando uma durabilidade robusta.

1.2.2 Análise e Identificação dos Requisitos do Problema

Numa primeira análise, pretende-se verificar as tecnologias de perceção utilizadas na manipulação e preensão de objetos para além da visão, nomeadamente tecnologias de propriocepção e exterocepção física. Uma vez adquiridos conhecimentos sólidos sobre estas tecnologias, deve-se escolher quais serão implementadas durante a preensão e manipulação de objetos, de modo a complementar as informações obtidas através da visão. Posteriormente, será feita a implementação dessas tecnologias para verificar o seu correto funcionamento.

1.2.3 Resultados Esperados

Espera-se obter informações sobre o contacto e o objeto através de técnicas para além da visão, de forma a permitir adquirir informações do estado da preensão e manipulação do objeto, com o objetivo de tornar a preensão mais segura e manipulação mais precisa.

As informações que se espera obter durante tarefas de manipulação incluem: deteção da presença e ausência do objeto, deteção de escorregamento entre o objeto e a ferramenta e deteção de alterações na pose do objeto. Além destes resultados, espera-se obter uma solução robusta, capaz de manipular vários tipos de objetos sem sofrer elevado desgaste, e que seja versátil, podendo ser utilizada em diferentes tipos de manipuladores robóticos e ferramentas de manipulação.

1.3 Plano de Trabalho

O plano de trabalho para a realização desta dissertação está apresentado na Figura 1.1, tendo como calendarização o período de janeiro de 2024 a setembro de 2024 e como guia as nove tarefas que se apresentam.

	Mês	jan/24	fev/24	mar/24	abr/24	mai/24	jun/24	jul/24	ago/24	set/24																											
Tarefas	Semanas	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
Estudo de tecnologias de propriocepção	7																																				
Estudo de tecnologias de exterocepção física	9																																				
Estudo das ferramentas ROS, MoveIt e Gazebo	8																																				
Estudo de técnicas de calibração de sensores de F/B	6																																				
Desenvolver método para obter informações de contacto do objeto	3																																				
Desenvolver método para estimar a pose do objeto manipulado	7																																				
Incorporação do ROS, MoveIt, Gazebo e os métodos	14																																				
Análise dos resultados	4																																				
Elaboração do relatório	35																																				

Figura 1.1: Calendarização do projeto.

1.4 Organização do Documento

Este documento está organizado em seis capítulos. No Capítulo 1 é apresentada a introdução ao trabalho, incluindo a contextualização, a definição do problema, o plano de trabalho e a organização do documento. No Capítulo 2 são abordados conceitos teóricos e práticos que servem de apoio à compreensão da metodologia para obtenção de informações sobre o contacto e o objeto, bem como à implementação do trabalho. No Capítulo 3 é realizada a revisão bibliográfica de tecnologias de percepção proprioceptiva e exteroceptiva física e abordagens para adquirir essas informações. No Capítulo 4 é detalhada a metodologia, incluindo a justificativa da tecnologia de percepção utilizada e o método para a obtenção de informações sobre o contacto e o objeto. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas a implementação e os principais resultados obtidos nos testes realizados, seguidos das conclusões e de algumas ideias para possíveis trabalhos futuros, no Capítulo 6.

Capítulo 2

Fundamentação Teórico-Técnica

Neste capítulo abordam-se tópicos de álgebra linear aplicados à robótica que servem de apoio à compreensão da metodologia utilizada para obtenção de informações sobre o contacto e o objeto durante tarefas de manipulação, descrita no Capítulo 4. Além disso, são apresentadas tecnologias de *software* para o desenvolvimento e simulação robótica, que são utilizadas na implementação do trabalho, detalhada no Capítulo 5.

2.1 Álgebra Linear Aplicada à Robótica

Nesta secção apresentam-se conceitos relacionados com matrizes de rotação no espaço tridimensional e a representação de um vetor no formato de matriz antissimétrica. Também são discutidos vetores linearmente independentes, características de uma matriz, valores e vetores próprios. Além disso, abordam-se a técnica *Singular Value Decomposition* (SVD) e o método dos mínimos quadrados aplicado a um sistema de equações lineares.

2.1.1 Matrizes de Rotação no Espaço Tridimensional

O grupo especial ortogonal de três dimensões, referenciado por $\mathbb{SO}(3)$, é o conjunto de todas as matrizes ortogonais de dimensão 3×3 , com determinante igual a 1, que representam as rotações no espaço tridimensional. O grupo $\mathbb{SO}(3)$ é definido como $\mathbb{SO}(3) = \{\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \mid \mathbf{R} \cdot \mathbf{R}^T = \mathbf{R}^T \cdot \mathbf{R} = \mathbf{I}_3, \det(\mathbf{R}) = 1\}$, em que $\mathbf{I}_3$ representa a

matriz identidade de dimensão 3×3 e $\det(\mathbf{R})$ o determinante da matriz $\mathbf{R}$. Todas as matrizes de rotação referenciadas neste trabalho pertencem ao grupo $\mathbb{SO}(3)$ [2].

As matrizes $\mathbf{R}_X$, $\mathbf{R}_Y$ e $\mathbf{R}_Z$, representadas na Equação 2.1, descrevem rotações em torno dos eixos X , Y e Z no espaço tridimensional, por ângulos α , β e γ , respetivamente [2].

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_X(\alpha) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_Y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}, \\ \mathbf{R}_Z(\gamma) &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.1)$$

A matriz que representa uma rotação entre duas referências, é referenciada por ${}^B\mathbf{R}_A$ e descreve a orientação da referência $\{A\}$ em relação à referência $\{B\}$. Para representar essa rotação, pode-se utilizar a matriz de rotação Tait-Bryan na ordem Z - Y - X , representada na Equação 2.2.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(\gamma, \beta, \alpha) &= \mathbf{R}_Z(\gamma)\mathbf{R}_Y(\beta)\mathbf{R}_X(\alpha) \\ &= \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta & \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha - \sin \gamma \cos \alpha & \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + \sin \gamma \sin \alpha \\ \sin \gamma \cos \beta & \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha + \cos \gamma \cos \alpha & \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha - \cos \gamma \sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.2)$$

que consiste em aplicar uma rotação no eixo Z da referência $\{B\}$, em seguida, aplicar uma rotação no novo referencial em torno do eixo Y , obtendo o terceiro referencial, que se aplica uma rotação em torno do eixo X , dando origem à referência $\{A\}$.

Quando existe uma terceira referência $\{C\}$ relacionada com as referências $\{A\}$ e $\{B\}$ através de transformações rotacionais, a matriz que descreve a orientação da referência $\{A\}$ em relação à referência $\{C\}$ pode ser calculada através da multiplicação de matrizes de rotação, como apresentado na Equação 2.3.

$${}^C\mathbf{R}_A = {}^C\mathbf{R}_B {}^B\mathbf{R}_A \quad (2.3)$$

Caso existam n referências, o processo de cálculo é análogo (Equação 2.4) [2]. É importante salientar que o produto de matrizes de rotação não é comutativo, pelo que deve ser seguida a ordem representada [2].

$${}^0\mathbf{R}_n = {}^0\mathbf{R}_1 {}^1\mathbf{R}_2 \dots {}^{n-1}\mathbf{R}_n \quad (2.4)$$

Um vetor $\mathbf{p}$ representado em relação a uma referência $\{A\}$, ${}^A\mathbf{p}$, pode ser descrito em relação a uma referência $\{B\}$, ${}^B\mathbf{p}$, de acordo com a Equação 2.5.

$${}^B\mathbf{p} = {}^B\mathbf{R}_A {}^A\mathbf{p} \quad (2.5)$$

em que $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3$.

Ao aplicar a transposição a uma matriz de rotação que descreve a orientação da referência $\{A\}$ em relação à referência $\{B\}$, inverte-se a relação de referência, passando a descrever a orientação da referência $\{B\}$ em relação à referência $\{A\}$. Isto ocorre porque as matrizes de rotação possuem a propriedade $\mathbf{R}^T = \mathbf{R}^{-1}$ [2], conforme apresentado na Equação 2.6.

$${}^A\mathbf{R}_B = ({}^B\mathbf{R}_A)^T \quad (2.6)$$

em que o sobrescrito T representa a transposta da matriz.

Outra propriedade que será utilizada neste trabalho é que o quadrado da norma de Frobenius de uma matriz de rotação $\mathbf{R}$ é igual a três, $\|\mathbf{R}\|_F^2 = 3$, conforme demonstrado na Equação 2.7 [3].

$$\|\mathbf{R}\|_F^2 = \text{tr}(\mathbf{R}^T \mathbf{R}) = \text{tr}(\mathbf{I}_3) = 3 \quad (2.7)$$

em que $\|\mathbf{A}\|_F$ corresponde à norma de Frobenius de uma matriz $\mathbf{A}$, dada pela equação $\|\mathbf{A}\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |a_{ij}|^2}$ e $\text{tr}(\mathbf{A})$ ao traço de uma matriz $\mathbf{A}$, dado pela equação $\text{tr}(\mathbf{A}) = \sum_{i=1}^n a_{ii}$, em que $\mathbf{A}$ tem dimensão de $m \times n$.

2.1.2 Matriz Antissimétrica de um Vetor de Três Dimensões

Um vetor $\mathbf{v} = [v_x \ v_y \ v_z]^T \in \mathbb{R}^3$ pode ser representado na forma de matriz antissimétrica, $\mathbf{V}^A$, através da Equação 2.8 [2].

$$\mathbf{V}^A = \begin{bmatrix} 0 & -v_z & v_y \\ v_z & 0 & -v_x \\ -v_y & v_x & 0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \quad (2.8)$$

O produto externo (ou vetorial) de dois vetores $\mathbf{v}$ e $\mathbf{x}$ pode ser representado como um produto entre uma matriz e um vetor, utilizando a representação do vetor $\mathbf{v}$ na forma de matriz antissimétrica $\mathbf{V}^A$, conforme apresentado na Equação 2.9 [2].

$$\mathbf{v} \times \mathbf{x} = \mathbf{V}^A \cdot \mathbf{x} \quad (2.9)$$

em que $\mathbf{v}, \mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$.

O determinante de uma matriz antissimétrica de ordem ímpar é sempre zero, ou seja, $\det(\mathbf{A}) = -\det(\mathbf{A}) \Rightarrow \det(\mathbf{A}) = 0$, conforme demonstrado na Equação 2.10:

$$\det(\mathbf{A}) = \det(\mathbf{A}^T) = \det(-\mathbf{A}) = (-1)^n \det(\mathbf{A}) \quad (2.10)$$

em que $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ é uma matriz antissimétrica de ordem n . São consideradas as seguintes propriedades dos determinantes: $\det(\mathbf{A}) = \det(\mathbf{A}^T)$, $\det(c\mathbf{A}) = c^n \det(\mathbf{A})$ com $c \in \mathbb{R}$ [4] e a propriedade da matriz antissimétrica $\mathbf{A}^T = -\mathbf{A}$ [2].

Uma propriedade das matrizes antissimétricas em conjunto com matrizes de rotação é que, para qualquer vetor $\mathbf{v}$ e uma matriz de rotação $\mathbf{R}$, tem-se que [2]:

$$\mathbf{R}\mathbf{V}^A\mathbf{R}^T = (\mathbf{R}\mathbf{v})^A \quad (2.11)$$

em que $\mathbf{R} \in \mathbb{SO}(3)$ e $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3$.

2.1.3 Vetores Linearmente Independentes e Característica de uma Matriz

Um conjunto finito de m vetores $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_m$ dizem-se linearmente independentes se nenhum dos vetores puder ser escrito como combinação linear dos demais, isto é, se a única forma de escrever o vetor nulo $\mathbf{0}$ como combinação linear de $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_m$ é com m escalares $c_1, c_2, \dots, c_m$, todos iguais a zero, conforme apresentado na Equação 2.12 [5]:

$$c_1\mathbf{v}_1 + c_2\mathbf{v}_2 + \dots + c_m\mathbf{v}_m = \mathbf{0}_{n \times 1} \implies c_1 = c_2 = \dots = c_m = 0 \quad (2.12)$$

em que $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_m \in \mathbb{R}^n$, $c_1, c_2, \dots, c_m \in \mathbb{R}$ e $\mathbf{0}_{n \times 1}$ é a matriz nula de dimensão $n \times 1$.

A característica de uma matriz $\mathbf{A}$, denotada por $\text{car}(\mathbf{A})$, é o número máximo de linhas (ou colunas) linearmente independentes. A $\text{car}(\mathbf{A})$ pode ser obtida através do número de linhas não nulas da matriz $\mathbf{A}$ em escada de linhas, que se obtém através da eliminação de Gauss [5].

2.1.4 Valores e Vetores Próprios de uma Matriz

Considerando uma matriz quadrada $\mathbf{A} \in \mathbb{K}^{n \times n}$ com $\mathbb{K} = \mathbb{R} \cup \mathbb{C}$, um escalar λ é valor próprio de $\mathbf{A}$, se existir um vetor coluna não nulo $\mathbf{v} \in \mathbb{C}^n$ que satisfaça a Equação 2.13. Nestas condições, diz-se que $\mathbf{v}$ é um vetor próprio de $\mathbf{A}$ [5].

$$\mathbf{A}\mathbf{v} = \lambda\mathbf{v} \quad (2.13)$$

Os valores próprios de $\mathbf{A}$ são calculados determinando os valores de λ que satisfaçam a Equação 2.14 [5].

$$\det(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}_n) = 0 \quad (2.14)$$

2.1.5 Técnica *Singular Value Decomposition*

O método SVD [6] é utilizado para fatorizar matrizes retangulares. Este método permite decompor uma matriz $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ como um produto de três matrizes, conforme é apresentado na Equação 2.15.

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (2.15)$$

em que as matrizes $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ e $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ são ortogonais, gozando das propriedades: $\mathbf{U}^T\mathbf{U} = \mathbf{I}_m$, $\mathbf{V}^T\mathbf{V} = \mathbf{I}_n$ e $\mathbf{U}^T = \mathbf{U}^{-1}$, $\mathbf{V}^T = \mathbf{V}^{-1}$. A matriz $\mathbf{\Sigma}$ é uma matriz diagonal de dimensão $m \times n$, que contém os valores singulares s_i na diagonal principal, conforme apresentado na Equação 2.16:

$$\mathbf{\Sigma} = \begin{bmatrix} s_1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & s_c & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

em que s_i são as raízes quadradas dos valores próprios λ_i positivos e não nulos da matriz $\mathbf{B}$ ou $\mathbf{C}$ (Equação 2.17), ou seja, s_i com $i \in \{1, 2, \dots, c\}$ em que $c = \text{car}(\mathbf{A})$ e $s_i = \sqrt{\lambda_i}$ com $\lambda_i \in \mathbb{R}_+$. Os valores singulares são organizados de forma que $s_1 \geq s_2 \geq \dots \geq s_c$ e as colunas e linhas à direita e abaixo do último valor singular s_c , são preenchidas com zeros para completar a matriz até à dimensão $m \times n$ [6].

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}\mathbf{A}^T, \quad \mathbf{C} = \mathbf{A}^T\mathbf{A} \quad (2.17)$$

As matrizes $\mathbf{U}$ e $\mathbf{V}$ são constituídas pelos vetores próprios das matrizes $\mathbf{B}$ e $\mathbf{C}$ (Equação 2.17) organizados em colunas, conforme apresentado na Equação 2.18:

$$\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1^T \dots \mathbf{u}_m^T], \quad \mathbf{V} = [\mathbf{v}_1^T \dots \mathbf{v}_n^T] \quad (2.18)$$

em que $\mathbf{u}$ e $\mathbf{v}$ são os vetores próprios das matrizes $\mathbf{B}$ e $\mathbf{C}$, respetivamente, organizados por ordem decrescente dos valores próprios associados a cada vetor.

Resolver Sistema de Equações

Considerando um sistema do tipo $\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}$, em que $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ é a matriz de coeficientes com $m > n$, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de incógnitas e $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^m$ é o vetor de termos independentes. O vetor de incógnitas $\mathbf{x}$ pode ser estimado decompondo a matriz $\mathbf{A}$ através da técnica SVD, como demonstrado através da Equação 2.19 [7].

$$\begin{aligned}
\mathbf{Ax} &= \mathbf{b} \\
\mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T\mathbf{x} &= \mathbf{b} \\
(\mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T)^{-1}(\mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T)\mathbf{x} &= (\mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T)^{-1}\mathbf{b} \\
\mathbf{x} &= (\mathbf{V}^T)^{-1}\mathbf{\Sigma}^{-1}\mathbf{U}^{-1}\mathbf{b} \\
\hat{\mathbf{x}} &= \mathbf{V}\mathbf{\Sigma}^+\mathbf{U}^T\mathbf{b} \\
\hat{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}^+\mathbf{b}
\end{aligned} \tag{2.19}$$

em que a matriz $\mathbf{\Sigma}^{-1}$ é a inversa da matriz $\mathbf{\Sigma}$ e não pode ser calculada uma vez que tem dimensão $m \times n$. Assim, é calculada a pseudoinversa $\mathbf{\Sigma}^+$, que consiste em inverter os valores singulares não nulos da matriz $\mathbf{\Sigma}$, conforme a Equação 2.20:

$$\left(\mathbf{\Sigma}^+\right)_{ii} = \begin{cases} \frac{1}{s_i} & s_i \neq 0 \\ 0 & s_i = 0 \end{cases} \tag{2.20}$$

em que $i = \{1, \dots, c\}$ com $c = \text{car}(\mathbf{A})$.

Deve-se ter um cuidado especial com valores singulares s_i muito próximos de zero, pois estes podem introduzir instabilidade numérica. Em tais casos, é comum tratar esses valores como zero para evitar problemas numéricos [7].

2.1.6 Método dos Mínimos Quadrados Aplicado a um Sistema de Equações

O método dos mínimos quadrados, referenciado por *Least-Squares Method* (LSM), consiste em ajustar um modelo matemático aos dados observados de forma a minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e os valores estimados pelo modelo. A seguir, será exemplificada a utilização do método LSM para estimar dois vetores de coeficientes constantes de um sistema de equações lineares [8].

Considera-se um sistema de equações lineares conforme apresentado na Equação 2.21.

$$\mathbf{t} = \mathbf{F}\mathbf{p} + \mathbf{d} \tag{2.21}$$

em que o vetor $\mathbf{t} \in \mathbb{R}^m$ é o vetor de saída, $\mathbf{F} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ é a matriz de entrada, e $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^n$ e $\mathbf{d} \in \mathbb{R}^m$ são vetores com parâmetros constantes.

Os vetores $\mathbf{p}$ e $\mathbf{d}$ podem ser estimados através do método LSM, utilizando k observações do vetor de saída $\mathbf{t}$ e da matriz de entrada $\mathbf{F}$. Os k sistemas de equações podem ser representados, de forma matricial, através da Equação 2.22.

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{b} + \mathbf{r} \tag{2.22}$$

em que $\mathbf{y}$ é constituída pelos vetores de saída observados $\mathbf{t}_i$, com $i = \{1, 2, \dots, k\}$, $\mathbf{X}$ é constituída pelas matrizes de entrada observadas $\mathbf{F}_i$ e pela matriz identidade $\mathbf{I}_m$, $\mathbf{b}$ é constituída pelos vetores de parâmetros desconhecidos $\mathbf{p}$ e $\mathbf{d}$ e, por fim, $\mathbf{r}$ é constituída por k vetores coluna de dimensão m de erros aleatórios $\mathbf{l}_i$ [8], conforme apresentado na Equação 2.23.

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{t}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{t}_k \end{bmatrix}_{(m \cdot k) \times 1}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1 & \mathbf{I}_m \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{F}_k & \mathbf{I}_m \end{bmatrix}_{(m \cdot k) \times (n+m)}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \mathbf{d} \end{bmatrix}_{(n+m) \times 1}, \quad \mathbf{r} = \begin{bmatrix} \mathbf{l}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{l}_k \end{bmatrix}_{(m \cdot k) \times 1} \quad (2.23)$$

O modelo estimado $\hat{\mathbf{y}}$ está apresentado na Equação 2.24.

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\hat{\mathbf{b}} + \mathbf{e} \quad (2.24)$$

em que $\hat{\mathbf{b}}$ é o vetor estimado de $\mathbf{b}$, $\mathbf{X}$ corresponde à matriz apresentada na Equação 2.23, e o vetor $\mathbf{e}$ é constituído pelos vetores de resíduos que podem ser calculados a partir da Equação 2.25.

$$\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{X}\hat{\mathbf{b}} \quad (2.25)$$

Para determinar a equação que permite estimar o vetor $\hat{\mathbf{b}}$, escreve-se a soma dos quadrados dos resíduos como uma função da estimativa de $\hat{\mathbf{b}}$, ou seja, $S(\hat{\mathbf{b}})$, conforme apresentado na Equação 2.26.

$$\begin{aligned} S(\hat{\mathbf{b}}) &= \sum_{i=1}^{m \cdot k} \mathbf{e}_i^2 = \mathbf{e}^T \mathbf{e} = (\mathbf{y} - \mathbf{X}\hat{\mathbf{b}})^T (\mathbf{y} - \mathbf{X}\hat{\mathbf{b}}) \\ &= \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \mathbf{y}^T \mathbf{X}\hat{\mathbf{b}} - \hat{\mathbf{b}}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} + \hat{\mathbf{b}}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} \hat{\mathbf{b}} \end{aligned} \quad (2.26)$$

O mínimo da soma dos quadrados dos resíduos é obtido calculando a derivada de $S(\hat{\mathbf{b}})$ e igualando-a a zero, como apresentado nas Equações 2.27 e 2.28, respetivamente [8].

$$\frac{\partial S}{\partial \hat{\mathbf{b}}} = -2\mathbf{X}^T \mathbf{y} + 2\mathbf{X}^T \mathbf{X} \hat{\mathbf{b}} \quad (2.27)$$

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \hat{\mathbf{b}} = \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (2.28)$$

Através da manipulação da Equação 2.28, isola-se o vetor $\hat{\mathbf{b}}$ no primeiro membro da equação, obtendo-se assim a equação que permite calcular o vetor $\hat{\mathbf{b}}$, Equação 2.29.

$$\hat{\mathbf{b}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (2.29)$$

Deve-se ter em consideração que o número de observações k deve ser igual ou superior a 2, uma vez que existem dois vetores de parâmetros desconhecidos a serem estimados, $\mathbf{p}$ e $\mathbf{d}$. Na prática, exige-se quase sempre que k seja consideravelmente superior a 2 [8].

2.2 Ferramentas para o Desenvolvimento e Simulação Robótica

Nesta secção apresentam-se tecnologias de *software* utilizadas para o desenvolvimento e simulação robótica, incluindo o *Robot Operating System* (ROS), Gazebo, MoveIt e, por fim, o Rviz.

2.2.1 *Robot Operating System*

O ROS [9] é uma plataforma de *software* projetada para o desenvolvimento de aplicações robóticas. Funciona como um conjunto de bibliotecas e ferramentas que simplificam o desenvolvimento de *software* para robôs. O objetivo principal do ROS é fornecer uma infraestrutura comum para o desenvolvimento robótico, permitindo que os desenvolvedores criem e integrem diferentes componentes de *software* de forma modular e reutilizável. Este facilita a comunicação entre diversas partes do sistema robótico, como sensores e controladores, e promove a colaboração dentro da comunidade de robótica.

O ROS permite o desenvolvimento independente de componentes, designados por nós, que podem ser posteriormente integrados para funcionar em conjunto. Isso facilita a reutilização de código e a adição de novas funcionalidades. Além disso, o ROS gere a troca de informações entre os componentes do sistema robótico através de mensagens padronizadas e protocolos de comunicação. Oferece ainda ferramentas para a simulação de robôs em ambientes virtuais, permitindo testes antes da implementação em *hardware* real tal como o Gazebo. Isto inclui a simulação de sensores, atuadores e a interação com o ambiente, permitindo ajustes e validações antecipadas [10]. Para organizar e gerir eficientemente o desenvolvimento desses pacotes de *software*, pode-se utilizar o espaço de trabalho Catkin [11], uma estrutura essencial no ambiente ROS.

2.2.2 Gazebo

O Gazebo é uma ferramenta de simulação robótica que permite a criação de ambientes virtuais complexos para o desenvolvimento e teste de algoritmos robóticos. Esta plataforma oferece uma simulação precisa tanto de sensores quanto de dinâmicas físicas, tornando-a uma escolha popular para investigação e desenvolvimento na área da robótica.

Com o Gazebo, é possível criar ambientes tridimensionais que simulam de forma realista a interação de robôs com o mundo físico. Este simulador é utilizado para testar algoritmos de controlo, navegação, visão por computador e manipulação, uma vez que permite realizar ajustes e validações em condições controladas antes da implementação em ambiente real. A integração com o ROS facilita a transferência de aplicações desenvolvidas no ambiente de simulação para robôs reais, mantendo a consistência entre os testes virtuais e a operação no mundo físico.

O Gazebo também suporta a simulação de múltiplos robôs no mesmo ambiente, permitindo o estudo de comportamentos colaborativos ou competitivos entre eles. Além disso, possui uma biblioteca extensa de modelos de robôs, sensores e objetos que podem ser facilmente utilizados e modificados, tornando o processo de desenvolvimento mais rápido e eficiente [12].

2.2.3 MoveIt

O MoveIt é uma biblioteca de código aberto para manipulação robótica que oferece funcionalidades avançadas de planeamento de trajetórias, controlo de movimento e percepção. Projetado para funcionar com o ROS, o MoveIt é utilizado em robótica industrial e de investigação para desenvolver aplicações de manipulação, como a movimentação de manipuladores robóticos e a execução de tarefas de manipulação.

O MoveIt fornece ferramentas para o planeamento de trajetórias em ambientes tridimensionais complexos, considerando as restrições cinemáticas e dinâmicas do robô. Isso é essencial para evitar colisões e garantir que os movimentos planeados sejam seguros. A sua arquitetura modular permite que os utilizadores integrem diferentes algoritmos de planeamento e controlo de movimento, personalizando o comportamento do robô de acordo com as necessidades específicas da aplicação.

Além disso, o MoveIt suporta a integração com sensores para percepção do ambiente, o que permite ao robô ajustar as suas ações com base em informações em tempo real. Esta capacidade é fundamental para tarefas em ambientes dinâmicos ou desconhecidos, onde a adaptabilidade e a resposta rápida são essenciais [13].

2.2.4 Rviz

O Rviz é uma ferramenta de visualização 3D que faz parte do ecossistema ROS e é utilizada para a visualização de dados de sensores, estados de robôs, mapas e outros elementos relevantes em aplicações robóticas. Esta ferramenta é essencial para o desenvolvimento e depuração de aplicações robóticas, pois permite a visualização em tempo real da informação que o robô está a processar.

Com o Rviz, é possível monitorizar dados de uma ampla gama de fontes, incluindo câmeras, sensores de proximidade, e dados de posição e orientação dos robôs.

A interface gráfica intuitiva facilita a configuração de múltiplas vistas e a personalização da apresentação dos dados, o que é crucial para compreender e diagnosticar o comportamento dos robôs durante o desenvolvimento e os testes.

O Rviz também é usado para configurar e testar algoritmos de navegação e mapeamento, fornecendo uma visualização clara do ambiente e dos objetos presentes, bem como a trajetória planeada e a posição atual do robô ou da ferramenta. Esta visualização em tempo real ajuda a identificar problemas e ajustar os parâmetros do sistema, melhorando, assim, o desempenho do sistema [14].

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo abordam-se conceitos de propriocepção e exterocepção alinhados com a proposta apresentada. Também são exploradas as informações sobre o contacto e o objeto que podem ser adquiridas durante a preensão de objetos em tarefas de manipulação. Por fim, são descritas tecnologias e métodos de propriocepção e exterocepção física utilizados na preensão de objetos, com o objetivo de permitir uma preensão mais estável e uma manipulação mais segura.

3.1 Conceito de Propriocepção e Exterocepção

A visão é uma fonte primária de informação tanto em seres humanos como na robótica. Em tarefas que envolvam a manipulação de objetos, depender exclusivamente da visão pode ser limitante, uma vez que algumas propriedades importantes do objeto, como a massa, o tipo de material ou a textura, não podem ser percebidas de forma precisa. Por exemplo, numa tarefa de classificação de caixas fechadas e opacas com base no facto de estarem vazias ou não, não é possível fazê-lo utilizando apenas a visão. Conhecendo a massa da caixa, é possível classificá-la corretamente, assim como ajustar a força de preensão (combinando com o coeficiente de atrito percebido através da textura da caixa), evitando o escorregamento utilizando dedos.

Em situações em que seja necessário estimar a pose de um objeto, existem casos em que a dependência exclusiva da visão também é limitante, como em ambientes com mudanças imprevisíveis nas condições de iluminação, na manipulação de objetos

translúcidos, na presença de reflexões e oclusões, entre outros. Durante a manipulação de objetos, a utilização simultânea de diferentes tipos de percepção sensorial, como a visão, a percepção tátil e a propriocepção, ajuda a resolver ambiguidades [15, 16].

A percepção sensorial pode ser dividida em duas categorias, dependendo do tipo de estímulos recebidos [17, 18]: proprioceptiva (Figura 3.1.a), que diz respeito à sensibilidade a estímulos internos ao corpo, e a exteroceptiva (Figura 3.1.b), que diz respeito à sensibilidade a estímulos externos ao corpo. No corpo humano, a propriocepção consiste na sensação de posicionamento e movimento do corpo no espaço, com sensibilidade nas articulações, tendões e músculos, o que permite perceber a posição, velocidade, duração do movimento, esforço, entre outros. Enquanto na exterocepção, ocorrem sensações visuais, táteis, auditivas, olfativas e gustativas, que permitem, por exemplo, perceber a distância, sentir a textura dos objetos e a temperatura.



Figura 3.1: Percepção sensorial humana: a) proprioceptiva e b) exteroceptiva.

No domínio da robótica industrial, especificamente em manipuladores, também existem as duas categorias de percepção sensorial. A propriocepção refere-se à capacidade do manipulador perceber a sua posição e orientação no espaço, assim como a velocidade, a aceleração e a força através de, por exemplo, sensores de posição angular (ou linear) e sensores de Força e Binário (F/B) instalados nas juntas do manipulador. A exterocepção está diretamente relacionada com a capacidade do robô perceber e interpretar informações sobre o ambiente externo, que vai desde a utilização de sensores *Red, Green, Blue and Depth* (RGB-D) para identificação de obstáculos, até à utilização de sensores táteis para garantir estabilidade da preensão durante a manipulação de objetos. A exterocepção física é um campo da exterocepção que se concentra na utilização de sensores táteis, que fornecem um conjunto de informações baseadas nos contactos com o ambiente externo. Na preensão e manipulação de objetos através de manipuladores robóticos, os sensores táteis são instalados nas superfícies de contacto com os objetos, como por exemplo, num ou em vários dedos de uma garra paralela. Este tipo de percepção sensorial, em conjunto com a propriocepção, permite obter informações sobre o contacto e o objeto durante

tarefas de manipulação, como por exemplo, a deteção de escorregamento, a posição de contacto, as forças aplicadas sobre o sensor, a massa e a dinâmica do objeto, o que permite uma preensão robusta e uma manipulação segura do objeto.

3.2 Informações sobre o Contacto

Segundo a abordagem seguida por Li *et al.* [19], existem quatro tipos diferentes de informação sobre o contacto que podem ser obtidas através do contacto com o objeto e que serão discutidas nas subsecções seguintes: Geometria de Contacto (GC), Forças e Binário de Contacto (FBC), Eventos de Contacto (EC) e Propriedades da Superfície do Objeto (PSO).

3.2.1 Geometria de Contacto

Consiste em estimar a geometria da área de contacto, incluindo a posição, a normal e a curvatura (Figura 3.2). Através de vários pontos de contacto e das respetivas direções normais, é possível verificar a estabilidade da preensão, fornecendo uma aproximação de primeira ordem da área da superfície local, com a direção normal a definir o plano tangente em cada ponto de contacto. A curvatura permite detetar se a superfície é convexa, côncava ou plana.

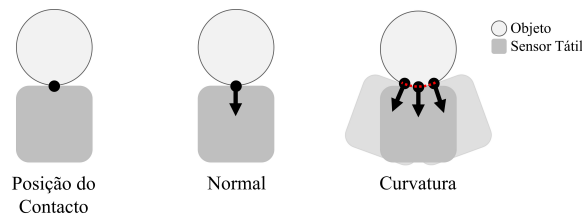


Figura 3.2: Geometria de contacto. Figura baseada em Li *et al.* [19].

3.2.2 Forças e Binário de Contacto

Estimar a força normal, tangencial e o binário normal exercido pelo objeto sobre o sensor tátil ou o dedo (Figura 3.3) permite assegurar a estabilidade da preensão. Desta forma, evita-se o escorregamento do objeto e previne-se a aplicação de força excessiva que o possa danificar.

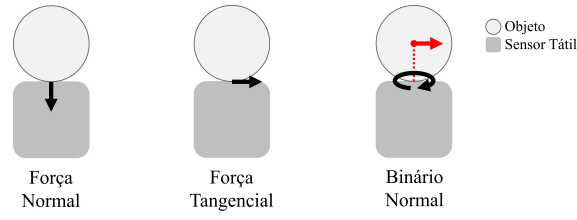


Figura 3.3: Forças e binário de contacto. Figura baseada em Li *et al.* [19].

Na Figura 3.4 está a representação de uma preensão de um objeto através de uma garra paralela de dois dedos instalada num manipulador robótico que se encontra estático. Limitando a análise ao exemplo da Figura 3.4, a força de preensão, por vezes também designada por força de contacto, pode ser dividida em duas componentes: componente normal (F_{n1} e F_{n2}) e componente tangencial (F_{t1} e F_{t2}). A componente normal é aplicada perpendicularmente à superfície de contacto, enquanto a componente tangencial é a força aplicada ao longo da superfície de contacto.

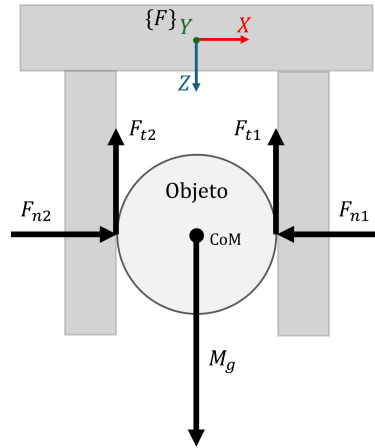


Figura 3.4: Preensão de um objeto através de uma garra paralela de dois dedos, considerando apenas a componente vertical.

A estabilidade da preensão requer que $F_{t1} + F_{t2} = M_g$, em que M_g é a força resultante devido à massa do objeto e à aceleração da gravidade aplicada no Centro de Massa (CoM). De acordo com a teoria do atrito de Coulomb, a forma mais simples de evitar escorregamento é ajustar a força normal nos dois pontos de contacto entre o dedo e o objeto, F_{nk} com $k = 1, 2$, de forma a que o produto da força normal de cada ponto de contacto F_{nk} pelo coeficiente de atrito estático do conjunto das duas superfícies em contacto (objeto e dedo da garra) μ_s , seja superior ou igual à respetiva força tangencial F_{tk} no ponto de contacto [20], conforme apresentado na Equação 3.1. Duas condições para assegurar a estabilidade de um objeto manipulado, utilizando as duas componentes da força de preensão, é o cone de atrito [21] e a representação antipodal [22, 23].

$$F_{tk} \leq \mu_s F_{nk} \quad (3.1)$$

Durante a manipulação de objetos desconhecidos, estimar as forças necessárias para garantir uma preensão estável representa um desafio, uma vez que o coeficiente de atrito estático não é conhecido. Uma das razões pelas quais os seres humanos conseguem manipular objetos desconhecidos de forma estável e sem os danificar é a sua capacidade de prever a força de preensão em que, na presença de escorregamento, é adicionada uma força adicional para compensar possíveis erros dessa previsão [24].

3.2.3 Eventos de Contacto

Os eventos de contacto permitem detetar mudanças no estado de contacto entre o dedo e o objeto, como a presença/ausência de contacto e a deteção de escorregamento iminente ou total (Figura 3.5). Estas informações permitem identificar falhas na preensão durante a manipulação do objeto, o que pode ter impacto em várias ações de controlo, como por exemplo: interromper a trajetória do robô, ajustar a força de preensão, alterar a trajetória e as acelerações do robô e ajustar a pose da ferramenta durante a aproximação do objeto a uma superfície.

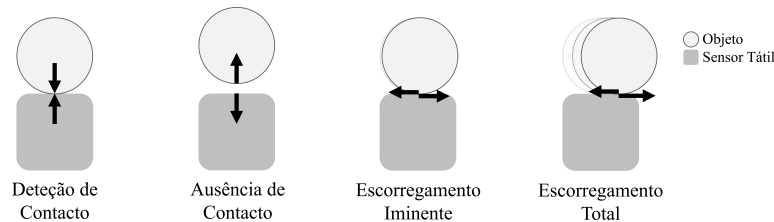


Figura 3.5: Eventos de contacto. Figura baseada em Li *et al.* [19].

Se não for possível garantir a estabilidade da preensão, especialmente na preensão de objetos desconhecidos em que o coeficiente de atrito estático é desconhecido, surge o escorregamento. O escorregamento pode ser dividido em duas etapas temporalmente contíguas (Figura 3.6): o escorregamento iminente, que consiste num deslocamento relativo que ocorre apenas numa pequena região de contacto, precedendo o escorregamento total, que envolve um deslocamento de um grande número de pontos da região de contacto. No instante em que ocorre o escorregamento total, as superfícies entram em movimento relativo entre si. Nesse momento, o coeficiente de atrito estático é substituído pelo coeficiente de atrito dinâmico, exigindo uma força de preensão mais robusta para estabilizar o objeto.

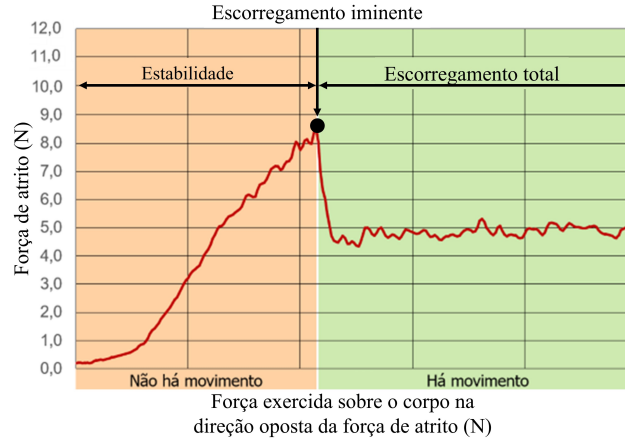


Figura 3.6: Comportamento da força de atrito, obtido através de dados experimentais, durante a estabilidade, durante o escorregamento iminente e durante o escorregamento total. Figura adaptada de Neta [25].

Durante um escorregamento total é importante considerar a natureza do movimento entre superfícies, que poderá ser linear ou angular. No escorregamento linear (Figura 3.7a), a orientação do objeto em relação a uma referência mantém-se, enquanto um escorregamento angular (Figura 3.7b) envolve uma rotação do objeto em torno de um ou vários eixos. Esta distinção é crucial uma vez que o escorregamento angular exige uma resposta de força de prensão significativamente mais robusta para manter a prensão do objeto, em comparação com o escorregamento linear [26].

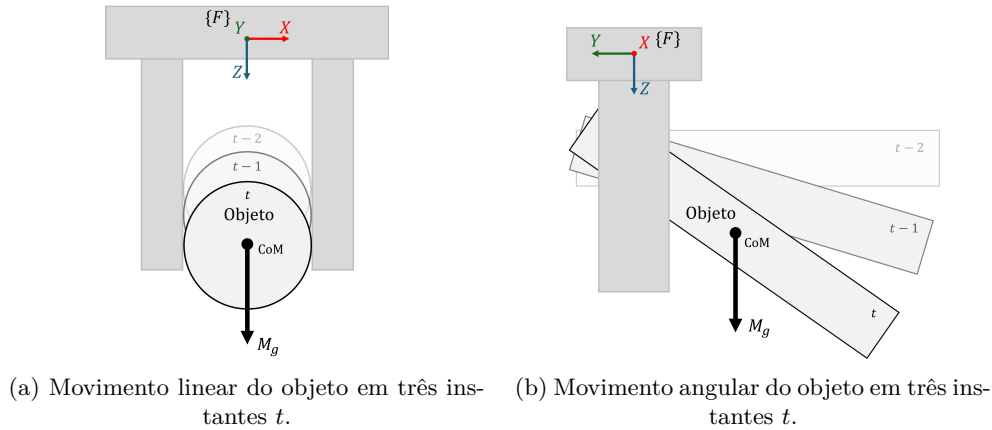


Figura 3.7: Movimento de um objeto com formato cilíndrico devido à presença de escorregamento total, manipulado através de uma garra paralela de dois dedos.

A monitorização da pose do objeto manipulado permite identificar o escorregamento total e a natureza do movimento, através da análise da variação do deslocamento linear e angular. O movimento entre as superfícies em contacto produz

vibrações, em que a frequência e a intensidade do sinal pode variar conforme o tipo de material utilizado nas superfícies em contacto [27], podendo ser detetadas diretamente (medindo a intensidade e a frequência da vibração) ou indiretamente (através da F/B aplicados ao objeto manipulado) [20]. O ser humano tem a capacidade de sentir estas vibrações através de mecanorreceptores, que são sensíveis a forças normais e tangenciais, alongamentos na pele e vibrações [28].

3.2.4 Propriedades da Superfície do Objeto

Consiste em extrair as propriedades da superfície de contacto do objeto, como a dureza, a textura e o coeficiente de atrito estático (Figura 3.8). A dureza indica a resistência à deformação permanente, como por exemplo, riscos e abrasão. Analisar a textura ajuda a classificar a superfície dos objetos assim como a detetar imperfeições. O coeficiente de atrito estático permite identificar a força de prensão necessária para segurar o objeto sem que ele escorregue.

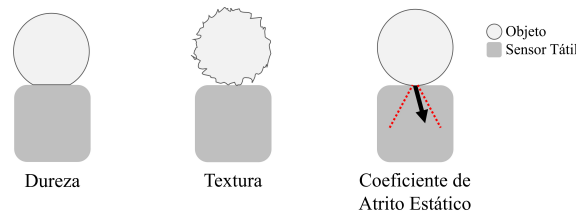


Figura 3.8: Propriedades da superfície do objeto. Figura baseada em Li *et al.* [19].

3.3 Informações sobre o Objeto

Em tarefas que envolvem a manipulação de objetos desconhecidos, é crucial estimar o estado e as propriedades físicas desses objetos. Nas subsecções seguintes, são apresentadas algumas características importantes: a pose, a geometria, a massa e o conteúdo do objeto [19].

3.3.1 Pose do Objeto

Estimar a pose do objeto em tempo real permite uma manipulação com segurança e precisão, através do ajuste dinâmico da trajetória do robô em resposta a mudanças na pose do objeto, que podem ter origem devido a um escorregamento. Desta forma, evita-se que o objeto colida com o ambiente ou com o próprio robô. Além disso, também é útil em tarefas que envolvam o posicionamento de peças, soldadura e na interação segura com humanos em ambientes colaborativos.

3.3.2 Geometria do Objeto

A geometria do objeto é importante em tarefas que envolvam interações com objetos. Antes de realizar a apreensão de um objeto é necessário identificar as superfícies opostas para o agarrar adequadamente. Em regiões visualmente ocultas, podem ser utilizados sensores táteis para medir as posições e as normais das áreas de superfície de contacto, reconstruindo assim a geometria do objeto. Durante tarefas de manipulação, através da geometria do objeto e da cinemática da garra é possível estimar a posição e a orientação do objeto.

3.3.3 Centro de Massa e Massa do Objeto

Em tarefas de manipulação, o objeto atua como uma carga adicional para o robô. Identificar a posição do centro de massa do objeto é útil, dado que agarrar o objeto perto do seu centro de massa permite reduzir o binário exercido sobre o dedo, o que diminui a probabilidade de escorregamento e movimentos angulares. Estimar a massa do objeto também é importante para determinar se o robô tem a capacidade de o manipular, bem como para prever as forças tangenciais que atuam na superfície dos dedos.

3.3.4 Conteúdo do Objeto

Para além da massa do objeto, é possível determinar o seu conteúdo. Em objetos que contenham líquidos ou materiais granulares, como uma garrafa plástica com água, é possível identificar se o objeto está cheio ou vazio, ou se está aberto ou fechado, através de sensores táteis (ao pressionar o objeto) ou através de propriocepção, utilizando, por exemplo, sensores de F/B, o que permite uma análise mais detalhada do conteúdo interno do objeto.

3.4 Tecnologias de Percepção Proprioceptiva

Os sensores proprioceptivos do robô fornecem informações sobre os parâmetros internos do robô, como por exemplo, a posição ou velocidade de uma junta (linear ou angular). Existem várias tecnologias presentes, como por exemplo, sensores de F/B, *enconders*, taquímetros, sensores inerciais (que incluem acelerómetros, giroscópios, inclinómetros e bússolas) [29].

Nesta secção abordam-se dois tipos de tecnologias utilizadas na percepção proprioceptiva: sensores de F/B de 6 *Degrees of Freedom* (DoF) e sensores de posição e velocidade, com maior detalhe nos sensores de F/B de 6 DoF. Também é incluída uma subsecção que apresenta informações sobre o contacto e o objeto que podem ser adquiridas através de cada tecnologia.

3.4.1 Sensores de Força e Binário

Os sensores de F/B de 6 DoF permitem medir as forças e os binários que lhe são aplicados em seis direções diferentes: três direções de força (eixo X , Y e Z) e três direções de binário (rotação em torno de cada eixo: *roll*, *pitch*, *yaw*). Na robótica, especificamente em manipuladores, estes sensores são aplicados no punho do robô ou nas juntas das articulações do robô ou da ferramenta. Outra forma de estimar as F/B consiste em medir a corrente percorrida nos atuadores de cada junta.

O sensor de F/B de 6 DoF no punho do robô tem sido utilizado em diversas aplicações que envolvam contacto, como por exemplo: na orientação manual do robô [30], onde é possível posicionar o punho do robô utilizando a mão humana, em tarefas de montagem de precisão [31], refinando a estimativa da posição final de um objeto manipulado e em trabalhos que envolvam contacto entre a ferramenta e a peça, como em polimento de superfícies [32]. Em tarefas de manipulação de objetos, as pesquisas são limitadas e têm-se concentrado essencialmente em estimar parâmetros inerciais de objetos rígidos, como a massa, o centro de massa e a matriz de inércia [33, 34], permitindo identificar o objeto dentro de um conjunto de objetos e estimar a sua pose, com algumas limitações principalmente em objetos que apresentem simetrias. Outras pesquisas concentram-se em detetar o escorregamento total do objeto durante movimentos verticais, assim como a quantidade de objetos agarrados [35].

Para compreender como os sensores de F/B de 6 DoF funcionam nas diversas aplicações práticas é importante entender o seu princípio de funcionamento. Estes sensores medem o grau de deformação de um material elastómero, que sofre deformações por ação de uma força e recupera a sua forma original quando a força é retirada. Segundo a abordagem seguida por Cao *et al.* [36], os sensores de F/B de 6 DoF podem ser divididos em quatro categorias, com base na técnica de transdução utilizada: extensómetro Resistivo (Re), Piezoelétrico (Pe), Capacitivo (Ca) e Ótico (Ot), sendo que os sensores de extensómetro resistivo são os mais utilizados atualmente (2021) [36].

Extensómetro Resistivo

As duas estruturas mais comuns (2021) utilizadas em sensores de extensómetro resistivo são as de Viga Cruzada (VC) e as de Plataforma Paralela (PP) (Figura 3.9a e Figura 3.9b, respetivamente) [36]. Ambas as estruturas apresentam uma superfície externa que é mantida fixa enquanto forças externas são aplicadas à superfície interna, criando uma deformação nos ramos de medição. Estas deformações são medidas através de extensómetros resistivos que impõem uma variação de resistência elétrica, em que é possível calcular as seis componentes de força.

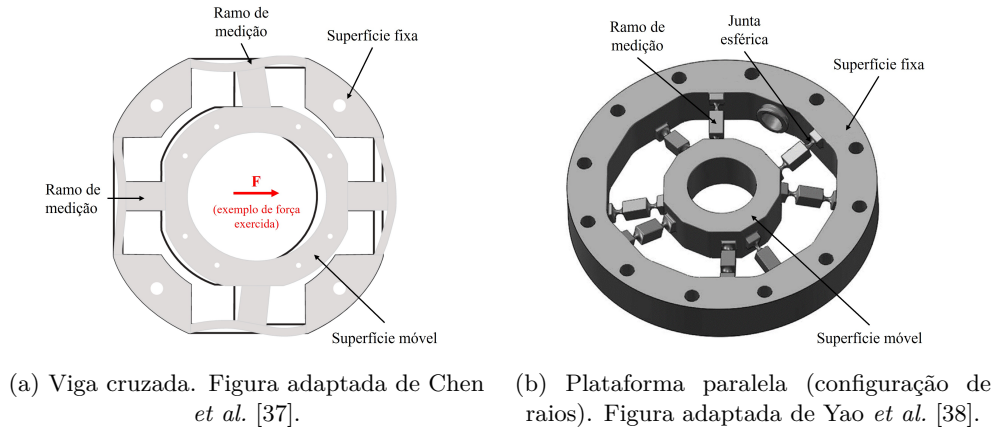


Figura 3.9: Estruturas elastómeras que utilizam extensómetros resis-
tivos para medição de força.

Os extensómetros resistivos instalados em cada ramo de medição, organizados em pontes de Wheatstone, facilitam a compensação devido a variações de temperatura. Os extensómetros resistivos são vulneráveis a interferências eletromagnéticas e têm uma sensibilidade relativamente baixa, o que se pode tornar numa limitação em aplicações em que é necessário uma elevada rigidez do sensor [39].

Piezoelétrico e Capacitivo

O sistema de deteção de força piezoelétrico utiliza o efeito piezoelétrico de cristais de quartzo ou elementos cerâmicos para detetar as componentes de força aplicadas, convertendo-as numa carga elétrica [40]. No exemplo da Figura 3.10a, o sensor é composto por quatro grupos de cristais de quartzo, com a mesma rigidez e sensibilidade, estando dispostos em cada vértice de um quadrado. Cada grupo de cristais consegue medir três forças, e através do valor dessas forças e da largura do quadrado é possível medir as componentes de força e binário.

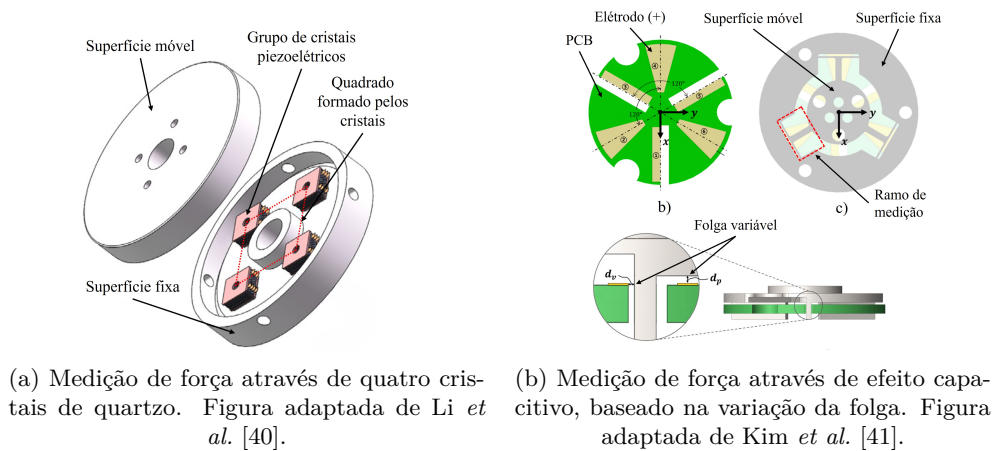


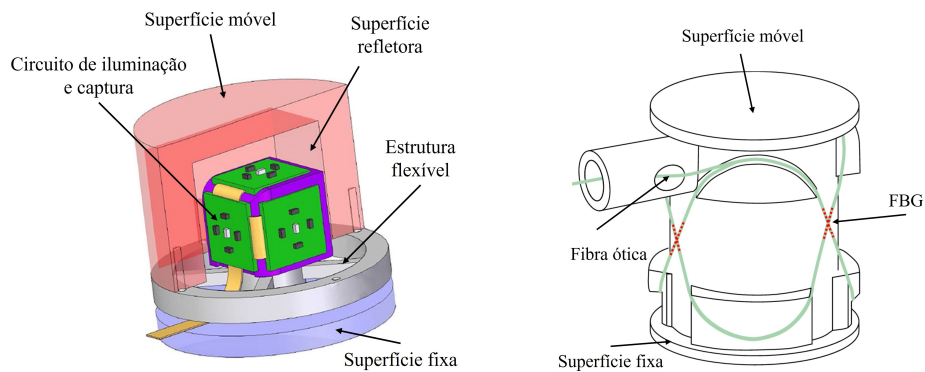
Figura 3.10: Sistemas de deteção de força que utilizam o efeito piezoelétrico e o efeito capacitivo.

A técnica capacitiva baseia-se no conceito de que a variação da distância (folga) entre dois eletrodos influencia a capacitância, como representado na Figura 3.10b. O sensor pode ser constituído por uma estrutura fixa e outra móvel, que quando submetido a uma força externa, os elementos de medição sofrem deformações, o que resulta em variações na folga entre os eletrodos. A disposição dos eletrodos e a variação da folga permitem a medição das componentes de força e binário [41].

A deteção capacitiva apresenta uma elevada sensibilidade, o que permite medições de muito baixo valor [42].

Ótico

Os sensores F/B que utilizam a técnica ótica funcionam através da reflexão ou dispersão da luz. Podem ser classificados em duas categorias: sensores óticos e grades de Bragg, conhecidos por *Fiber Bragg Grating* (FBG) [36]. Os sensores óticos consistem na iluminação de uma superfície móvel em que é capturada a reflexão da luz (Figura 3.11.a). As grades de Bragg são fibras óticas em que o índice de refração ou comprimento de onda da luz varia devido a uma força aplicada (Figura 3.11.b) e atualmente (2020) são as mais populares em aplicações de medição de força [39]. A principal vantagem recai sobre a imunidade a interferências eletromagnéticas [36].



(a) Método que utiliza a reflexão de luz. Figura adaptada de Palli *et al.* [43]. (b) Método que utiliza FBG. Figura adaptada de Müller *et al.* [44].

Figura 3.11: Sistemas de deteção de força que utilizam sensores optoeletrónicos.

Resumo das Vantagens e Desvantagens de Cada Tecnologia

Na Tabela 3.1 está apresentado um resumo das vantagens e desvantagens de cada tecnologia utilizada nos sensores F/B de 6 DoF.

Tabela 3.1: Vantagens e desvantagens de várias tecnologias utilizadas em sensores de F/B de 6 DoF, nomeadamente: Viga Cruzada (VC), Plataforma Paralela (PP), Capacitivo (Ca), Piezoelétrico (Pe) e Ótico (Ot).

	Vantagens	Desvantagens
VC	- Sem manutenção [45]. - Fiável [46]. - Elevada rigidez [43].	- Vulnerável a sobrecargas [47]. - Elevado consumo de energia [46]. - Sensível a ruído eletromagnético [48].
PP	- Tolerante a falhas [49]. - Sem acumulação de erros [50]. - Isotropia espacial [51].	- Elevado consumo de energia [46]. - Sensível ao ruído eletromagnético [48]. - Vulnerável a sobrecargas [47].
Ca	- Elevada largura de banda [45]. - Robusto e durável [45]. - Sem deriva ao longo do tempo [46].	- Sensível à temperatura [46]. - Capacitância parasita [45]. - Presença de histerese [52].
Pe	- Bom desempenho dinâmico [46]. - Elevada precisão [45]. - Elevada sensibilidade [45].	- Insensível a forças estáticas [53]. - Presença de deriva para forças estáticas [45]. - Baixa resolução espacial [45].
Ot	- Baixo consumo de energia [54]. - Não é afetado por interferências eletromagnéticas [45]. - Fiável [46].	- Sensível à temperatura [39]. - Construção dispendiosa [45].

Soluções Comerciais

Existem vários fabricantes que disponibilizam soluções comerciais de sensores de F/B de 6 DoF, nomeadamente: ATI [55], Hottinger Brüel & Kjær [56], Robotiq [57], Interface Force Measurement Solutions [58], JR3 [59], Kistler [60], Onrobot [61] e Wittenstein [62]. As especificações técnicas detalhadas de cada sensor fornecido por estes fabricantes podem ser encontradas em [36] ou nas folhas de dados disponíveis nos respetivos páginas web.

Escolha da Tecnologia mais Apropriada

A escolha do melhor sensor para o tipo de aplicação pode ser feita seguindo as próximas três etapas, conforme detalhado por Cao *et al.* [36]:

1. estimar as forças e binários máximos para a aplicação e garantir que se encontram dentro da gama de medição do sensor. Ter em conta os requisitos de sobrecarga e precisão, assim como a resolução do sensor;

2. identificar as características importantes do sensor na aplicação prática, como por exemplo, a resistência a ruído eletromagnético, tolerância a falhas, isotropia e rigidez;
3. seleção final com base em dados de calibração e detalhes de medição do sensor, como erro de desacoplamento, histerese e deriva.

3.4.2 Sensores de Posição e Velocidade

O principal sensor utilizado para medir a posição angular e a velocidade é o *encoder*. O *encoder* mais comum na robótica é o *encoder* ótico de quadradura, que permite estimar a rotação, a velocidade e a direção do movimento [63]. Os sensores de posição podem ser utilizados para o controlo da posição dos robôs e das ferramentas utilizadas para preensão, permitindo, por exemplo, determinar a posição e orientação da ferramenta do robô em relação a um determinado referencial [64]. Também permitem estimar a velocidade de translação e de rotação do robô ao fim de um certo período de tempo [29].

Algumas ferramentas comerciais contêm sensores integrados de posição de articulações, como por exemplo, as mãos robóticas Shadow Dexterous Hand [65] e BarrettHand [66]. Os investigadores têm utilizado a posição das articulações das ferramentas para prever a posição e orientação de objetos durante a sua manipulação, afirmando que a utilização de mãos robóticas apresenta muito mais conteúdo do que as garras com dois ou três dedos [67]. Para encontrar a forma da mão, utiliza-se a posição articular, e conhecendo o modelo 3D do objeto manipulado, pode-se inferir quais as posições possíveis do objeto que encaixam naquela posição da mão [68].

3.4.3 Informações sobre o Contacto e o Objeto Obtidas através de Sensores de Força, Binário e de Posição

Na Tabela 3.2 são referenciados estudos utilizados para obter informações sobre o contacto e o objeto através de sensores proprioceptivos, nomeadamente: sensor de F/B de 6 DoF instalado no punho do robô e sensores de posição e orientação nas juntas da ferramenta.

Tabela 3.2: Informações sobre o contacto: Geometria de Contacto (GC), Forças e Binário de Contacto (FBC), Eventos de Contacto (EC) e Propriedades da Superfície do Objeto (PSO), e informações sobre o objeto, obtidas através de sensores propioceptivos, nomeadamente: sensor de F/B de 6 DoF instalado no punho do robô e sensores de posição e velocidade.

Informação de Contacto		Sensor de F/B no Punho do Robô	Posição e Orientação das Juntas da Ferramenta
GC	Posição de Contacto	✗	✗
	Normal	✗	✗
	Curvatura	✗	✗
FBC	Força Normal	✗	✗
	Força Tangencial	✓ [33]	✗
	Binário Normal	✗	✗
EC	Deteção de Contacto	✓ [35]	✗
	Escorregamento Iminente	✗	✗
	Escorregamento Total	✓ [35]	✗
PSO	Dureza	✗	✗
	Textura	✗	✗
	Coeficiente de Atrito Est.	✗	✗
Posição do Objeto		✓ [33]	✓ [68]
Orientação do Objeto		✓ [33]	✓ [68]
Classificação de Objetos		✓ [33]	✗

✓ A informação pode ser obtida utilizando o sensor propioceptivo referenciado.

✗ Informação não encontrada, com o melhor conhecimento do autor.

3.5 Tecnologias de Percepção Exteroceptiva Física

Nesta secção apresentam-se os mecanorreceptores, que servem de inspiração para tecnologias de percepção tátil. De seguida, descrevem-se tecnologias de sensores táteis utilizadas em tarefas de manipulação, abrangendo diferentes mecanismos de transdução, nomeadamente: piezoresistivo, resistivo, capacitivo, piezoelétrico, triboelétrico e visuo-tátil. Finalmente, são apresentadas as informações sobre o contacto e o objeto que podem ser adquiridas através de cada tecnologia. A secção conclui com a descrição de abordagens utilizadas para obter essas informações, com destaque para os sensores visuo-táteis.

3.5.1 Mecanorreceptores e Analogia com Sensores Táteis

A capacidade humana de manipular objetos de forma estável deve-se à percepção exteroceptiva física, que fornece informações importantes sobre as interações com o ambiente. Esta percepção é realizada através de mecanorreceptores (Figura 3.12)

que têm servido de inspiração para o desenvolvimento de tecnologias avançadas de preensão na robótica.

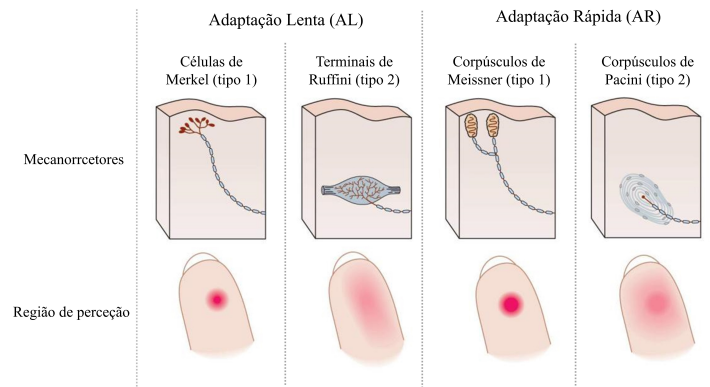


Figura 3.12: Mecanorreceptores e a região de percepção sensorial na ponta dos dedos. Figura adaptada de [69].

Os mecanorreceptores podem ser divididos em dois grupos, mediante o tipo de estímulos detetados (Tabela 3.3): Adaptação Lenta (AL) e Adaptação Rápida (AR). No grupo dos mecanorreceptores de AL encontram-se as células de Merkel e os terminais de Ruffini que respondem a estímulos constantes, permitindo detetar forças normais e tangenciais estáticas aplicadas sobre a pele e a direção de alongamentos da pele, respetivamente. No grupo dos mecanorreceptores de AR, encontram-se os corpúsculos de Meissner e de Pacini que são sensíveis a mudanças rápidas na superfície da pele e a vibrações de até 1 000 Hz, respetivamente [20]. No total, existem cerca de 17 000 mecanorreceptores nas superfícies de preensão (área da pele que não contém pelos), com a maior densidade localizada nas pontas dos dedos [70].

Tabela 3.3: Tipos de mecanorreceptores dos grupos de Adaptação Lenta (AL) e Adaptação Rápida (AR) e as suas características [20].

Grupo	Mecanorreceptor	Densidade na Ponta dos Dedos	Diâmetro de Percepção	Faixa de Frequência	Parâmetro de Detecção
AL	Células de Merkel (I)	750/cm ²	3-4 mm	0-30 Hz	Força normal e tangencial
	Terminais de Ruffini (II)	75/cm ²	>10 mm	0-15 Hz	Direção de alongamentos da pele
AR	Corpúsculos de Meissner (I)	1500/cm ²	3-4 mm	10-60 Hz	Alongamentos da pele
	Corpúsculos de Pacini (II)	75/cm ²	>20 mm	50-1000 Hz	Vibração

Na robótica, a percepção exteroceptiva física refere-se a sensores táteis distribuídos pela superfície do robô que adquirem informações sobre o contacto. Os sensores táteis utilizam diferentes mecanismos de transdução e podem ser utilizados para obter diferentes tipos de informações sobre o contacto, como por exemplo, a força normal e tangencial, perceber o tipo de superfície e a textura do objeto em contacto e medir acelerações e vibrações [71], com o objetivo de imitar a utilidade dos mecanorreceptores [72]. No entanto, ainda não existe uma tecnologia que consiga fornecer a mesma quantidade de informação que está disponível na ponta dos dedos do ser humano [73]. Quando se lida apenas com uma única tarefa de percepção tátil, é comum que os robôs consigam superar os humanos. Um exemplo é a sensibilidade utilizando sensores de F/B, em que existem maiores resoluções e uma maior sensibilidade que os recetores humanos. Outro exemplo é a distinção entre vários tipos de metais, como por exemplo, alumínio, latão e aço [74, 75], ou então a rápida deteção de escorregamento, ou iminência deste [76, 77].

3.5.2 Sensores Táteis

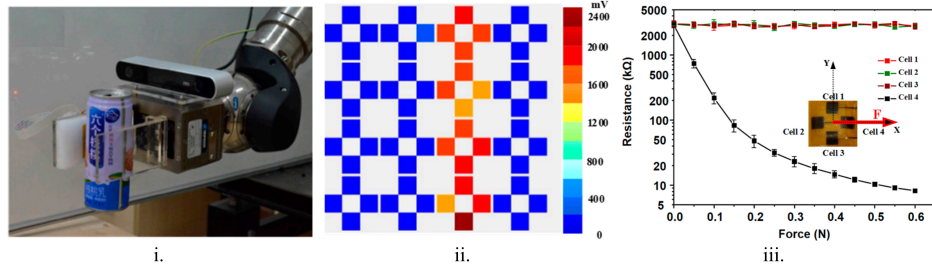
Os sensores táteis são geralmente constituídos por sensores de pressão e de deformação que utilizam diversos mecanismos de transdução para transformar estímulos mecânicos em sinais elétricos (tensão, corrente, resistência, capacitância, entre outros) e sinais óticos [78]. Várias abordagens concentram-se na classificação dos sensores táteis em diferentes categorias [79, 78, 80], conforme o tipo de transdutor utilizado. Desta forma, serão discutidos os seis transdutores que, de acordo com Wang *et al.* [78], são os mais comuns (2019) e promissores na percepção tátil de sistemas inteligentes: Piezoresistivo (Pr), Resistivo (Re), Capacitivo (Ca), Piezoelétrico (Pe), Triboelétrico (Te) e Visuo-Tátil (VT).

Piezoresistivo

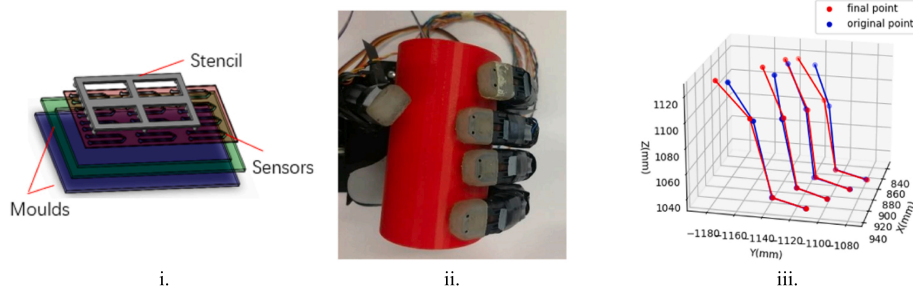
O princípio de funcionamento baseia-se na alteração da resistência elétrica de um material, como por exemplo o silício e o germânio, em resposta a uma deformação mecânica. A variação da resistência ($R = \frac{\rho L}{A}$) é dada pela variação da geometria (comprimento L e área de secção A) devido ao efeito de Poisson [81], e pela variação da resistividade do material ρ . Vários sensores táteis utilizam o efeito piezoresistivo em materiais elásticos que, quando sujeitos a forças externas, sofrem uma deformação, levando a uma alteração na densidade do material que se reflete na sua resistência elétrica. Estes sensores permitem detetar forças estáticas e dinâmicas e apresentam uma elevada resolução espacial.

Li *et al.* [82] utilizaram uma matriz de sensores piezoresistivos para estimar as forças de prensão, a posição de contacto e a estabilidade da prensão (Figura 3.13a). Yong *et al.* [83] utilizaram sensores piezoresistivos instalados numa mão robótica para

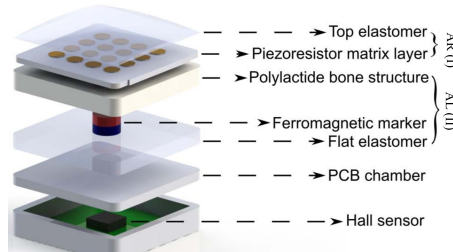
estimar a cinemática da mão e reconhecer a forma de objetos (Figura 3.13b). Lu *et al.* [84] desenvolveram o sensor GTac, inspirado nos mecanorreceptores, que combina sensores piezoresistivos e de efeito Hall, para estimar as forças de preensão (normal e tangencial) (Figura 3.13c).



(a) Preensão de uma lata através de uma garra instalada com uma matriz de sensores piezoresistivos (i.), tensão obtida em cada sensor da matriz tátil (ii.) e força tangencial num dos sensores (iii.) [82].



(b) Sensor piezoresistivo (i.) instalado numa mão robótica (ii.) de forma a obter a cinemática da mão (iii.) [83].



(c) Sensor piezoresistivo GTac inspirado nos mecanorreceptores AR I e AL II [84].

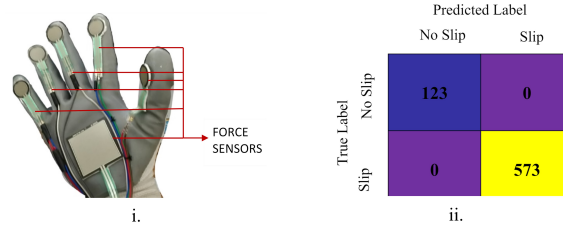
Figura 3.13: Utilização de sensores táteis piezoresistivos durante tarefas de manipulação de objetos.

Resistivo

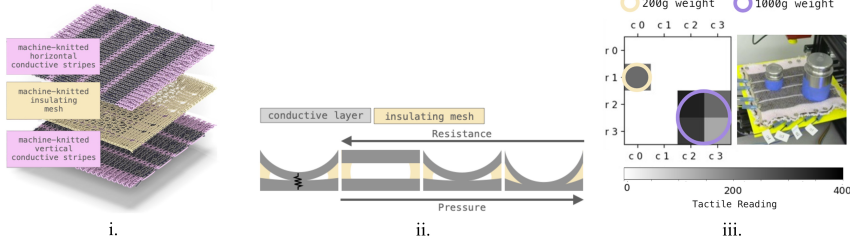
A interação física é quantificada através da variação na resistência de contacto entre dois condutores, como por exemplo numa microestrutura entrelaçada [85]. A resistência de contacto é proporcional à força aplicada ($R_c \propto F^{-\frac{1}{2}}$), permitindo uma alta sensibilidade a pequenas forças [86].

Phukan *et al.* [87] utilizaram seis sensores *Force Sensitive Resistor* (FSR) numa mão humana para estimar a força de preensão de um objeto, detetar presença de

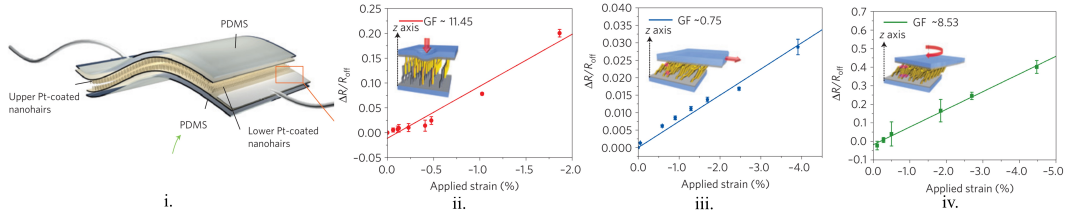
contacto em cada dedo e escorregamento total (Figura 3.14a). Si *et al.* [88] utilizaram dois tecidos condutores e um dielétrico para desenvolver um sensor flexível que permite detetar múltiplos contactos e estimar a força normal (Figura 3.14b). Pang *et al.* [89] desenvolveram um sensor para estimar as forças normal e tangencial e o binário normal exercidos sobre a sua superfície, permitindo detetar até batimentos cardíacos e o impacto de uma gota de água (Figura 3.14c).



(a) Sensores FSR instalados numa mão humana (i.) para detetar escorregamento total (ii.) [87].



(b) Sensor resistivo tipo tecido (i. e ii.) utilizado para detetar múltiplos contactos (iii.) [88].



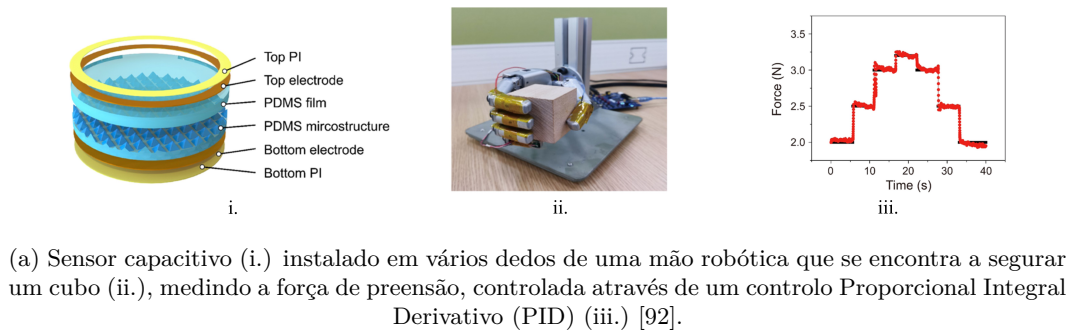
(c) Sensor resistivo (i.) utilizado para estimar força normal (ii.), tangencial (iii.) e binário normal (iv.) [89].

Figura 3.14: Utilização de sensores táteis resistivos durante tarefas de manipulação de objetos.

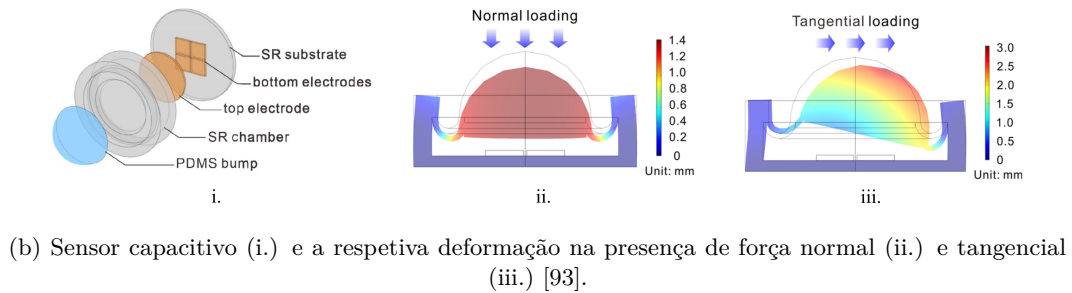
Capacitivo

Normalmente são instalados dois eléktodos entre um material dielétrico, permitindo converter iterações físicas em variações de capacitância ($Cd = A\epsilon_r\epsilon_0$). As variações da área da superfície A e da distância entre dois eléktodos d permitem medir as forças aplicadas sobre o sensor [90]. Sensores capacitivos de área variável oferecem uma alta sensibilidade, mas apresentam uma gama de medição limitada, tornando-os suscetíveis a danos quando sujeitos a forças elevadas. Sensores capacitivos de distância entre eléktodos variável permitem um equilíbrio entre a sensibilidade e a gama de medição, sendo atualmente a técnica mais utilizada na maioria dos sensores táteis na robótica em tarefas de preensão [91].

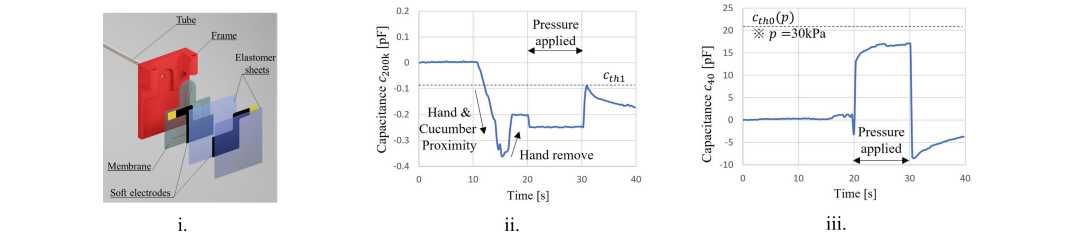
Ge *et al.* [92] desenvolveram um sensor capacitivo e incorporaram-no numa mão robótica (HIT-V) para detetar a proximidade de objetos e a força de preensão (Figura 3.15a). Yao *et al.* [93] desenvolveram um sensor capacitivo flexível para deteção de forças de preensão normal e tangencial, construído recorrendo a técnicas de manufatura aditiva (Figura 3.15b). Matsuno *et al.* [94] utilizaram corrente alternada de alta e baixa frequência para detetar a aproximação de objetos, determinar se o objeto agarrado tem alta ou baixa permeabilidade e para estimar a força aplicada no sensor durante a preensão do objeto (Figura 3.15c).



(a) Sensor capacitivo (i.) instalado em vários dedos de uma mão robótica que se encontra a segurar um cubo (ii.), medindo a força de preensão, controlada através de um controlo Proporcional Integral Derivativo (PID) (iii.) [92].



(b) Sensor capacitivo (i.) e a respetiva deformação na presença de força normal (ii.) e tangencial (iii.) [93].



(c) Sensor capacitivo (i.) e resposta do sensor para altas frequências (ii.) e baixas frequências (iii.) durante aproximação do objeto e preensão [94].

Figura 3.15: Utilização de sensores táteis capacitivos durante tarefas de manipulação de objetos.

Piezoelétrico

Nos transdutores piezoelétricos são utilizados materiais piezoelétricos, como cristais de quartzo, para gerar um potencial quando submetidos a uma força externa. Estes sensores permitem uma resposta rápida a sinais dinâmicos, podendo ser aplicados na medição de vibrações. No entanto, não são adequados para medir informações estáticas devido à sua elevada resistência interna [78].

Göger *et al.* [95] utilizaram um sensor piezoelétrico, composto pelo polímero Poli-fuoreto de Vinilideno (PVDF), para detetar pontos de contacto, classificar padrões de contacto e detetar escorregamento total (Figura 3.16a). Yi *et al.* [96] utilizaram o polímero PVDF para construir um sensor inspirado nos mecanorreceptores, para classificar a textura da superfície do objeto em contacto (Figura 3.16b). Gao *et al.* [97] construíram um sensor tátil piezoresistivo e piezoelétrico e utilizaram-no para reconhecer objetos durante a preensão através de uma mão robótica (Figura 3.16c).

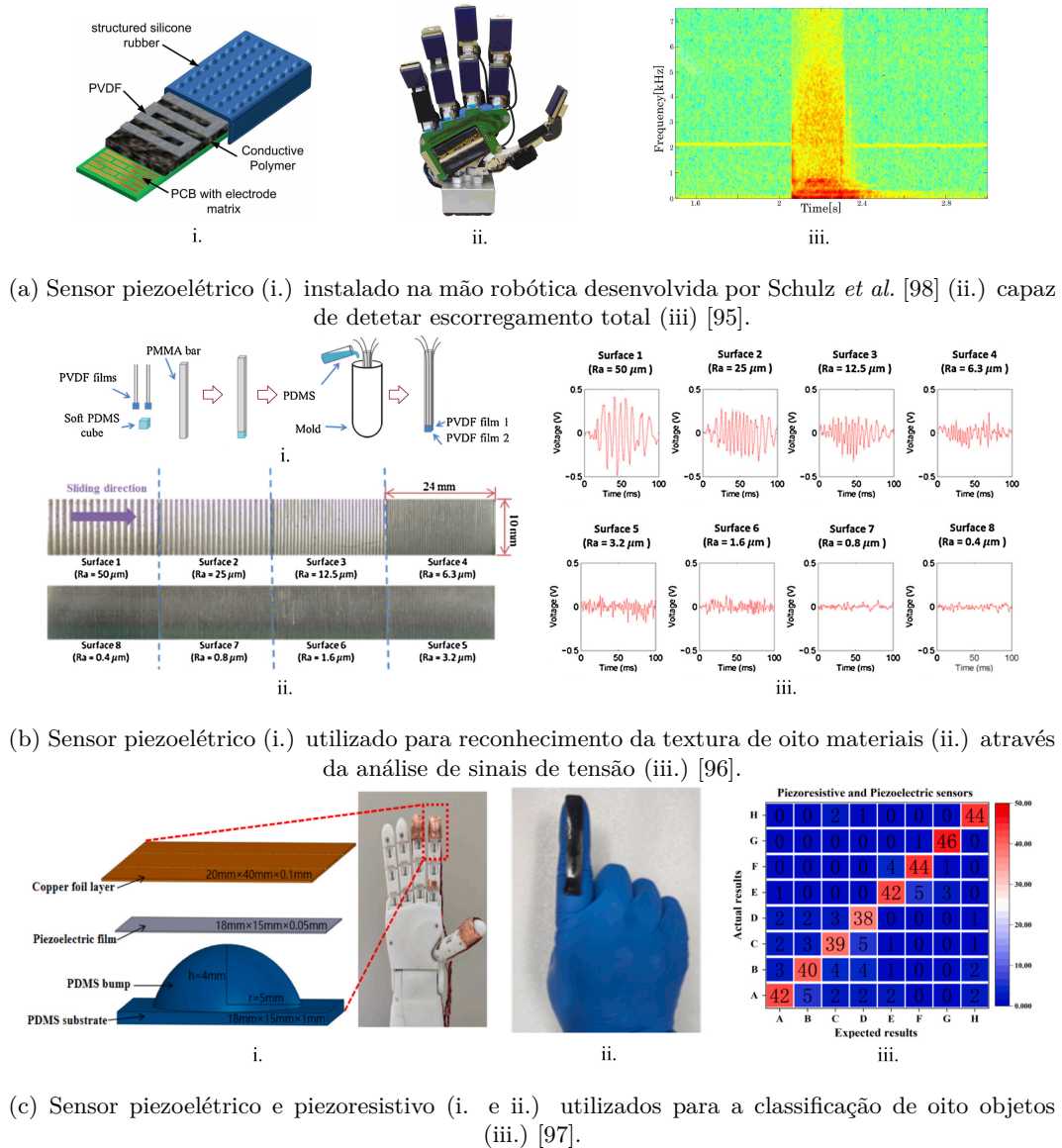
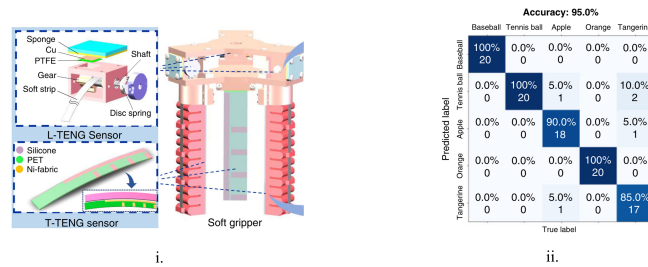


Figura 3.16: Utilização de sensores táteis piezoelétricos durante tarefas de manipulação de objetos.

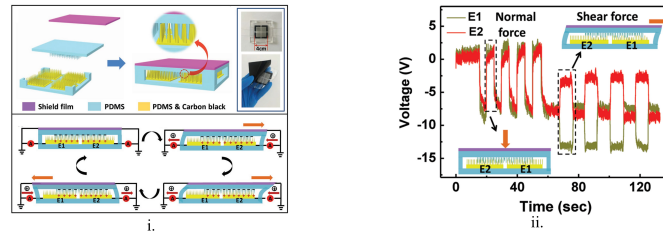
Triboelétrico

O transdutor triboelétrico permite gerar um potencial elétrico quando submetido a forças externas. A sua composição consiste na utilização de dois materiais com polaridades triboelétricas diferentes, gerando um potencial elétrico através do deslocamento de um dos materiais [99].

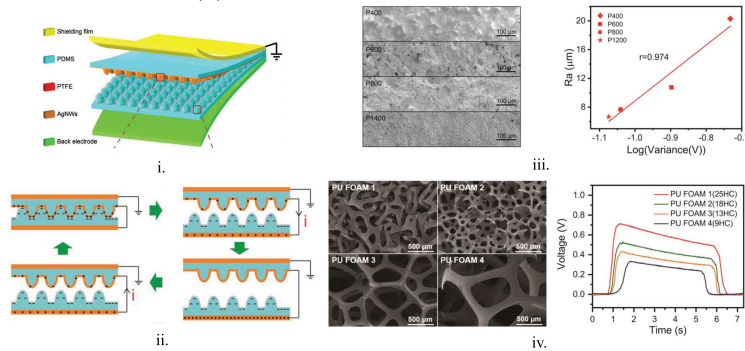
Jin *et al.* [100] desenvolveram uma garra flexível que utiliza dois sensores triboelétricos *Triboelectric Nanogenerator* (TENG) para estimar a posição de contacto, a deteção de contacto, o escorregamento total e a classificação de objetos (Figura 3.17a). Ren *et al.* [101] construíram um sensor piezoelétrico TENG para estimar as forças normal e tangencial aplicadas ao sensor (Figura 3.17b). Yao *et al.* [99] estimaram a textura e a dureza de quatro materiais diferentes através de um sensor triboelétrico TENG desenvolvido por eles (Figura 3.17c).



(a) Garra flexível que utiliza dois sensores TENG (i.) para a classificação de objetos (ii.) [100].



(b) Sensor triboelétrico TENG (i.) utilizado para estimar as forças normal e tangencial (ii.) [101].



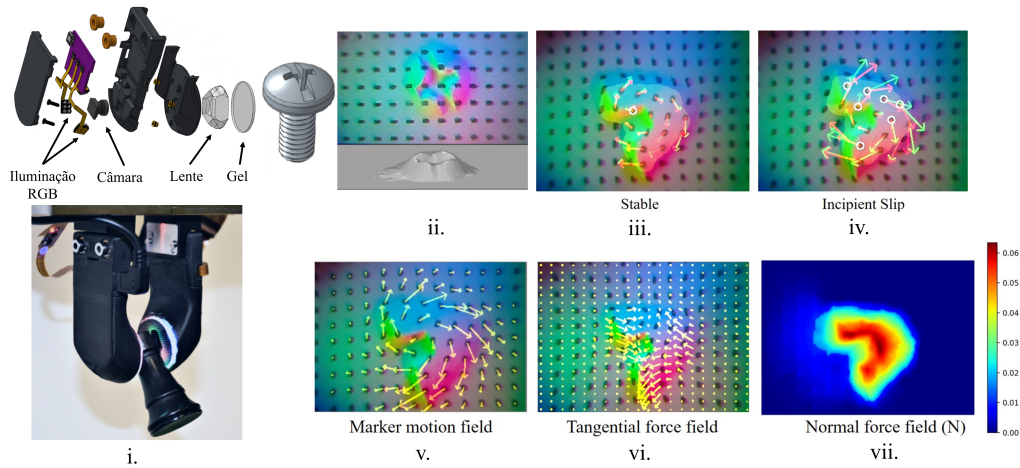
(c) Sensor triboelétrico TENG (i.) e princípio de funcionamento (ii.) utilizado para estimar a textura (iii.) e a dureza (iv.) de quatro materiais diferentes [99].

Figura 3.17: Utilização de sensores táteis triboelétricos durante tarefas de manipulação de objetos.

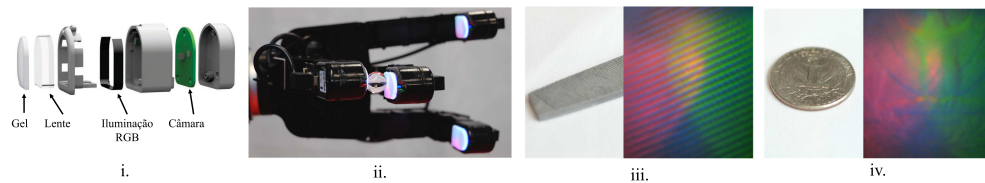
Visuo-tátil

Os sensores visuo-táteis baseiam-se no princípio da alteração das propriedades da luz, como a propagação, a reflexão, o comprimento de onda, a intensidade, entre outros, devido a, por exemplo, deformações de materiais do sensor devido à aplicação de forças externas. Estes sensores são normalmente compostos por um gel macio transparente coberto por uma película refletora, um sistema de iluminação *Red, Green and Blue* (RGB) e uma câmara que captura a deformação do gel iluminado com as cores RGB ao entrar em contacto com uma superfície. Os sensores visuo-táteis são imunes às interferências eletromagnéticas de baixa frequência e têm alta resolução espacial e ampla gama de resposta em frequência [78].

Taylor *et al.* [102] desenvolveram o sensor GelSlim 3.0 e utilizaram-no para reconstruir a superfície do objeto em contacto com o sensor, detetar uma prensão estável, escorregamento iminente, forças de prensão (normal e tangencial) e a direção do movimento do objeto (Figura 3.18a). Lambeta *et al.* [103] desenvolveram o sensor DIGIT com o objetivo de ser um sensor compacto, de alta resolução e de baixo custo, capaz de ser utilizado em mãos robóticas de vários dedos (Figura 3.18b).



(a) Sensor GelSlim3.0 (i.) utilizado para reconstrução da superfície de contacto do objeto (ii.), verificar a estabilidade da prensão (iii.), detetar escorregamento iminente (iv.), estimar a amplitude e a direção do deslocamento do objeto (v.), estimar a força tangencial (vi.) e a normal (vii.) [102].



(b) Sensor visuo-tátil compacto (DIGIT) (i.) que pode ser instalado numa mão robótica (ii.), capaz de capturar imagens de alta resolução da superfície dos objetos (iii. e iv.) [103].

Figura 3.18: Utilização de sensores visuo-táteis durante tarefas de manipulação de objetos.

Resumo das Vantagens e Desvantagens dos Métodos de Transdução Utilizados em Sensores Táteis

Na Tabela 3.4 é apresentado um resumo das vantagens e desvantagens dos vários métodos de transdução utilizados em sensores táteis: Piezoresistivo (Pr), Resistivo (Re), Capacitivo (Ca), Piezoelétrico (Pe), Triboelétrico (Te) e Visuo-Tátil (VT).

Tabela 3.4: Vantagens e desvantagens das várias tecnologias de sensores táteis: Piezoresistivo (Pr), Resistivo (Re), Capacitivo (Ca), Piezoelétrico (Pe), Triboelétrico (Te) e Visuo-tátil (VT).

	Vantagens	Desvantagens
Pr	- Elevada resolução espacial [80, 104]. - Circuito eletrônico simples [78]. - Baixa suscetibilidade ao ruído [78].	- Histerese [80, 78, 104]. - Elevado consumo de energia [80, 104].
Re	- Elevada sensibilidade para baixas cargas [80, 78]. - Boa resposta dinâmica [80, 78].	- Sensível à temperatura [80, 78]. - Histerese [80, 78]. - Deriva [80, 78].
Ca	- Excelente resposta em frequência [78]. - Excelente sensibilidade [80, 104]. - Elevada resolução espacial [80, 78, 104]. - Elevada gama dinâmica [80, 78, 104].	- Capacitância parasita [80, 78, 104]. - Suscetível a ruído [80, 78, 104]. - Circuitos eletrônicos complexos [80, 78, 104].
Pe	- Excelente resposta para altas frequências [80, 78, 104]. - Elevada sensibilidade [80, 104]. - Elevada gama dinâmica [80, 104].	- Baixa resolução espacial [80, 104]. - Apenas permite detecções dinâmicas [80, 78, 104]. - Sensível à temperatura [78].
Te	- Construção e fabrico simples [105, 99]. - Elevada linearidade [99]. - Elevada sensibilidade [99].	- Utilização de vários tipos de matérias primas [106]. - Baixa durabilidade [106]. - Sensível ao ambiente (humidade, entre outros) [106].
VT	- Boa sensibilidade [80, 104]. - Elevada resolução espacial [80]. - Elevada resposta em frequência [78]. - Imune a interferências eletromagnéticas [80, 78, 104].	- Tamanho volumoso [80, 78, 104]. - Elevado consumo de energia [78]. - Reduzida durabilidade do gel [107].

Sensores Táteis Disponíveis comercialmente

Existem várias tecnologias de sensores táteis utilizadas em percepção tátil disponíveis comercialmente, nomeadamente: DIGIT [107], GelSight [107], GelSight Mini [107], Tacterion [108], FTS [109], uSkin [110], PapillArray [111] e ATI Nano 17 [55].

3.5.3 Informações sobre o Contacto e o Objeto Obtidas através de Sensores Táteis

Na Tabela 3.5 estão apresentados estudos que utilizam diferentes métodos de transdução em sensores táteis para obtenção de informações sobre o contacto, pose do objeto e classificação de objetos.

Tabela 3.5: Informações sobre o contacto: Geometria de Contacto (GC), Forças e Binário de Contacto (FBC), Eventos de Contacto (EC) e Propriedades da Superfície do Objeto (PSO), e informações sobre o objeto, obtidas através de várias tecnologias de sensores táteis: Piezoresistivo (Pr), Resistivo (Re), Capacitivo (Ca), Piezoelétrico (Pe), Triboelétrico (Te) e Visuo-Tátil (VT).

Info. de Contacto		Sensor Tátil					
		Pr	Re	Ca	Pe	Te	VT
GC	Posição de Contacto	✓ [82]	✓ [88]	✗	✓ [95]	✓ [100]	✓ [112]
	Normal	✗	✗	✗	✓ [95]	✗	✓ [112]
	Curvatura	✗	✗	✗	✓ [97]	✗	✓ [112]
FBC	Força Normal	✓ [84]	✓ [88]	✓ [113]	✗	✓ [101]	✓ [114]
	Força Tangencial	✓ [84]	✓ [89]	✓ [113]	✗	✓ [101]	✓ [114]
	Binário Normal	✗	✓ [89]	✓ [113]	✗	✗	✓ [114]
EC	Deteção de Contacto	✓ [82]	✓ [88]	✓ [92]	✓ [95]	✓ [100]	✓ [115]
	Escorreg. Iminente	✗	✗	✗	✗	✗	✓ [116]
	Escorreg. Total	✗	✓ [87]	✓ [117]	✓ [95]	✓ [100]	✓ [118]
PSO	Dureza	✗	✗	✓ [119]	✗	✓ [99]	✓ [120]
	Textura	✗	✗	✗	✓ [96]	✓ [99]	✓ [121]
	Coef. de Atrito Est.	✓ [122]	✗	✗	✗	✗	✓ [123]
Posição do Objeto		✗	✗	✗	✗	✗	✓ [124]
Orientação do Objeto		✗	✗	✗	✗	✗	✓ [124]
Classificação de Objetos		✓ [97]	✗	✓ [94]	✓ [97]	✓ [100]	✗

✓ A informação pode ser obtida utilizando o sensor tátil referenciado.

✗ Informação não encontrada, com o melhor conhecimento do autor.

3.5.4 Abordagens para a Deteção de Informações sobre o Contacto e o Objeto através de Sensores Táteis

Na Tabela 3.6 são apresentadas abordagens em que são utilizados sensores táteis para obter informações sobre o contacto e o objeto durante a apreensão e manipulação de objetos. A tabela inclui informações sobre a precisão, a condição de teste, o sensor utilizado, o método: analítico, de Inteligência Artificial (IA) ou de otimização, e a existência de controlo durante a apreensão e manipulação de objetos.

Tabela 3.6: Abordagens para obtenção de informações sobre o contacto e o objeto utilizando sensores táteis. Na condição de teste, número (R) ou número (F) significa quantidade de objetos rígidos ou flexíveis a teste, respetivamente.

Artigo	Ano	Informação	Precisão	Condição de Teste	Sensor	Métodos		Controlo
						Tipo	Referência	
Liu <i>et al.</i> [124]	2024	Escorreg. iminente Posição objeto Orientação objeto	- 11,1 mm 8,1 ° / - 1,9 mm 2,6 °	5 (R) utilizando CAPTRA/ BundleTrack (dados de teste, real)	GelSight [114] RealSense D415 [125]	Otim. IA	Escorreg. iminente: GelSlim3.0 [102] Info. tátil: GelSight [114] ResNet [126] Pose: CAPTRA [127] BundleTrack [128]	✗
Yuan <i>et al.</i> [114]	2017	Força normal Força tangencial Binário normal	$R^2 = 0,92$ $R^2 = 0,92$ $R^2 = 0,61$	3 (R)	GelSight	IA	Convolution Neural Networks (CNN)	✗
Dong <i>et al.</i> [116]	2019	Escorreg. iminente	86,25 %	10 (R+F) 240 testes	GelSlim [129]	Analít.	-	✗
Johnson <i>et al.</i> [112]	2011	Geometria da superfície de contacto	Resolução espacial de 2 μm	-	GelSight	Analít.	Photometric <i>Stereo</i> [130, 131] Lambertian reflectance [132, 133]	✗

Wang <i>et al.</i> [134]	2021	Força normal Escorreg. total Posição objeto Orientação objeto	- - - -	1 (R)	Sensor F/B	Analít.	-	Força de preensão (PID)
Wang <i>et al.</i> Kirchner [135]	2023	Escorreg. total	89,38 % (DoraHand) 78,8 % (Vácuo)	1 (F) 4 testes	Sensores de força da DoraHand [136] Sensores de vácuo	IA	STFT [137] LSTM, Softmax	Força de preensão (increm. valor fixo)
Gentile <i>et al.</i> [138]	2020	Deteção contacto Escorreg. total Força normal	- 99,4 % -	3 (R) 120 testes	FSR 400 [139]	Analít.	Derivada numérica [140] Limiar ROC [141]	Força de preensão [142]

Considerando: Escorregamento (Escorreg.), *Category-level Pose Tracking for Rigid and Articulated Objects from Point Clouds* (CAPTRA), Otimizado (Otim.), Inteligência Artificial (IA), Informação (Info.), *Receiver Operating Characteristic* (ROC), Analítico (Analít.), Proporcional Integral Derivativo (PID), *Short-Time Fourier Transform* (STFT), *Long Short-Term Memory* (LSTM) e Incrementos (Increm.).

✗ Controlo não implementado.

Descrição de Abordagens para Obtenção de Informações sobre o Contacto e o Objeto através de Sensores Visuo-Táteis

Atualmente, a comunidade científica tem-se concentrado na investigação dos sensores Visuo-Tátil (VT), uma vez que permitem adquirir uma grande variedade de informações sobre o contacto através da utilização de IA. Assim, apresentam-se em detalhe alguns estudos que utilizam sensores VT.

A aplicação de algoritmos avançados tem permitido aos investigadores extrair valiosas informações de percepção tátil a partir dos sensores VT. Johnson e Adelson [143] desenvolveram uma abordagem que utiliza um algoritmo adaptado de estereoscopia fotométrica para obter a textura e a forma da superfície do objeto em contacto com o sensor (Figura 3.19.a). Posteriormente, Johnson *et al.* [112] melhoraram a abordagem proposta por Johnson e Adelson, obtendo a textura e a forma da superfície do objeto com uma resolução espacial superior (Figura 3.19.b).

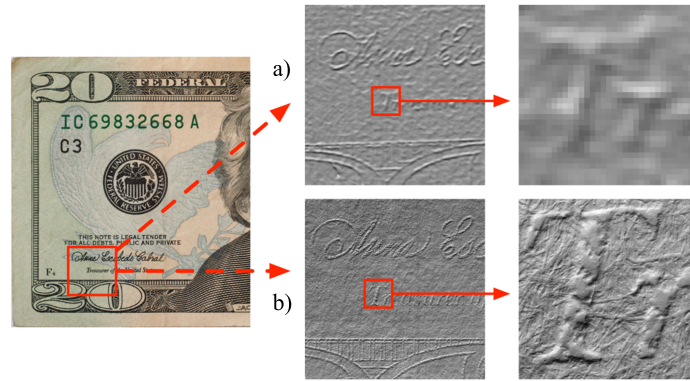


Figura 3.19: Reconstrução da superfície de um objeto utilizando um sensor visuo-tátil: a) abordagem seguida por Johnson e Adelson [143] e b) abordagem seguida por Johnson *et al.* [112]. Figura adaptada de Johnson *et al.* [112].

Dong *et al.* [116] propuseram uma abordagem para a deteção de escorregamento iminente de objetos maioritariamente rígidos, analisando os pontos pretos presentes na superfície do gel do sensor GelSlim [129]. A abordagem baseia-se no princípio de que, quando uma região de um objeto toca na superfície do gel e exerce uma força tangencial, a superfície do gel é alongada na direção da força. Esse alongamento é calculado através do deslocamento dos pontos na superfície do gel. À medida que a força aumenta, o gel continua a alongar-se na direção da força até que a força de atrito não seja suficiente para manter o contacto. Quando ocorre escorregamento iminente, as regiões na periferia da zona de contacto escorregam primeiro, o que significa que o deslocamento dos pontos nessa região terá uma magnitude inferior à prevista. Na Figura 3.20 é possível observar dois tipos de escorregamento iminente (linear e angular) detetados segundo a abordagem de Dong *et al.*. Os pontos azuis

na Figura 3.20 indicam onde ocorreu escorregamento, e a metodologia exige um mínimo de quatro pontos azuis para considerar que houve escorregamento iminente.

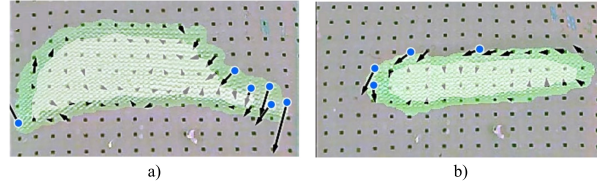


Figura 3.20: Detecção de escorregamento iminente: a) angular e b) linear. A região verde representa a área da superfície do objeto em contacto com o gel. A região verde escuro destaca a periferia dessa área. As setas pretas indicam os vetores de escorregamento e os pontos azuis mostram onde ocorreu escorregamento [116].

Yuan *et al.* [114] utilizaram *Convolution Neural Networks* (CNN) e *Fully-Connected Layers* (FCL) para estimar as forças (normal e tangencial) e o binário normal aplicados à superfície do gel, afirmando que a relação entre as forças e o binário de contacto e a deformação do gel macio não é linear quando a geometria do contacto é desconhecida. Para o treino do modelo, utilizaram o sensor de F/B de 6 DoF (ATI Nano 17 [55]) e os dados das imagens da deformação do gel em contacto com a superfície de seis bolas de diferentes diâmetros, cinco cilindros e dois objetos rígidos com diferentes texturas. Na Figura 3.21 é possível observar os resultados obtidos para dados de teste (dados que a rede nunca viu), ou seja, para objetos desconhecidos.

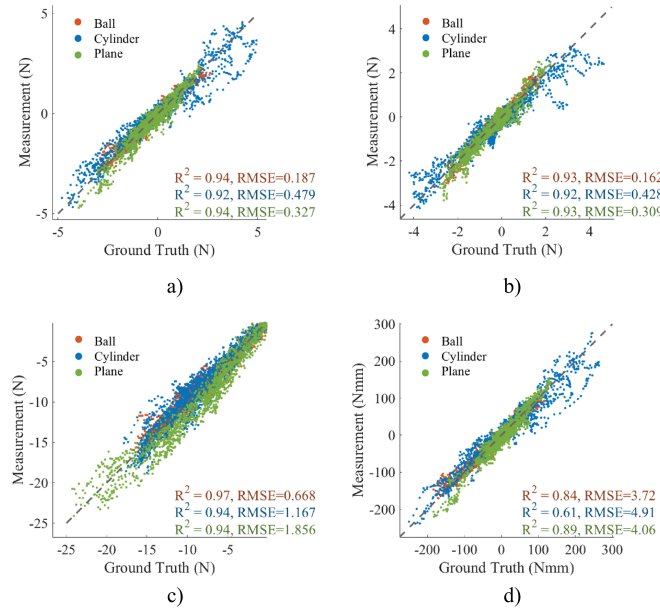


Figura 3.21: Resultados obtidos do modelo de IA desenvolvido por Yuan *et al.* [114] para calcular as forças e binário de contacto utilizando sensor visuo-tátil: a) força tangencial, b) força tangencial, c) força normal e d) binário normal. Figura adaptada de Yuan *et al.* [114].

Liu *et al.* [124] desenvolveram o método TEG-Track para melhorar a estimativa da pose de um objeto manipulado, utilizando sensores visuo-táteis (Figura 3.22). A pose do objeto manipulado é estimada utilizando imagens RGB-D capturadas utilizando sensores externos ao robô através de um localizador de pose 6D generalizável (*Category-level Pose Tracking for Rigid and Articulated Objects from Point Clouds* (CAPTRA) [127] ou *BundleTrack* [128]) e melhorada através dos estados cinemáticos do objeto, obtidos através da estimativa das três componentes de velocidades linear, angular e de um ponto pivô devido ao movimento do objeto, utilizando dois sensores VT desenvolvidos por Liu *et al.*. As velocidades do objeto são estimadas através de um método de otimização, analisando o deslocamento dos pontos pretos na superfície do gel do sensor [114], ou através da utilização de uma *Artificial Neural Network* (ANN) composta por uma estrutura ResNet [126] e FCL. A escolha do método de otimização ou de IA depende da presença de escorregamento iminente entre o objeto e a superfície do gel. Caso não exista escorregamento é utilizado o método de otimização, uma vez que não existe deslocamento entre os pontos pretos da superfície do gel e a superfície do objeto. Caso exista escorregamento, a informação obtida pelos pontos pretos na superfície do gel torna-se pouco fiável, e é utilizada a abordagem de IA para estimar diretamente os estados cinemáticos do objeto a partir de imagens brutas consecutivas dos sensores visuo-táteis. Por fim, é realizada a estimativa final da pose do objeto manipulado agrupando a informação através de um método de otimização.

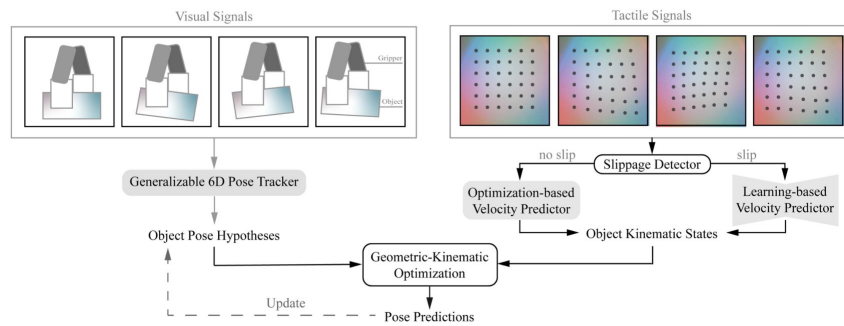


Figura 3.22: Método TEG-Track desenvolvido por Liu *et al.* [124].

Os resultados obtidos pela abordagem seguida por Liu *et al.* [124] estão apresentados na Figura 3.23. A pose real do objeto manipulado pode ser observada através da *3D bounding box* com a cor verde, enquanto a pose estimada pode ser observada através da *3D bounding box* com a cor vermelha. Na Figura 3.23 é possível observar que o método TEG-Track apresentou melhores resultados na estimativa da pose do objeto manipulado em comparação à utilização de apenas o localizador de pose 6D generalizável CAPTRA [127].

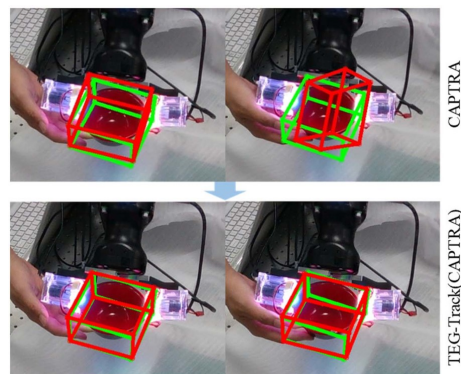


Figura 3.23: Estimativa da pose de um objeto manipulado através de uma garra paralela de dois dedos utilizando apenas o localizador de pose 6D generalizável CAPTRA [127] e o método TEG-Track [124].

Figura adaptada de Liu *et al.* [124].

Os sensores VT também têm sido utilizados para outras aplicações, como para o reconhecimento de texturas [121], estimativa da dureza de materiais [120], estimar a distribuição do coeficiente de atrito na região de contacto [123] e para tarefas de precisão [144]. Apesar da ampla aplicabilidade dos sensores, em tarefas repetitivas ou na manipulação de objetos de grande massa, a durabilidade do gel deve ser levada em consideração. Por exemplo, na versão comercial do sensor GelSight [107], o gel apenas permite analisar cerca de 1 000 superfícies de moedas antes de começar a apresentar sinais de desgaste. Apesar do gel ser substituível, a constante substituição do gel, como por exemplo em situações industriais, pode ser impraticável.

Capítulo 4

Metodologia

Neste capítulo apresenta-se a metodologia para obter informações sobre o contacto e o objeto em tarefas de manipulação através de percepção sensorial proprioceptiva, especificamente um sensor de Força e Binário (F/B) de 6 *Degrees of Freedom* (DoF) instalado no punho de um manipulador robótico.

Este capítulo está organizado da seguinte forma: inicialmente, apresenta-se a motivação para a escolha da tecnologia de percepção proprioceptiva e a abordagem proposta para adquirir as informações sobre o contacto e o objeto. Em seguida, apresentam-se as várias componentes de força e binário exercidas no sensor durante tarefas de manipulação. Posteriormente, descreve-se o método de calibração que permite estimar as componentes de força e binário da ferramenta devidas à gravidade e, em seguida, o método de compensação, que permite isolar as componentes associadas ao objeto. Por fim, apresentam-se abordagens para a obtenção de informações sobre o contacto e o objeto, através da análise das componentes de força e de binário do objeto devidas à gravidade e uma conclusão sucinta da metodologia.

4.1 Motivação

Atualmente, a comunidade científica concentra-se na utilização de sensores táteis durante a manipulação e preensão de objetos, uma vez que permitem adquirir uma vasta gama de informações sobre o contacto e o objeto, conforme apresentado na Secção 3.5. Os sensores táteis usados em garras com dedos situam-se entre o objeto e

o dedo da ferramenta, estando sujeitos às forças normais aplicadas para segurar o objeto e ao contacto físico resultante das interações com este. Assim, em manipulações que exijam uma força de preensão elevada ou em tarefas de grande repetibilidade, o sensor pode sofrer desgaste prematuro. Em tarefas que utilizam outros tipos de ferramentas além das garras com dedos, como garras a vácuo ou eletromagnéticas, a incorporação de sensores táteis torna-se um desafio. Normalmente, recorre-se a outro tipo de abordagens, como sensores de pressão para a monitorização da pressão de vácuo [145] ou sensores de corrente para monitorização da corrente do eletroímã [146].

A utilização de percepção sensorial proprioceptiva, designadamente sensores de F/B de 6 DoF no punho do robô, permite a obtenção de informações sobre o contacto e o objeto, sem que o sensor esteja sujeito à força normal de preensão do objeto e ao contacto físico com o mesmo. Isto aumenta a durabilidade da solução, principalmente na manipulação de objetos desconhecidos. Outro aspeto importante é que a sua utilização não está limitada apenas a um tipo de ferramenta de manipulação, podendo ser utilizadas vários tipos de ferramentas, tais como: garras com dedos, garras a vácuo, eletromagnéticas e outras.

A utilização de sensores de F/B de 6 DoF no punho do robô é predominante em tarefas que envolvem o contacto entre a ferramenta instalada no sensor e o ambiente. Exemplos dessas tarefas incluem o controlo de força em tarefas de polimento [32] e a inserção de componentes em cavidades com tolerâncias reduzidas [31], como referenciado na Subsecção 3.4.1. Normalmente, nessas tarefas utilizam-se métodos para compensar as componentes de F/B devidas à ferramenta, restando apenas as componentes resultantes das interações com o ambiente.

O objetivo deste trabalho consiste em utilizar um desses métodos, geralmente aplicados em tarefas de contacto, para tarefas que envolvem a manipulação de objetos. São apresentadas metodologias que, até onde se tem conhecimento, representam soluções inovadoras para adquirir informações sobre o contacto e o objeto, com base nas componentes de F/B obtidas após a aplicação do método. Essas informações podem ser usadas para permitir uma manipulação mais segura e precisa, sendo que este trabalho se concentra na aquisição dessas informações, que poderão ser aplicadas em futuras melhorias no controlo de manipulação.

4.2 Abordagem Proposta

A abordagem requer a utilização de um manipulador robótico com um sensor de F/B de 6 DoF instalado no punho do robô e com uma ferramenta fixa ao sensor para a manipulação do objeto. Na Figura 4.1 observa-se um exemplo de uma configuração possível de ser utilizada.

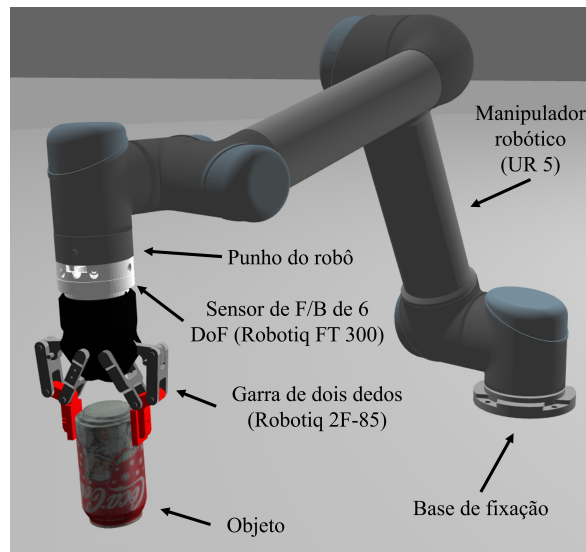


Figura 4.1: Simulação no Gazebo [147] de uma tarefa de manipulação de um objeto utilizando o manipulador robótico *Universal Robots* (UR) 5 [148], equipado com o sensor de F/B de 6 DoF FT-300 [149] e com a garra 2F-85 [150], ambos da Robotiq.

4.2.1 Informações Extraídas através da Abordagem

A abordagem consiste em obter informações sobre o contacto e o objeto através da análise da estimativa das três componentes de força (f_x, f_y, f_z) e binário (τ_x, τ_y, τ_z) do objeto devidas à gravidade exercidas no sensor durante a tarefa de manipulação. As informações incluem:

- **informações sobre o contacto:**
 - detecção da presença ou ausência do objeto;
 - detecção de escorregamento total para objetos que sejam corpos rígidos;
 - representação das componentes estimadas de força e binário do objeto devidas à gravidade noutra referência para além da referência do sensor;
- **informações sobre o objeto:**
 - estimativa da massa e da posição do centro de massa do objeto;
 - classificação de objetos para um conjunto de objetos com diferentes massas, previamente conhecidas;
 - estimativa da posição de objetos que sejam corpos rígidos e, quando manipulados por uma ferramenta que limita os seus movimentos a um plano, estimar a pose unidimensional.

As informações podem ser utilizadas para alterar comportamentos do robô e da ferramenta, como, por exemplo, modificar ou interromper a trajetória do robô ou

ajustar a força de preensão do objeto, permitindo uma maior segurança e precisão durante a tarefa de manipulação. Além disso, essas informações podem ser combinadas com outros tipos de percepção sensorial, como a visão ou sensores táteis, para aumentar a precisão, eliminar ambiguidades e melhorar a robustez do sistema. Este trabalho não explora a aplicação das informações, concentrando-se apenas na sua obtenção.

4.2.2 Etapas da Abordagem

Durante a tarefa de manipulação exercem-se componentes de força e de binário no sensor resultantes da gravidade, da dinâmica da ferramenta e do objeto e das interações destes com o ambiente. Estas componentes podem apresentar variações devido a desvios mecânicos do sensor e a ruídos e interferências no sinal. As componentes relacionadas à gravidade dependem da orientação do sensor em relação à referência da gravidade. Todos estes aspetos são abordados em maior detalhe na Secção 4.3. A abordagem para a obtenção das informações através das componentes do objeto devidas à gravidade é dividida em três etapas:

1. **calibração:** após a instalação do robô, do sensor e da ferramenta, utiliza-se o método de calibração proposto por Yu *et al.* [151] para estimar a força gravítica e a posição do centro de massa da ferramenta, os desvios mecânicos do sensor e os desvios angulares de instalação do robô e do sensor;
2. **compensação:** durante a tarefa de manipulação do objeto, compensam-se as componentes de força e binário da ferramenta devidas à gravidade e os desvios mecânicos do sensor através do método proposto por Yu *et al.* [151];
3. **análise:** utilizam-se métodos analíticos e de otimização para obter as informações sobre o contacto e o objeto, descritas na Subsecção 4.2.1, a partir das componentes de força e binário do objeto devidas à gravidade. Até onde se tem conhecimento, as abordagens representam soluções inovadoras para adquirir informações detalhadas sobre o contacto e o objeto.

4.2.3 Limitações da Abordagem

A abordagem apresenta as seguintes limitações:

- não é considerada a dinâmica devida às acelerações e velocidades da ferramenta e do objeto, estando a tarefa de manipulação limitada a acelerações e velocidades reduzidas da ferramenta e do objeto;
- não são considerados os movimentos das partes móveis da ferramenta;
- não são consideradas as colisões da ferramenta e do objeto com o ambiente;

- a quantidade de informações de contacto entre a ferramenta e o objeto, bem como sobre o próprio objeto, é limitada para objetos que não sejam corpos rígidos.

4.2.4 Vantagens da Abordagem

A escolha pela utilização da percepção sensorial proprioceptiva, especificamente do sensor de F/B de 6 DoF no punho do robô, deve-se essencialmente aos seguintes pontos:

- **robustez:**
 - o sensor não está sujeito à força normal de preensão nem ao contacto físico com o objeto, o que permite a manipulação de objetos desconhecidos sem risco de danos causados por essa força e evita o desgaste do sensor devido a interações com objetos, aumentando a durabilidade da solução;
 - o sensor não precisa de ser tão compacto quanto os sensores táteis, o que lhe confere maior robustez;
- **versatilidade:**
 - a solução pode ser utilizada em diversos tipos de manipuladores robóticos e ferramentas de manipulação;
 - podem existir desvios angulares desconhecidos entre a base de fixação do robô e a referência da gravidade, bem como entre o sensor e o punho do robô;
 - a solução não está limitada a uma única configuração do volume de trabalho do robô, podendo ser aplicada em volumes de trabalho confinados.

4.3 Componentes de Força e Binário Medidas pelo Sensor de 6 DoF Instalado no Punho do Robô

Nesta secção apresentam-se as referências utilizadas na abordagem, tais como a referência da gravidade, da base de fixação do robô, do punho e do sensor. São discutidas as componentes de força e binário medidas através do sensor durante tarefas de manipulação, incluindo componentes internas, externas e desvios. Por fim, explica-se como isolar as componentes do objeto devidas à gravidade, que serão utilizadas para obter informações de contacto e sobre o objeto.

4.3.1 Referências e Desvios Angulares

Na Figura 4.2 é apresentado um esboço bidimensional de um manipulador robótico fixo ao chão, equipado com um sensor de F/B de 6 DoF no punho. O esboço ilustra

o manipulador robótico a agarrar um objeto utilizando uma garra paralela de dois dedos.

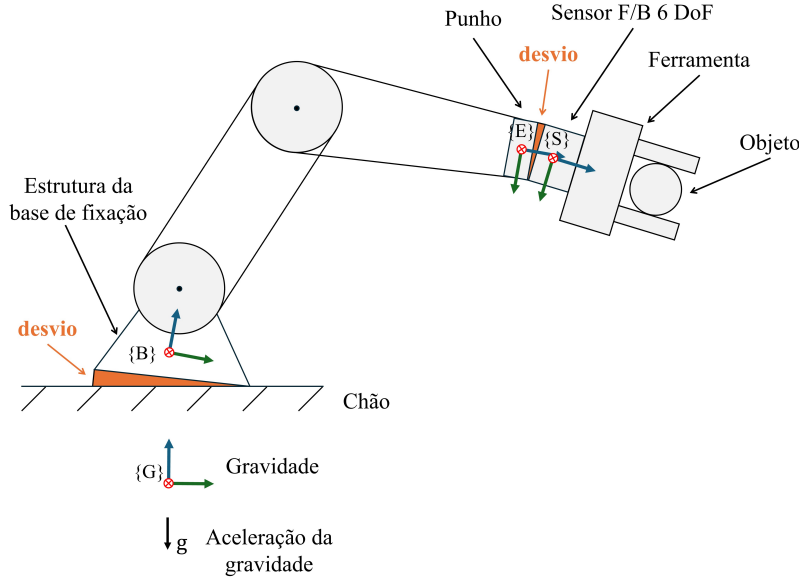


Figura 4.2: Manipulador robótico equipado com uma garra paralela de dois dedos. São apresentados os desvios entre a base de fixação e a referência da gravidade e entre o punho do robô e o sensor de F/B.

Em aplicações reais, como na indústria, a estrutura base do manipulador robótico nem sempre está alinhada perpendicularmente à direção da aceleração da gravidade $\mathbf{g}$, devido, por exemplo, à configuração de instalação do robô ou ao erro de instalação mecânica, podendo comprometer a precisão do método de compensação se o desvio angular não for considerado. Dado o exposto, torna-se necessário estimar a matriz de rotação que descreve a orientação da referência da gravidade $\{G\}$ em relação à referência da base de fixação do robô $\{B\}$ ${}^B\mathbf{R}_G$. O mesmo se aplica ao sensor e ao punho do robô. Embora não seja habitual haver desvios propositados, podem existir desvios angulares devidos ao processo de aperto mecânico [151]. Esses desvios também devem ser estimados, através da matriz de rotação que descreve a orientação da referência do punho do robô $\{E\}$ em relação à referência do sensor $\{S\}$ ${}^S\mathbf{R}_E$. A matriz de rotação que descreve a orientação da referência da base de fixação do robô em relação à do punho do robô ${}^E\mathbf{R}_B$ considera-se calibrada, uma vez que é calculada através das posições angulares de cada junta do robô.

4.3.2 Componentes Totais

A força e o binário medidos pelo sensor de F/B de 6 DoF instalado no punho do robô, referenciados por componentes totais ou *wrench vector* ${}^S\mathbf{w}$, são obtidos multiplicando uma matriz de calibração específica do sensor $\mathbf{A}$ pelos valores brutos de saída do sensor $\mathbf{d}$, de acordo com a Equação 4.1. A matriz de calibração contém

coeficientes que são utilizados para converter os sinais brutos do sensor em valores de força e binário. Esta matriz é obtida submetendo o sensor a forças e binários conhecidos, registrando os sinais brutos correspondentes e calculando os coeficientes que representam a relação entre os dois, podendo levar em consideração os efeitos de acoplamento a uma determinada temperatura [152].

$${}^S\mathbf{w} = \mathbf{A}\mathbf{d} \mid {}^S\mathbf{w} = [f_x \ f_y \ f_z \ \tau_x \ \tau_y \ \tau_z]^T \in \mathbb{R}^6 \quad (4.1)$$

em que $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ e $\mathbf{d} \in \mathbb{R}^6$.

As componentes totais medidas pelo sensor podem ser separadas em três tipos: internas, externas e desvios (Figura 4.3). As componentes internas são as forças e os binários devidas à carga acoplada ao sensor, sem que haja contacto com o ambiente e dividem-se em gravíticas e dinâmicas. As componentes gravíticas incluem a força e o binário resultantes da aceleração da gravidade sobre a carga. As componentes dinâmicas incluem a força inercial, a força de Coriolis, a força centrífuga e os binários associados, resultantes das acelerações e velocidades dos movimentos lineares e angulares da carga. As componentes externas resultam das interações da carga com o ambiente, como durante uma colisão. As componentes dos desvios referem-se ao desvio mecânico do sensor, que pode ser causado por imperfeições na geometria do sensor ou diferenças na sensibilidade dos elementos sensores que afeta todas as medições de forma consistente, como, por exemplo, uma variação na rigidez estrutural do sensor [151]. Para além das componentes anteriores, existem outras que podem estar presentes nas medições, associadas a ruídos e interferências. Nesse caso, o sinal pode ser filtrado para atenuar essas perturbações, através de, por exemplo, filtros digitais *Infinite Impulse Response* (IIR) e *Finite Impulse Response* (FIR) [153].

Considerando o sinal filtrado, as componentes totais de força e binário medidas pelo sensor ${}^S\mathbf{w}$ são obtidas pela soma das componentes internas ${}^S\mathbf{w}_{\text{int}}$, externas ${}^S\mathbf{w}_{\text{ext}}$ e dos desvios do sensor ${}^S\mathbf{w}_{\text{dsv}}$, conforme a Equação 4.2 [152].

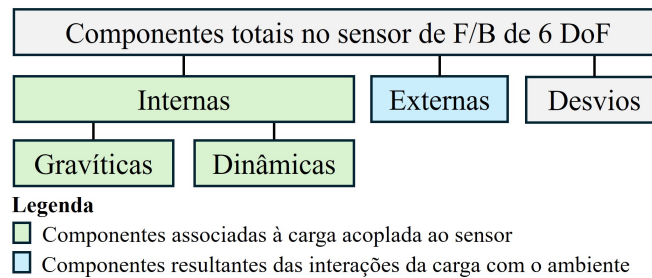


Figura 4.3: As componentes medidas por um sensor de F/B de 6 DoF instalado no punho do robô.

$${}^S\mathbf{w} = {}^S\mathbf{w}_{\text{int}} + {}^S\mathbf{w}_{\text{ext}} + {}^S\mathbf{w}_{\text{dsv}} \quad (4.2)$$

em que ${}^S\mathbf{w}_{\text{int}}, {}^S\mathbf{w}_{\text{ext}}, {}^S\mathbf{w}_{\text{dsv}} \in \mathbb{R}^6$.

4.3.3 Componentes Internas e Externas

Em tarefas que envolvem a manipulação de objetos através de uma ferramenta instalada no sensor, as componentes internas ${}^S\mathbf{w}_{\text{int}}$ podem ser separadas nas componentes devidas à ferramenta e ao objeto. Em tarefas de manipulação com acelerações e velocidades reduzidas, as componentes dinâmicas associadas à ferramenta e ao objeto podem ser desprezadas, mas as componentes gravíticas são inevitáveis [151]. As componentes externas ${}^S\mathbf{w}_{\text{ext}}$ também podem ser ignoradas durante a manipulação, desde que não ocorram colisões da ferramenta ou do objeto com o ambiente. Isso é válido ao analisar o período após a apreensão do objeto e antes do seu posicionamento, assumindo que não há colisões durante a trajetória [154].

Dado o exposto, os valores totais de força e binário medidos pelo sensor ${}^S\mathbf{w}$, apresentados na Figura 4.3 e Equação 4.2, podem ser obtidos de forma simplificada, considerando apenas as componentes da ferramenta e do objeto associadas à gravidade, ${}^S\mathbf{w}_{\text{fer}}$ e ${}^S\mathbf{w}_{\text{obj}}$ respetivamente, e os desvios mecânicos do sensor ${}^S\mathbf{w}_{\text{dsv}}$, conforme apresentado na Figura 4.4 e na Equação 4.3.

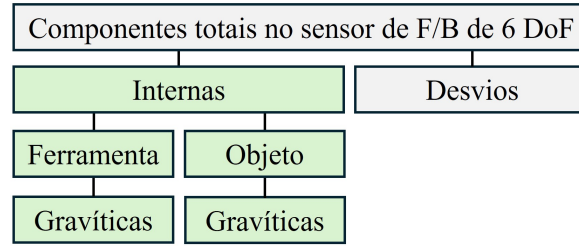


Figura 4.4: As componentes medidas por um sensor de F/B de 6 DoF instalado no punho do robô durante uma tarefa de manipulação de um objeto. Nesta representação considera-se acelerações e velocidades reduzidas sem que haja contacto da ferramenta e do objeto com o robô e o ambiente, durante a tarefa de manipulação.

$${}^S\mathbf{w} = {}^S\mathbf{w}_{\text{fer}} + {}^S\mathbf{w}_{\text{obj}} + {}^S\mathbf{w}_{\text{dsv}} \quad (4.3)$$

em que ${}^S\mathbf{w}_{\text{fer}}, {}^S\mathbf{w}_{\text{obj}}, {}^S\mathbf{w}_{\text{dsv}} \in \mathbb{R}^6$.

Componentes Associadas ao Objeto

As componentes do objeto devidas à gravidade ${}^S\mathbf{w}_{\text{obj}}$ podem ser isoladas estimando as componentes da ferramenta devidas à gravidade ${}^S\hat{\mathbf{w}}_{\text{fer}}$ e os desvios do sensor ${}^S\hat{\mathbf{w}}_{\text{dsv}}$ e subtraindo-as às componentes totais medidas pelo sensor ${}^S\mathbf{w}$. O processo utilizado para estimar as componentes ${}^S\hat{\mathbf{w}}_{\text{fer}}$ e ${}^S\hat{\mathbf{w}}_{\text{dsv}}$ é denominado por método de calibração e é realizado sempre que ocorre a troca da ferramenta do robô. O método

utilizado para subtrair as componentes estimadas ${}^S\hat{\mathbf{w}}_{\text{fer}}$ e ${}^S\hat{\mathbf{w}}_{\text{dsv}}$ às componentes totais ${}^S\mathbf{w}$ é referido como método de compensação e é executado durante a tarefa de manipulação, utilizando a Equação 4.4.

$${}^S\mathbf{w} = {}^S\mathbf{w}_{\text{fer}} + {}^S\mathbf{w}_{\text{obj}} + {}^S\mathbf{w}_{\text{dsv}} - {}^S\hat{\mathbf{w}}_{\text{fer}} - {}^S\hat{\mathbf{w}}_{\text{dsv}} \quad (4.4)$$

obtendo-se ${}^S\mathbf{w} \approx {}^S\mathbf{w}_{\text{obj}}$.

Isolando as componentes do objeto devidas à gravidade ${}^S\mathbf{w}_{\text{obj}}$ é possível obter as informações sobre o contacto e o objeto apresentadas na Subsecção 4.2.1, conforme será discutido na Secção 4.6.

Existem abordagens que permitem estimar e compensar as componentes da ferramenta devidas à gravidade ${}^S\hat{\mathbf{w}}_{\text{fer}}$ e os desvios do sensor ${}^S\hat{\mathbf{w}}_{\text{dsv}}$ [151, 152, 155], sendo aplicadas sobretudo em aplicações que envolvem o contacto da ferramenta com o ambiente, como, por exemplo, em tarefas de polimento, conforme referenciado na Subsecção 3.4.1. Em aplicações em que as acelerações e as velocidades da carga acoplada ao sensor são consideráveis, deve-se optar por compensações semi-dinâmicas [155] ou dinâmicas [33, 34, 156], levando em conta, além das componentes gravíticas, as componentes dinâmicas referidas na Subsecção 4.3.2. Os movimentos das partes móveis da ferramenta, como, por exemplo, o movimento dos dedos de uma garra, podem influenciar a precisão da compensação caso o método não preveja essa situação.

4.4 Método de Calibração

Nesta secção apresenta-se o método de calibração proposto por Yu *et al.* [151] para estimar as componentes de força e binário exercidas no sensor de F/B de 6 DoF instalado no punho do robô devidas à gravidade que atua sobre a ferramenta ${}^S\hat{\mathbf{w}}_{\text{fer}}$, bem como as componentes presentes nas medições devidas aos desvios mecânicos do sensor ${}^S\hat{\mathbf{w}}_{\text{dsv}}$.

A secção está organizada da seguinte forma: inicialmente, apresentam-se as equações de força e binário utilizadas no método de calibração. De seguida, descreve-se o método de calibração e as abordagens para estimar as componentes ${}^S\hat{\mathbf{w}}_{\text{fer}}$ e ${}^S\hat{\mathbf{w}}_{\text{dsv}}$. As abordagens incluem a estimativa da força gravítica e a posição do centro de massa da ferramenta, os desvios angulares entre a base de fixação do robô e a referência da gravidade, bem como entre o sensor e o punho do robô, e as componentes de força e binário devidas aos desvios mecânicos do sensor.

4.4.1 Equações de Força e Binário

O processo de calibração proposto por Yu *et al.* [151] permite estimar a força ${}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}}$ e o binário ${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{fer}}$ exercidos no sensor de F/B de 6 DoF instalado no punho do robô,

devidos à aceleração da gravidade $\mathbf{g}$ e a duas componentes inerciais da ferramenta: a massa $\hat{m}$ e o centro de massa ${}^S\hat{\mathbf{p}}_{\text{fer}}$. Este processo também permite estimar as componentes de força ${}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{dsv}}$ e de binário ${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{dsv}}$ presentes nas medições do sensor, que são devidas aos desvios mecânicos do sensor.

Este método é implementado após a fixação do robô e a instalação da ferramenta, podendo ser repetido sempre que necessário. Durante a calibração não podem existir colisões da ferramenta com o ambiente e a ferramenta deve estar livre de qualquer objeto. Assim, as componentes de força e binário medidas pelo sensor, ${}^S\mathbf{f}$ e ${}^S\boldsymbol{\tau}$, podem ser calculadas através da soma das componentes da ferramenta devidas à gravidade, ${}^S\mathbf{f}_{\text{fer}}$ e ${}^S\boldsymbol{\tau}_{\text{fer}}$, e dos desvios mecânicos do sensor, ${}^S\mathbf{f}_{\text{dsv}}$ e ${}^S\boldsymbol{\tau}_{\text{dsv}}$, conforme as Equações 4.5 e 4.6:

$${}^S\mathbf{f} = {}^S\mathbf{f}_{\text{fer}} + {}^S\mathbf{f}_{\text{dsv}} \quad | \quad {}^S\mathbf{f} = [f_x \ f_y \ f_z]^T \in \mathbb{R}^3 \quad (4.5)$$

$${}^S\boldsymbol{\tau} = {}^S\boldsymbol{\tau}_{\text{fer}} + {}^S\boldsymbol{\tau}_{\text{dsv}} \quad | \quad {}^S\boldsymbol{\tau} = [\tau_x \ \tau_y \ \tau_z]^T \in \mathbb{R}^3 \quad (4.6)$$

em que ${}^S\mathbf{f}_{\text{fer}}, {}^S\mathbf{f}_{\text{dsv}}, {}^S\boldsymbol{\tau}_{\text{fer}}, {}^S\boldsymbol{\tau}_{\text{dsv}} \in \mathbb{R}^3$.

Este método de calibração não considera as componentes dinâmicas da ferramenta, uma vez que podem ser desprezadas para acelerações e velocidades reduzidas da própria ferramenta [151]. Além disso, não leva em conta os movimentos das partes móveis da ferramenta, como a movimentação dos dedos da garra.

Força Gravítica Devida à Ferramenta

A força gravítica da ferramenta exercida no sensor de F/B de 6 DoF ${}^S\mathbf{f}_{\text{fer}}$ pode ser calculada através da matriz de rotação que descreve a orientação da referência da gravidade em relação à referência do sensor ${}^S\mathbf{R}_G$ e da força gravítica da ferramenta na referência da gravidade ${}^G\mathbf{f}_{\text{fer}}$, conforme é apresentado na Equação 4.7:

$${}^S\mathbf{f}_{\text{fer}} = {}^S\mathbf{R}_G {}^G\mathbf{f}_{\text{fer}} \quad (4.7)$$

em que ${}^S\mathbf{R}_G = {}^S\mathbf{R}_E {}^E\mathbf{R}_B {}^B\mathbf{R}_G \in \mathbb{SO}(3)$ e ${}^G\mathbf{f}_{\text{fer}} = [0 \ 0 \ -mg]^T$, com $m \in \mathbb{R}$ e $g \approx 9,8 \text{ m s}^{-2}$.

Binário Devido à Ferramenta

O binário exercido no sensor de F/B de 6 DoF devido à ferramenta ${}^S\boldsymbol{\tau}_{\text{fer}}$ pode ser calculado utilizando as componentes da força gravítica da ferramenta em relação à referência do sensor ${}^S\mathbf{f}_{\text{fer}}$ e as componentes da posição do centro de massa da ferramenta em relação à referência do sensor ${}^S\hat{\mathbf{p}}_{\text{fer}}$. O cálculo do binário é representado pelo sistema de equações na Equação 4.8 [155] e está ilustrado graficamente na Figura 4.5.

$$\begin{cases} \tau_{fer_x} = p_{fer_y} \cdot f_{fer_z} - p_{fer_z} \cdot f_{fer_y} \\ \tau_{fer_y} = p_{fer_z} \cdot f_{fer_x} - p_{fer_x} \cdot f_{fer_z} \\ \tau_{fer_z} = p_{fer_x} \cdot f_{fer_y} - p_{fer_y} \cdot f_{fer_x} \end{cases} \quad (4.8)$$

em que ${}^S\boldsymbol{\tau}_{fer} = [\tau_{fer_x} \ \tau_{fer_y} \ \tau_{fer_z}]^T$, ${}^S\mathbf{p}_{fer} = [p_{fer_x} \ p_{fer_y} \ p_{fer_z}]^T$, ${}^S\mathbf{f}_{fer} = [f_{fer_x} \ f_{fer_y} \ f_{fer_z}]^T \in \mathbb{R}^3$.

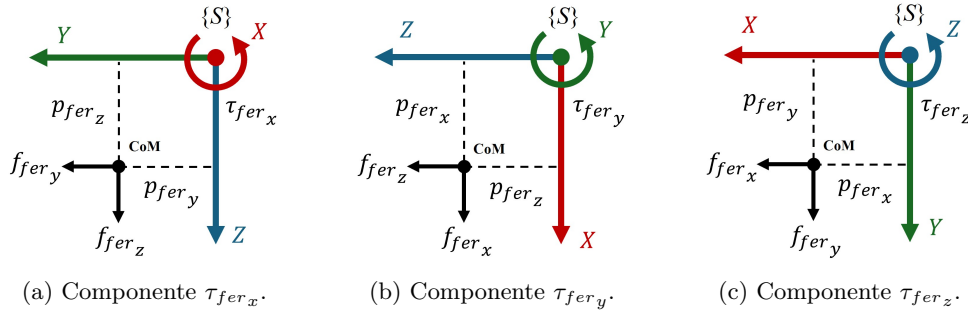


Figura 4.5: Representação das componentes do binário exercidas no sensor de F/B de 6 DoF $\{S\}$ devidas ao deslocamento do Centro de Massa (CoM) e à força gravítica da ferramenta.

O sistema de equações pode ser representado na forma matricial através da Equação 4.9 [151]:

$${}^S\boldsymbol{\tau}_{fer} = {}^S\mathbf{p}_{fer}^A \cdot {}^S\mathbf{f}_{fer} \quad (4.9)$$

em que ${}^S\mathbf{p}_{fer}^A$ representa o vetor ${}^S\mathbf{p}_{fer}$ na forma de matriz antissimétrica, conforme mostrado na Equação 4.10:

$${}^S\mathbf{p}_{fer}^A = \begin{bmatrix} 0 & -p_{fer_z} & p_{fer_y} \\ p_{fer_z} & 0 & -p_{fer_x} \\ -p_{fer_y} & p_{fer_x} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

4.4.2 Descrição do Método de Calibração

O processo de calibração apresentado por Yu *et al.* [151] permite estimar as componentes da ferramenta devidas à gravidade exercidas no sensor de F/B de 6 DoF, ${}^S\hat{\mathbf{f}}_{fer}$ e ${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{fer}$, e os desvios mecânicos do sensor ${}^S\hat{\mathbf{f}}_{dsv}$ e ${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{dsv}$. A abordagem utiliza as Equações 4.11 e 4.12 obtidas através da manipulação das Equações 4.5 e 4.6, que representam a força e o binário exercidos no sensor, ${}^S\mathbf{f}$ e ${}^S\boldsymbol{\tau}$, respetivamente.

$${}^S\mathbf{f} = {}^S\mathbf{R}_E^E \mathbf{R}_B^B \mathbf{f}_{fer} + {}^S\mathbf{f}_{dsv} \quad (4.11)$$

em que ${}^B\mathbf{f}_{fer} = {}^B\mathbf{R}_G^G \mathbf{f}_{fer}$.

$${}^S\boldsymbol{\tau} = {}^S\mathbf{p}_{\text{fer}}^A \cdot ({}^S\mathbf{f} - {}^S\mathbf{f}_{\text{dsv}}) + {}^S\boldsymbol{\tau}_{\text{dsv}} \quad (4.12)$$

O processo de calibração proposto por Yu *et al.* [151] está dividido em três etapas:

1. a primeira etapa consiste em estimar a força gravítica da ferramenta na referência da base do robô ${}^B\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}}$;
2. a segunda etapa envolve a estimativa da matriz de rotação que representa o desvio angular entre o punho do robô e o sensor ${}^S\hat{\mathbf{R}}_E$ e as componentes de força do desvio mecânico do sensor ${}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{dsv}}$;
3. a terceira etapa consiste em estimar a posição do centro de massa da ferramenta em relação ao sensor ${}^S\hat{\mathbf{p}}_{\text{fer}}$, as componentes de binário do desvio mecânico do sensor ${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{dsv}}$, a matriz de rotação que representa o desvio angular entre a referência da gravidade e a referência da base do robô ${}^B\hat{\mathbf{R}}_G$ e, por fim, a massa da ferramenta $\hat{m}$.

Força Gravítica da Ferramenta na Referência da Base do Robô

Existem dois métodos propostos por Yu *et al.* [151] que podem ser utilizados para estimar o vetor ${}^B\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}}$, dependendo da disponibilidade do volume de trabalho do robô. A primeira abordagem, designada por *Special Robot Orientation* (SRO), requer a disponibilidade total do volume de trabalho do robô, enquanto a segunda abordagem, referida como *Limited Robot Orientation* (LRO), é mais flexível, permitindo estimar o vetor ${}^B\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}}$ num volume de trabalho confinado.

Método *Special Robot Orientation*

O método SRO envolve orientar o punho do robô em 24 orientações diferentes, ${}^E\mathbf{R}_{B_i}$ com $i \in \{1, 2, \dots, 24\}$, conforme apresentadas na Equação 4.13, e medir as forças exercidas no sensor de F/B de 6 DoF correspondentes a cada orientação, ${}^S\mathbf{f}_i$. É importante salientar que também se devem guardar as 24 observações de binário ${}^S\boldsymbol{\tau}_1 \dots {}^S\boldsymbol{\tau}_{24}$ exercidas sobre o sensor em cada orientação, uma vez que serão utilizadas para estimar os vetores ${}^S\hat{\mathbf{p}}_{\text{fer}}$ e ${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{fer}}$, como será visto mais à frente neste documento.

$$\begin{aligned}
{}^E\mathbf{R}_{B1} &= \begin{bmatrix} +1 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B2} &= \begin{bmatrix} +1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B3} &= \begin{bmatrix} +1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & +1 & 0 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B4} &= \begin{bmatrix} +1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B5} &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B6} &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B7} &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 \\ 0 & +1 & 0 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B8} &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B9} &= \begin{bmatrix} 0 & +1 & 0 \\ +1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B10} &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ +1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B11} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & +1 \\ +1 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & 0 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B12} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ +1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B13} &= \begin{bmatrix} 0 & +1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B14} &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B15} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & 0 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B16} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B17} &= \begin{bmatrix} 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & +1 \\ +1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B18} &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ +1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B19} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & +1 & 0 \\ +1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B20} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & +1 \\ 0 & -1 & 0 \\ +1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B21} &= \begin{bmatrix} 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B22} &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B23} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & +1 \\ 0 & +1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B24} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.13}$$

As 24 observações do vetor de força correspondentes a cada orientação, ${}^S\mathbf{f}_1 \dots {}^S\mathbf{f}_{24}$, são utilizadas para estimar cada componente do vetor da força gravítica da ferramenta na referência da base do robô, ${}^B\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}}$. As equações que permitem estimar as componentes do vetor ${}^B\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}}$, nomeadamente $\hat{f}_{\text{fer}_x}$, $\hat{f}_{\text{fer}_y}$ e $\hat{f}_{\text{fer}_z}$, estão apresentadas nas Equações 4.14, 4.15 e 4.16, respetivamente:

$$\hat{f}_{\text{fer}_x} = (\det([\mathbf{a}_1 \ \mathbf{a}_2 \ \mathbf{a}_3]))^{\frac{1}{3}} \in \mathbb{R} \tag{4.14}$$

$$\hat{f}_{\text{fer}_y} = (\det([\mathbf{a}_4 \ \mathbf{a}_5 \ \mathbf{a}_6]))^{\frac{1}{3}} \in \mathbb{R} \tag{4.15}$$

$$\hat{f}_{\text{fer}_z} = (\det([\mathbf{a}_7 \ \mathbf{a}_8 \ \mathbf{a}_9]))^{\frac{1}{3}} \in \mathbb{R} \tag{4.16}$$

em que cada vetor $\mathbf{a}_1 \dots \mathbf{a}_9 \in \mathbb{R}^3$ é calculado utilizando 8 das 24 observações do

vetor de força ${}^S\mathbf{f}_i$, conforme apresentado nas Equações 4.17-4.25. A demonstração das equações foi realizada por Yu *et al.* [151].

$$\mathbf{a}_1 = \frac{1}{8}({}^S\mathbf{f}_1 + {}^S\mathbf{f}_2 + {}^S\mathbf{f}_3 + {}^S\mathbf{f}_4 - {}^S\mathbf{f}_5 - {}^S\mathbf{f}_6 - {}^S\mathbf{f}_7 - {}^S\mathbf{f}_8) \quad (4.17)$$

$$\mathbf{a}_2 = \frac{1}{8}({}^S\mathbf{f}_9 + {}^S\mathbf{f}_{10} + {}^S\mathbf{f}_{11} + {}^S\mathbf{f}_{12} - {}^S\mathbf{f}_{13} - {}^S\mathbf{f}_{14} - {}^S\mathbf{f}_{15} - {}^S\mathbf{f}_{16}) \quad (4.18)$$

$$\mathbf{a}_3 = \frac{1}{8}({}^S\mathbf{f}_{17} + {}^S\mathbf{f}_{18} + {}^S\mathbf{f}_{19} + {}^S\mathbf{f}_{20} - {}^S\mathbf{f}_{21} - {}^S\mathbf{f}_{22} - {}^S\mathbf{f}_{23} - {}^S\mathbf{f}_{24}) \quad (4.19)$$

$$\mathbf{a}_4 = \frac{1}{8}({}^S\mathbf{f}_9 + {}^S\mathbf{f}_{13} + {}^S\mathbf{f}_{17} + {}^S\mathbf{f}_{21} - {}^S\mathbf{f}_{10} - {}^S\mathbf{f}_{14} - {}^S\mathbf{f}_{18} - {}^S\mathbf{f}_{22}) \quad (4.20)$$

$$\mathbf{a}_5 = \frac{1}{8}({}^S\mathbf{f}_1 + {}^S\mathbf{f}_5 + {}^S\mathbf{f}_{19} + {}^S\mathbf{f}_{23} - {}^S\mathbf{f}_2 - {}^S\mathbf{f}_6 - {}^S\mathbf{f}_{20} - {}^S\mathbf{f}_{24}) \quad (4.21)$$

$$\mathbf{a}_6 = \frac{1}{8}({}^S\mathbf{f}_3 + {}^S\mathbf{f}_7 + {}^S\mathbf{f}_{11} + {}^S\mathbf{f}_{15} - {}^S\mathbf{f}_4 - {}^S\mathbf{f}_8 - {}^S\mathbf{f}_{12} - {}^S\mathbf{f}_{16}) \quad (4.22)$$

$$\mathbf{a}_7 = \frac{1}{8}({}^S\mathbf{f}_{11} + {}^S\mathbf{f}_{16} + {}^S\mathbf{f}_{20} + {}^S\mathbf{f}_{23} - {}^S\mathbf{f}_{12} - {}^S\mathbf{f}_{15} - {}^S\mathbf{f}_{19} - {}^S\mathbf{f}_{24}) \quad (4.23)$$

$$\mathbf{a}_8 = \frac{1}{8}({}^S\mathbf{f}_4 + {}^S\mathbf{f}_7 + {}^S\mathbf{f}_{17} + {}^S\mathbf{f}_{22} - {}^S\mathbf{f}_3 - {}^S\mathbf{f}_8 - {}^S\mathbf{f}_{18} - {}^S\mathbf{f}_{21}) \quad (4.24)$$

$$\mathbf{a}_9 = \frac{1}{8}({}^S\mathbf{f}_1 + {}^S\mathbf{f}_6 + {}^S\mathbf{f}_{10} + {}^S\mathbf{f}_{13} - {}^S\mathbf{f}_2 - {}^S\mathbf{f}_5 - {}^S\mathbf{f}_9 - {}^S\mathbf{f}_{14}) \quad (4.25)$$

Método *Limited Robot Orientation*

O método LRO permite estimar a força gravítica da ferramenta na referência da base do robô, ${}^B\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}}$, em volumes de trabalho confinados. Este método consiste em orientar o punho do robô em n orientações diferentes, ${}^E\mathbf{R}_{Bi}$ com $i \in \{1, 2, \dots, n\}$, e medir as forças exercidas no sensor em cada orientação, ${}^S\mathbf{f}_i$. É importante salientar que também se devem guardar as n observações de binário ${}^S\boldsymbol{\tau}_1 \dots {}^S\boldsymbol{\tau}_n$, uma vez que serão utilizadas para estimar os vetores ${}^S\hat{\mathbf{p}}_{\text{fer}}$ e ${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{fer}}$, como será visto mais à frente neste documento.

A estimativa de ${}^B\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}}$ é calculada utilizando as n matrizes ${}^E\mathbf{R}_{B1} \dots {}^E\mathbf{R}_{Bn}$ e os n vetores ${}^S\mathbf{f}_1 \dots {}^S\mathbf{f}_n$, através do método de otimização *Least-Squares Method* (LSM), descrito na Subsecção 2.1.6. O método proposto por Yu *et al.* [151] leva em consideração a ortogonalidade da matriz ${}^S\mathbf{R}_E$, através da norma de Frobenius, $\|{}^S\mathbf{R}_E^T\|_F^2 = 3$, e utiliza os valores e vetores próprios de uma matriz, conforme descrito na Subsecção 2.1.4. O resumo da abordagem é apresentado infra e a demonstração detalhada foi documentada por Yu *et al.* [151].

Para a modelação do método LRO foi utilizada a Equação 4.26, obtida através da multiplicação da matriz ${}^S\mathbf{R}_E^T$ pela Equação 4.11.

$${}^S\mathbf{R}_E^T \cdot {}^S\mathbf{f} - {}^E\mathbf{R}_B {}^B\mathbf{f}_{\text{fer}} - {}^S\mathbf{R}_E^T \cdot {}^S\mathbf{f}_{\text{dsV}} = 0 \quad (4.26)$$

As três componentes da estimativa do vetor ${}^B\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}}$ são obtidas através da Equação 4.27:

$${}^B\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}} = \begin{cases} -\text{sgn}(b_3) \cdot [b_1 \ b_2 \ b_3]^T & \text{se } \alpha \in [100^\circ, 260^\circ] \\ \text{sgn}(b_3) \cdot [b_1 \ b_2 \ b_3]^T & \text{se } \alpha \in]0, 80^\circ] \cup [280^\circ, 360^\circ] \\ -\text{sgn}(b_1) \cdot [b_1 \ b_2 \ b_3]^T & \text{se } \alpha \in]80^\circ, 100^\circ[, \text{ eixo } X \downarrow \\ -\text{sgn}(b_2) \cdot [b_1 \ b_2 \ b_3]^T & \text{se } \alpha \in]80^\circ, 100^\circ[, \text{ caso contrário} \\ \text{sgn}(b_1) \cdot [b_1 \ b_2 \ b_3]^T & \text{se } \alpha \in]260^\circ, 280^\circ[, \text{ eixo } X \downarrow \\ \text{sgn}(b_2) \cdot [b_1 \ b_2 \ b_3]^T & \text{se } \alpha \in]260^\circ, 280^\circ[, \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (4.27)$$

em que a função sgn é a função sinal apresentada na Equação 4.28, b_1 , b_2 e b_3 são as primeiras três componentes do vetor $\hat{\mathbf{b}} = [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5 \ b_6]^T \in \mathbb{R}^6$ estimado através da Equação 4.29. O ângulo α corresponde ao ângulo de instalação do robô, isto é, ao valor do ângulo formado entre os planos $X - Y$ das referências da gravidade e da base do robô, conforme apresentado na Figura 4.6. Por fim, o termo "eixo $X \downarrow$ " refere-se ao eixo X da referência da base do robô estar na mesma direção da gravidade.

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} -1 & \text{se } x < 0 \\ 0 & \text{se } x = 0 \\ 1 & \text{se } x > 0 \end{cases} \quad (4.28)$$

$$\hat{\mathbf{b}} = -(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \mathbf{v} \quad (4.29)$$

em que a matriz $\mathbf{X}$ é obtida através das n observações da matriz ${}^E\mathbf{R}_B$, conforme apresentado na Equação 4.30, a matriz $\mathbf{Y}$ é obtida através da Equação 4.31 e o vetor $\mathbf{v}$ é o vetor próprio correspondente ao menor valor próprio da matriz que resulta do produto $\mathbf{H}^T \mathbf{H}$, em que a matriz $\mathbf{H}$ é calculada através da Equação 4.32.

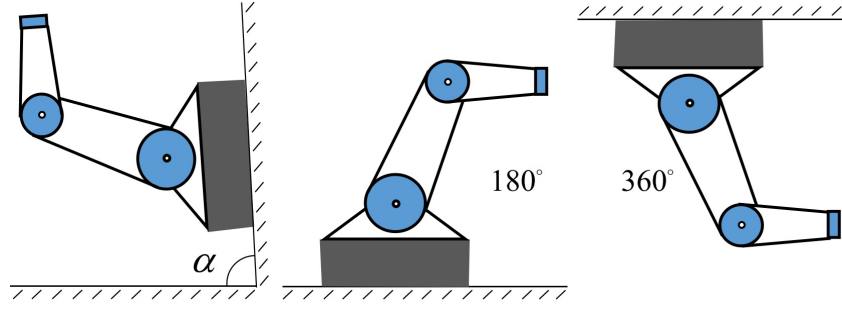


Figura 4.6: Diferentes tipos de instalação de um manipulador robótico, mostrando a variação do ângulo de instalação $\alpha \in]0, 360^\circ]$ entre a referência da gravidade e a base do robô [151].

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} -{}^E\mathbf{R}_{B1} & -\mathbf{I}_3 \\ -{}^E\mathbf{R}_{B2} & -\mathbf{I}_3 \\ \vdots & \vdots \\ -{}^E\mathbf{R}_{Bn} & -\mathbf{I}_3 \end{bmatrix}_{(3 \cdot n) \times 6} \quad (4.30)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{\Sigma}^{-1} \quad (4.31)$$

em que a matriz $\mathbf{A}$ é composta por n matrizes, cada uma constituída pela n -ésima observação de força e por vetores nulos, conforme apresentado na Equação 4.33, e a matriz $\mathbf{\Sigma}$ é calculada através do produto apresentado na Equação 4.34.

$$\mathbf{H} = (\mathbf{I}_{(3 \cdot n)} - \mathbf{X}(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T) \mathbf{Y} \quad (4.32)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \begin{bmatrix} {}^s\mathbf{f}_i^T & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & {}^s\mathbf{f}_i^T & \mathbf{0}_{1 \times 3} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & {}^s\mathbf{f}_i^T \end{bmatrix} \\ \vdots \end{bmatrix}_{(3 \cdot n) \times 9} \quad (4.33)$$

$$\mathbf{\Sigma} = \frac{\sqrt{3}}{3} \mathbf{I}_9 \quad (4.34)$$

Matriz de Rotação que Descreve a Orientação da Referência do Punho do Robô em Relação à Referência do Sensor

A estimativa da matriz de rotação ${}^s\hat{\mathbf{R}}_E$ é efetuada utilizando os métodos *Problem 3* e *Theorem 1*, apresentados por Ruiter *et al.* [157]. A demonstração deste processo, apresentada por Yu *et al.* [151], é resumida infra.

A estimativa da matriz ${}^s\hat{\mathbf{R}}_E$ pode ser calculada através da Equação 4.35:

$${}^s\hat{\mathbf{R}}_E = \begin{cases} \mathbf{U}\mathbf{C}\mathbf{V}^T, & \text{se } \text{car}(\mathbf{D}) \geq 1 \\ \text{sem solução,} & \text{se } \text{car}(\mathbf{D}) = 0 \end{cases} \quad (4.35)$$

em que as matrizes $\mathbf{U}$ e $\mathbf{V}$ são obtidas através da decomposição da matriz $\mathbf{D}$, calculada através da Equação 4.36, utilizando o método *Singular Value Decomposition* (SVD), descrito na Subsecção 2.1.5. A matriz $\mathbf{C}$ é calculada através da Equação 4.37. Apenas existe solução se $\text{car}(\mathbf{D}) \geq 1$, em que $\text{car}(\mathbf{D})$ é a característica da matriz $\mathbf{D}$, como detalhado na Subsecção 2.1.3.

$$\mathbf{D}^T = \sum_{i=1}^n ({}^E\mathbf{R}_{Bi} - {}^E\bar{\mathbf{R}}_B)^B \hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}} ({}^s\mathbf{f}_i - \bar{s}\mathbf{f})^T \quad (4.36)$$

em que n , ${}^E\mathbf{R}_{Bi}$ e ${}^s\mathbf{f}_i$ correspondem, respectivamente, ao número de orientações do punho do robô, à matriz de rotação e ao vetor de força na i -ésima observação, obtidos durante a execução do método SRO ou LRO. ${}^E\bar{\mathbf{R}}_B$ e $\bar{s}\mathbf{f}$ correspondem à média aritmética das n matrizes ${}^E\mathbf{R}_{Bi}$ e vetores ${}^s\mathbf{f}_i$, respetivamente, e podem ser calculadas através das Equações 4.38 e 4.39.

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \det(\mathbf{U}) \cdot \det(\mathbf{V}) \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

$${}^E\bar{\mathbf{R}}_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n {}^E\mathbf{R}_{Bi} \quad (4.38)$$

$$\bar{s}\mathbf{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n {}^s\mathbf{f}_i \quad (4.39)$$

Vetor dos Desvios Mecânicos do Sensor Relativos à Força

A estimativa do vetor do desvio do sensor relativo à força ${}^s\hat{\mathbf{f}}_{\text{dsv}}$ é obtida através da Equação 4.40:

$${}^s\hat{\mathbf{f}}_{\text{dsv}} = \bar{s}\mathbf{f} - {}^s\hat{\mathbf{R}}_E {}^E\bar{\mathbf{R}}_B {}^B\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}} \quad (4.40)$$

em que $\bar{s}\mathbf{f}$, ${}^s\hat{\mathbf{R}}_E$ e ${}^E\bar{\mathbf{R}}_B$ são calculados através das Equações 4.39, 4.35 e 4.38, respetivamente, e ${}^B\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}}$ é estimado através do método SRO ou LRO, de acordo com as Equações 4.14-4.16 ou Equação 4.27, respetivamente.

Vetor da Posição do Centro de Massa da Ferramenta em Relação ao Sensor e Vetor dos Desvios Mecânicos do Sensor Relativos ao Binário

A posição do centro de massa da ferramenta em relação ao sensor ${}^s\hat{\mathbf{p}}_{\text{fer}}$ e os desvios mecânicos do sensor relativos ao binário ${}^s\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{dsv}}$ são estimados através do método

LSM, descrito na Subsecção 2.1.6.

Para utilização do método foi manipulada a Equação 4.12, e o vetor ${}^s\mathbf{f}_{\text{dsv}}$ foi substituído pela sua estimativa ${}^s\hat{\mathbf{f}}_{\text{dsv}}$, obtendo-se a Equação 4.41.

$${}^s\boldsymbol{\tau} = -({}^s\mathbf{f} - {}^s\hat{\mathbf{f}}_{\text{dsv}})^A \cdot {}^s\mathbf{p}_{\text{fer}} + {}^s\boldsymbol{\tau}_{\text{dsv}} \quad (4.41)$$

A estimativa de ${}^s\hat{\mathbf{p}}_{\text{fer}}$ e ${}^s\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{dsv}}$ pode ser calculada através da Equação 4.42:

$$\hat{\mathbf{b}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (4.42)$$

em que $\hat{\mathbf{b}} = [{}^s\hat{\mathbf{p}}_{\text{fer}} \ {}^s\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{dsv}}]^T \in \mathbb{R}^6$. A matriz $\mathbf{X}$ é calculada através da Equação 4.43 e o vetor $\mathbf{y}$ está representado na Equação 4.44.

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} -({}^s\mathbf{f}_1 - {}^s\hat{\mathbf{f}}_{\text{dsv}})^A & \mathbf{I}_3 \\ -({}^s\mathbf{f}_2 - {}^s\hat{\mathbf{f}}_{\text{dsv}})^A & \mathbf{I}_3 \\ \vdots & \vdots \\ -({}^s\mathbf{f}_n - {}^s\hat{\mathbf{f}}_{\text{dsv}})^A & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix}_{(3 \cdot n) \times 6} \quad (4.43)$$

em que ${}^s\mathbf{f}_1 \dots {}^s\mathbf{f}_n$ são os n vetores de força observados durante a realização do método SRO ou LRO, ${}^s\hat{\mathbf{f}}_{\text{dsv}}$ é o vetor estimado através da Equação 4.40. O sobrescrito A é a representação do vetor no formato de matriz antissimétrica.

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} {}^s\boldsymbol{\tau}_1 \\ {}^s\boldsymbol{\tau}_2 \\ \vdots \\ {}^s\boldsymbol{\tau}_n \end{bmatrix}_{(3 \cdot n) \times 1} \quad (4.44)$$

em que ${}^s\boldsymbol{\tau}_1 \dots {}^s\boldsymbol{\tau}_n$ correspondem aos n vetores de binário observados durante a realização do método SRO ou LRO.

Matriz de Rotação que Descreve a Orientação da Referência da Gravidade em Relação à Referência da Base do Robô e a Massa da Ferramenta

A estimativa da matriz de rotação que representa o desvio angular entre a referência da gravidade e a referência da base do robô ${}^B\hat{\mathbf{R}}_G$ pode ser representada através da matriz de Tait-Bryan na ordem Z-Y-X, apresentada na Equação 4.45, como descrito na Subsecção 2.1.1.

$${}^B\hat{\mathbf{R}}_G = \mathbf{R}_Z(0)\mathbf{R}_Y(\hat{\beta})\mathbf{R}_X(\hat{\alpha}) = \begin{bmatrix} \cos \hat{\beta} & \sin \hat{\alpha} \sin \hat{\beta} & \cos \hat{\alpha} \sin \hat{\beta} \\ 0 & \cos \hat{\alpha} & -\sin \hat{\alpha} \\ -\sin \hat{\beta} & \sin \hat{\alpha} \cos \hat{\beta} & \cos \hat{\alpha} \cos \hat{\beta} \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

em que não é considerada a rotação no eixo Z , uma vez esse desvio não afeta as medições de força e binário no punho do robô [151]. É objetivo alinhar os eixos Z das referências da gravidade $\{G\}$ e da base do robô $\{B\}$, considerando que o vetor ${}^G\mathbf{g} = [0 \ 0 \ -g]^T$, com $g \approx 9,8 \text{ m s}^{-2}$, apenas tem componente no eixo Z . Os ângulos de rotação $\hat{\beta}$ e $\hat{\alpha}$ podem ser estimados através da Equação 4.46:

$$\hat{\beta} = \arctan\left(\frac{\hat{f}_{erx}}{\hat{f}_{erz}}\right), \quad \hat{\alpha} = \arctan\left(\frac{-\hat{f}_{ery} \cdot \cos \hat{\beta}}{\hat{f}_{erz}}\right) \quad (4.46)$$

em que as componentes de força pertencem ao vetor ${}^B\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}} = [\hat{f}_{erx} \ \hat{f}_{ery} \ \hat{f}_{erz}]^T$, estimadas através do método SRO ou LRO, de acordo com as Equações 4.14-4.16 ou Equação 4.27, respetivamente.

As Equações 4.46 foram obtidas através da Equação 4.47:

$${}^B\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}} = -\hat{m}g \begin{bmatrix} \cos \hat{\alpha} \sin \hat{\beta} \\ -\sin \hat{\alpha} \\ \cos \hat{\alpha} \cos \hat{\beta} \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

considerando que ${}^B\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}} = {}^B\hat{\mathbf{R}}_G {}^G\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}}$, com ${}^B\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}}$ estimado através do método SRO ou LRO como mencionado anteriormente, ${}^B\hat{\mathbf{R}}_G$ representada na Equação 4.45 e ${}^G\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}} = [0 \ 0 \ -\hat{m}g]^T$, com $\hat{m}g$ estimado através da Equação 4.48.

$$\hat{m}g = \|{}^B\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}}\| = \sqrt{(\hat{f}_{erx})^2 + (\hat{f}_{ery})^2 + (\hat{f}_{erz})^2} \quad (4.48)$$

A estimativa da massa da ferramenta $\hat{m}$ pode ser obtida dividindo o resultado da Equação 4.48 pelo valor aproximado da aceleração da gravidade $g \approx 9,8 \text{ m s}^{-2}$.

4.5 Método de Compensação

O método de compensação envolve ajustar as forças e binários medidos pelo sensor de F/B de 6 DoF, levando em consideração os efeitos da gravidade sobre a ferramenta e os desvios mecânicos do sensor. As forças e binários devidos à gravidade, ${}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}}$ e ${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{fer}}$, e os desvios do sensor, ${}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{dsv}}$ e ${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{dsv}}$, são compensados utilizando os valores estimados (${}^B\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}}$, ${}^S\hat{\mathbf{p}}_{\text{fer}}$, ${}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{dsv}}$, ${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{dsv}}$, ${}^S\hat{\mathbf{R}}_E$) obtidos através do método de calibração descrito na Subsecção 4.4.2. Além disso, utiliza-se a matriz de rotação ${}^E\mathbf{R}_B$ calculada através da orientação de cada junta do robô.

A compensação da força é realizada através da Equação 4.49, obtendo-se a estimativa das componentes de força do objeto devidas à gravidade exercidas no sensor no instante t , ${}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{obj}_t}$.

$${}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{obj}_t} = {}^S\hat{\mathbf{f}}_t - {}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}_t} - {}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{dsv}} \quad (4.49)$$

em que ${}^S\mathbf{f}_t$ é o vetor de força medido pelo sensor no instante t e ${}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}t}$ é estimado através da Equação 4.50.

$${}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}t} = {}^S\hat{\mathbf{R}}_E {}^E\mathbf{R}_{Bt} {}^B\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}} \quad (4.50)$$

em que ${}^E\mathbf{R}_{Bt}$ é a matriz de descreve a rotação da referência da base do robô em relação à referência do punho do robô no instante t , calculada através da orientação de cada junta do robô.

A compensação do binário é realizada através da Equação 4.51, obtendo-se a estimativa das componentes de binário do objeto devidas à gravidade exercidas no sensor no instante t , ${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{obj}t}$.

$${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{obj}t} = {}^S\boldsymbol{\tau}_t - {}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{fer}t} - {}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{dsv}} \quad (4.51)$$

em que ${}^S\boldsymbol{\tau}_t$ é o vetor de binário medido pelo sensor no instante t e ${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{fer}t}$ é estimado através da Equação 4.52.

$${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{fer}t} = {}^S\hat{\mathbf{p}}_{\text{fer}}^A \cdot {}^S\hat{\mathbf{R}}_E {}^E\mathbf{R}_{Bt} {}^B\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}} \quad (4.52)$$

em que ${}^S\hat{\mathbf{p}}_{\text{fer}}^A$ é a representação do vetor estimado ${}^S\hat{\mathbf{p}}_{\text{fer}}$ na forma de matriz antisimétrica.

4.6 Análise das Componentes do Objeto Devidas à Gravidade

Nesta secção são apresentadas as abordagens para obter as informações sobre o objeto e o contacto durante tarefas de manipulação, que, até onde se tem conhecimento, representam soluções inovadoras para adquirir informações detalhadas sobre o contacto e o objeto.

4.6.1 Informações sobre o Objeto

Nesta subsecção são apresentadas as abordagens para obter as informações sobre o objeto através das componentes estimadas de força e binário do objeto devidas à gravidade, nomeadamente:

- estimativa da massa e da posição do centro de massa do objeto;
- classificação de objetos para um conjunto de objetos com diferentes massas e previamente conhecidas;
- estimativa da posição de objetos que sejam corpos rígidos e, quando manipulados por uma ferramenta que limita os seus movimentos a um plano, estimar a pose unidimensional.

Estimativa da Massa e do Centro de Massa do Objeto

A massa do objeto $\hat{m}_{obj}$ é estimada através da Equação 4.53:

$$\hat{m}_{obj} = \frac{\|{}^s\hat{\mathbf{f}}_{obj}\|}{g} \quad (4.53)$$

em que $\|{}^s\hat{\mathbf{f}}_{obj}\|$ representa a norma do vetor estimado da força do objeto devida à gravidade, estimado através da Equação 4.49, e g é a aceleração da gravidade, aproximadamente igual a $9,8 \text{ m s}^{-2}$.

A posição do centro de massa do objeto em relação ao sensor de F/B de 6 DoF ${}^s\hat{\mathbf{p}}_{obj}$ é estimada utilizando a Equação 4.54, obtida com base nas equações da Subsecção 4.4.1.

$${}^s\hat{\boldsymbol{\tau}}_{obj} = -{}^s\hat{\mathbf{f}}_{obj}^A \cdot {}^s\hat{\mathbf{p}}_{obj}^T \quad (4.54)$$

em que ${}^s\hat{\mathbf{f}}_{obj}^A$ é a representação do vetor ${}^s\hat{\mathbf{f}}_{obj}$ no formato de matriz antissimétrica, estimado através da Equação 4.49, e ${}^s\hat{\boldsymbol{\tau}}_{obj}$ é o vetor estimado do binário do objeto devido à gravidade, calculado através da Equação 4.51.

A Equação 4.54 representa um sistema do tipo $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$, em que $\mathbf{A} = -{}^s\hat{\mathbf{f}}_{obj}^A$. Este sistema não pode ser resolvido analiticamente de forma única para $\mathbf{x}$, uma vez que a matriz $\mathbf{A}$ não é invertível. De acordo com a Subsecção 2.1.2, para matrizes antissimétricas de dimensão ímpar, $\det(\mathbf{A}) = 0$, o que implica que $\mathbf{A}$ é singular e, portanto, não possui inversa. Portanto, o vetor ${}^s\hat{\mathbf{p}}_{obj}$ pode ser estimado recorrendo à técnica SVD, como descrito na Subsecção 2.1.5. Neste caso, serão utilizadas k observações dos vetores ${}^s\hat{\boldsymbol{\tau}}_{obj}$ e ${}^s\hat{\mathbf{f}}_{obj}$.

Classificação de Objetos

A classificação de objetos com diferentes massas previamente conhecidas, é realizada conforme o fluxograma apresentado na Figura 4.7. O processo envolve a identificação de objetos pela comparação da estimativa da massa do objeto $\hat{m}_{obj}$, obtida através da Equação 4.53, com uma base de dados de massas conhecidas de objetos.

Estimativa da Pose Unidimensional do Objeto

A posição do centro de massa ${}^s\hat{\mathbf{p}}_{obj}$, estimada através da Equação 4.54, pode ser utilizada para determinar a pose unidimensional do objeto. Considerando corpos rígidos, como por exemplo um perfil de alumínio ilustrado na Figura 4.8, uma variação de ${}^s\hat{\mathbf{p}}_{obj}$ indica que o objeto se moveu, o que, numa preensão com uma garra de dois ou vários dedos, significa que ocorreu um escorregamento total entre as superfícies em contacto. A utilização de garras paralelas de dois dedos para a preensão de objetos através de superfícies planas e opostas limita a rotação do objeto a eixos normais ao plano de preensão, desde que as superfícies dos dedos sejam planas e

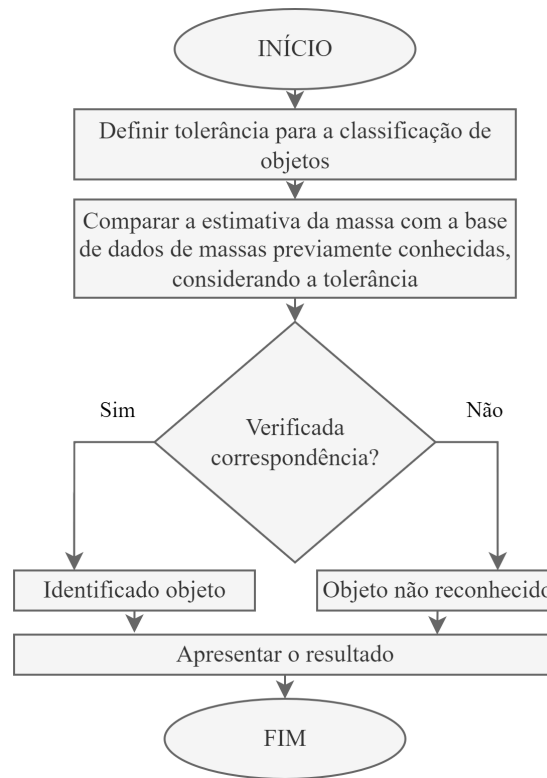
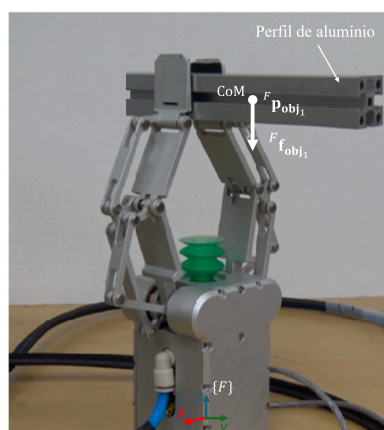
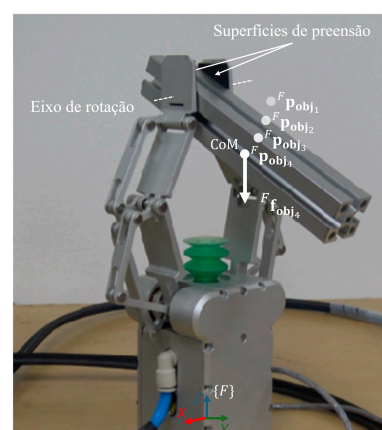


Figura 4.7: Fluxograma utilizado para classificar o objeto manipulado.

paralelas às superfícies de preensão do objeto. Um exemplo prático deste tipo de preensão pode ser visto na Figura 4.8, onde o objeto mostrado na Figura 4.8a realiza uma rotação em torno de um eixo normal ao plano de preensão $Y - Z$, resultando na posição final ilustrada na Figura 4.8b.



(a) Preensão estável.



(b) Falha de preensão, resultando numa rotação do perfil em torno de um eixo normal às superfícies de preensão.

Figura 4.8: Preensão de um perfil de alumínio através de uma garra paralela de dois dedos. Figuras adaptadas de Kang *et al.* [158].

Abordagem Proposta para Estimar a Pose Unidimensional do Objeto

A abordagem proposta para estimar a pose unidimensional do objeto durante uma tarefa de manipulação considera os seguintes requisitos:

- manipulação de corpos rígidos;
- preensão que permita apenas movimentos lineares do objeto num plano e rotações em torno de eixos normais a esse plano;
- definição de uma referência $\{F\}$ com o plano $Y - Z$ paralelo ao plano dos movimentos lineares do objeto.

A pose do objeto, descrita pela referência $\{O\}$, é determinada pela posição do centro de massa do objeto e pela sua orientação, que, inicialmente, coincide com a orientação da referência $\{F\}$. Por inicialmente, considera-se o momento após a fase de preensão do objeto, quando este está livre de contactos com o ambiente. Conforme o objeto se submete a rotações em torno de eixos normais ao plano $Y - Z$, devido a escorregamentos causados pela ação da gravidade, a referência $\{O\}$ é transladada para a posição do centro de massa do objeto e rodada em torno do eixo X , por um ângulo α .

Para descrever a pose do objeto, é definida uma matriz de transformação homogénea ${}^F\mathbf{T}_O$, que representa a transformação da referência do objeto $\{O\}$ em relação à referência da ferramenta $\{F\}$. A matriz de transformação homogénea ${}^F\mathbf{T}_O$ está representada na Equação 4.55.

$${}^F\mathbf{T}_O = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_X(\alpha) & {}^F\mathbf{p}_{\text{obj}} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

em que ${}^F\mathbf{p}_{\text{obj}} \in \mathbb{R}^3$ representa a posição do centro de massa do objeto em relação à referência $\{F\}$, e $\mathbf{R}_X(\alpha) \in \text{SO}(3)$ representa a rotação da referência $\{O\}$ em torno do eixo X pelo ângulo α .

O vetor ${}^F\mathbf{p}_{\text{obj}}$ pode ser calculado através da Equação 4.56.

$$\begin{bmatrix} {}^F\mathbf{p}_{\text{obj}} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^F\mathbf{T}_S \begin{bmatrix} {}^S\hat{\mathbf{p}}_{\text{obj}} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

em que o vetor ${}^S\hat{\mathbf{p}}_{\text{obj}}$ é estimado através da Equação 4.54 e ${}^F\mathbf{T}_S$ é a matriz de transformação homogénea que representa a transformação da referência do sensor $\{S\}$ em relação à referência da ferramenta $\{F\}$. A matriz ${}^F\mathbf{T}_S$ é definida na Equação 4.57.

$${}^F\mathbf{T}_S = \begin{bmatrix} {}^F\mathbf{R}_S & {}^F\mathbf{p}_{\text{ref}_f} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.57)$$

em que a matriz de rotação ${}^F\mathbf{R}_S \in \mathbb{SO}(3)$ deve ser tal que o plano $Y-Z$ da referência $\{F\}$ fique paralelo ao plano dos movimentos lineares do objeto durante a tarefa de manipulação, conforme os requisitos da abordagem. O vetor de posição ${}^F\mathbf{P}_{\text{ref_f}}$ pode ser escolhido arbitrariamente.

A pose do objeto requer o conhecimento do ângulo de rotação α , e, como tal, é proposta uma abordagem para estimar esse ângulo. A Figura 4.9 ilustra o conceito básico da abordagem, que consiste na análise de amostras consecutivas da posição do centro de massa do objeto em $\mathbb{R}^2$ e, caso representem uma rotação do objeto devido a um escorregamento é estimado o centro de rotação $\mathbf{E} \in \mathbb{R}^2$ e o respetivo ângulo α .

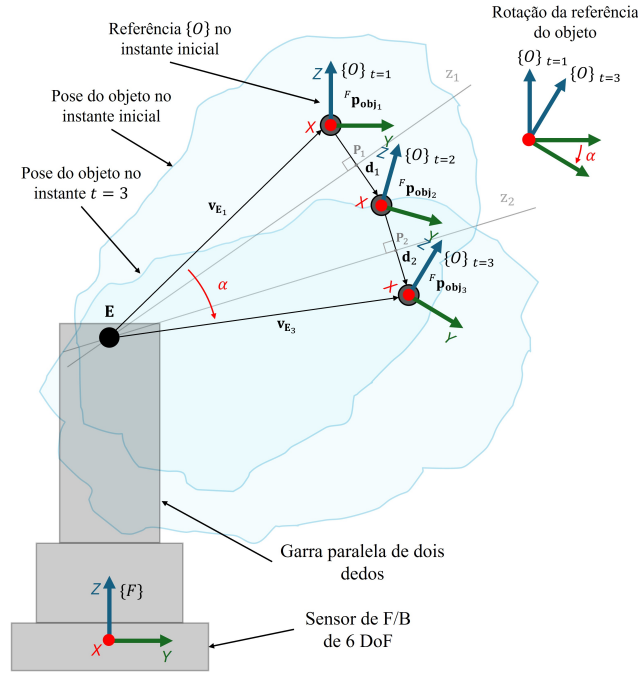


Figura 4.9: Abordagem utilizada para estimar a orientação unidimensional do objeto durante uma tarefa de manipulação, baseada na análise de amostras da posição do CoM do objeto.

O centro de rotação é definido pela interseção de duas retas, z_1 e z_2 , determinadas pelos vetores normais $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2 \in \mathbb{R}^2$ que são vetores de deslocamento adjacentes calculados a partir de três posições consecutivas do centro de massa, ${}^F\mathbf{P}_{\text{obj}_t} \in \mathbb{R}^2$ com $t = \{1, 2, 3\}$, e pelo ponto médio de cada um dos segmentos de reta definidos pelas posições consecutivas do centro de massa, $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2 \in \mathbb{R}^2$. O ângulo de rotação α é calculado através do ângulo formado entre os vetores $\mathbf{v}_{\mathbf{E}1}, \mathbf{v}_{\mathbf{E}2} \in \mathbb{R}^2$, definidos pelo centro de rotação $\mathbf{E}$ e pela primeira e última amostra da posição do centro de massa ${}^F\mathbf{P}_{\text{obj}_1}, {}^F\mathbf{P}_{\text{obj}_3}$. Este método não permite estimar rotações em que o eixo de rotação coincida com a posição do centro de massa, uma vez que, nessa condição, a rotação do objeto não gera deslocamento do centro de massa.

A abordagem para estimar o ângulo α requer o tratamento adequado das amostras da posição do centro de massa do objeto para garantir a convergência do método. A Figura 4.10 apresenta exemplos de amostras inadequadas para utilização no algoritmo. Nas Figuras 4.10a, 4.10b e 4.10c estão representadas amostras que contêm ruído. Nestas condições, o método não pode ser aplicado diretamente, pois o ângulo formado pelo conjunto de três amostras pode não representar rotações do objeto. As Figuras 4.10d e 4.10e apresentam amostras pós-tratamento do sinal que resultam de rotações do objeto. Nestas situações, o ângulo formado pelas três amostras entre rotações de sentidos opostos (sombreadas a cinza) não pode ser considerado, pois não representa um ângulo de rotação do objeto. Na Figura 4.10f são apresentados dois exemplos do ângulo α obtido através de amostras que não representam a rotação do objeto.

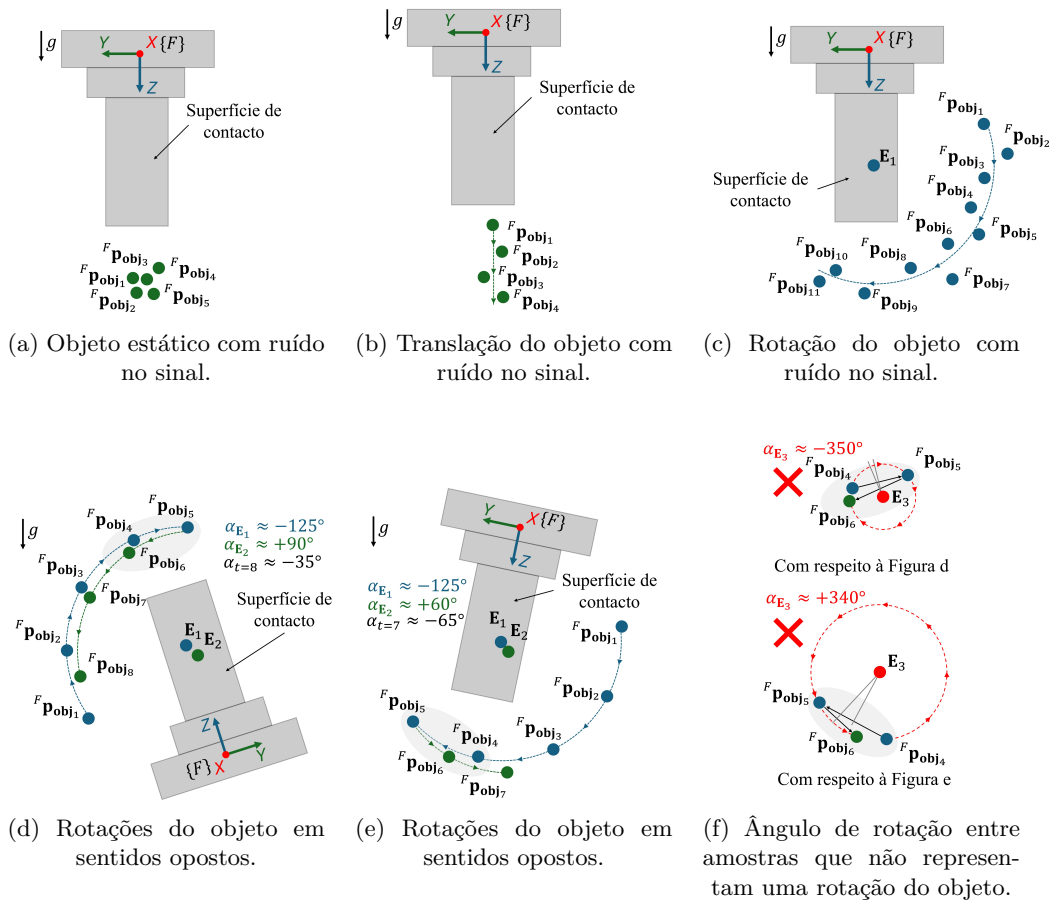


Figura 4.10: Exemplos de amostras que podem levar à divergência da abordagem para estimar o ângulo α que representa a orientação unidimensional do objeto.

Conforme referido anteriormente, as amostras da posição do centro de massa do objeto requerem tratamento antes de se aplicar a abordagem para estimar o ângulo de rotação do objeto. Assim, é proposta uma sequência de etapas para o tratamento

do sinal, apresentadas na Figura 4.11. O algoritmo utilizado para calcular o ângulo de rotação do objeto é apresentado no fluxograma da Figura 4.12.

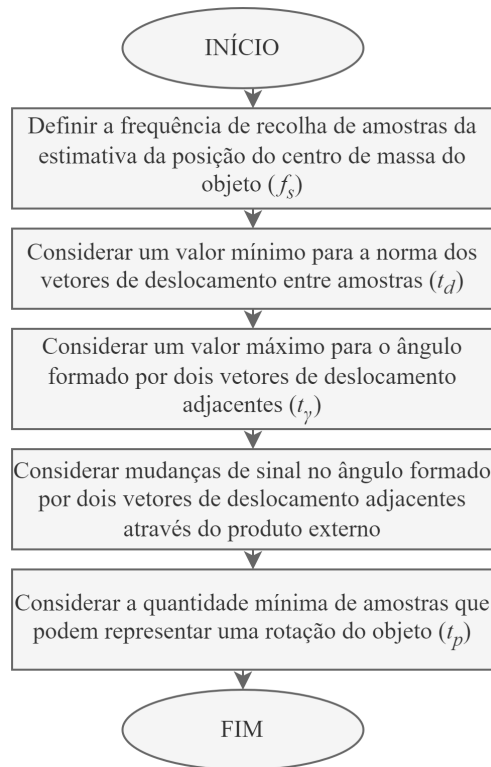
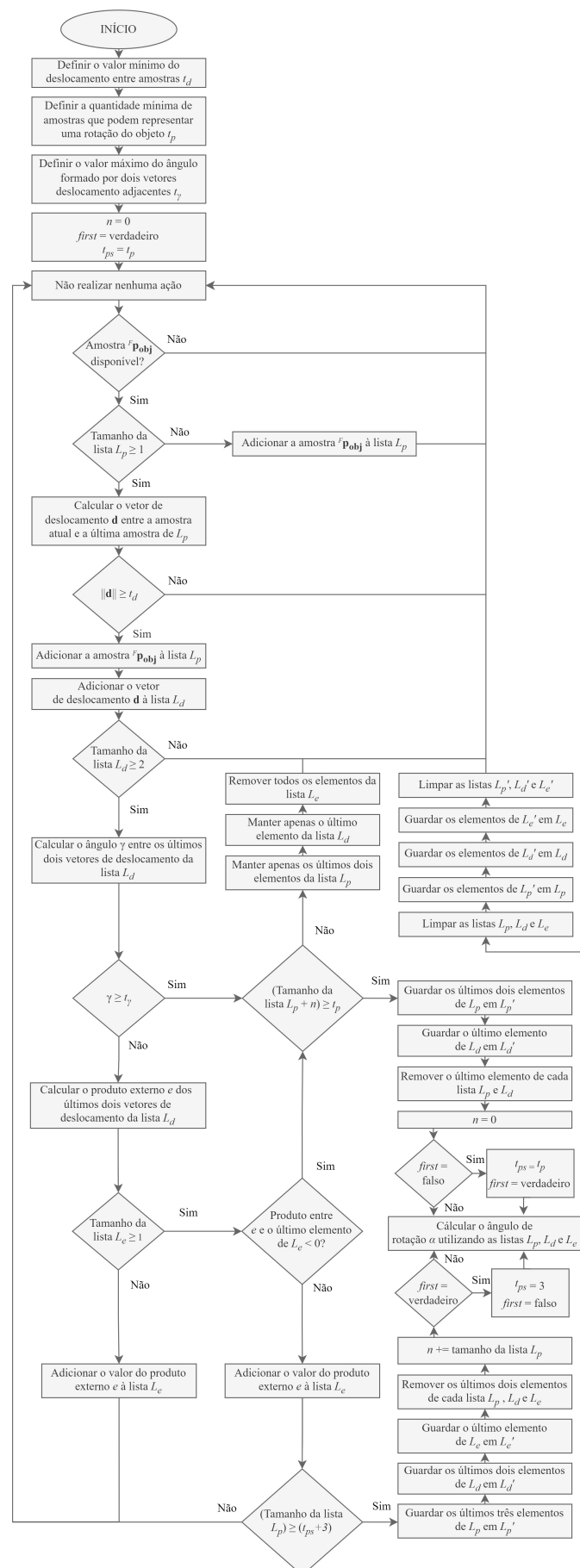


Figura 4.11: Metodologia utilizada para o tratamento das amostras do centro de massa do objeto antes de aplicar a abordagem para estimar a orientação unidimensional do objeto.



4.6.2 Informações sobre o Contacto

Nesta subsecção são apresentadas as abordagens para obter as informações de contacto através das componentes estimadas de força e binário do objeto devidas à gravidade, nomeadamente:

- deteção da presença ou ausência do objeto;
- deteção de escorregamento total para objetos que sejam corpos rígidos;
- representação das componentes estimadas de força e binário devidas à gravidade do objeto noutra referência para além da referência do sensor.

Deteção de Presença ou Ausência do Objeto

A deteção de presença ou ausência de um objeto é realizada através da estimativa da massa do objeto m_{obj} , calculada através da Equação 4.53. A abordagem é ilustrada no fluxograma da Figura 4.13. Este processo considera pequenas variações na estimativa da massa e determina a presença do objeto caso a massa estimada seja superior a um limiar. Este limiar deve ser escolhido de forma a ser maior que as flutuações na estimativa da massa quando nenhum objeto é manipulado e menor que a massa do objeto mais leve a ser detetado.

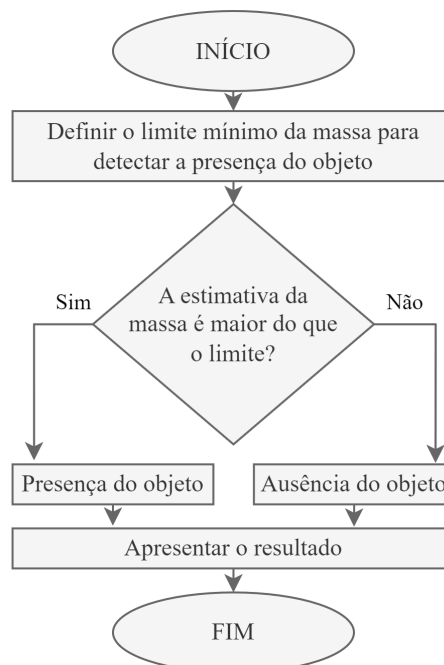


Figura 4.13: Fluxograma com a representação da abordagem utilizada para detetar a presença ou ausência do objeto.

Deteção de Escorregamento Total

A deteção de escorregamento total de um objeto é realizada através da análise da posição do centro de massa do objeto ${}^S\hat{\mathbf{p}}_{\text{obj}}$, estimada através da técnica SVD, como descrito na Subsecção 4.6.1. A abordagem é ilustrada no fluxograma da Figura 4.14. Este processo determina a ocorrência de escorregamento total caso o deslocamento do centro de massa seja superior a um valor limite predefinido.



Figura 4.14: Fluxograma com a representação da abordagem utilizada para detetar escorregamento total.

Transformação das Componentes de F/B para Uma Nova Referência

As componentes estimadas de força e binário na referência do sensor $\{S\}$ devidas ao efeito da gravidade sobre o objeto, ${}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{obj}}$ e ${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{obj}}$, podem ser representadas noutra referência $\{P\}$, ${}^P\hat{\mathbf{f}}_{\text{obj}}$ e ${}^P\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{obj}}$, definida pela matriz de rotação ${}^P\mathbf{R}_S$ e pelo vetor posição ${}^S\mathbf{p}_{\text{preen}}$. Na Figura 4.15 observa-se o exemplo de uma preensão de um objeto através de uma garra paralela de dois dedos, em que se definiu a referência $\{P\}$ conforme apresentado na figura.

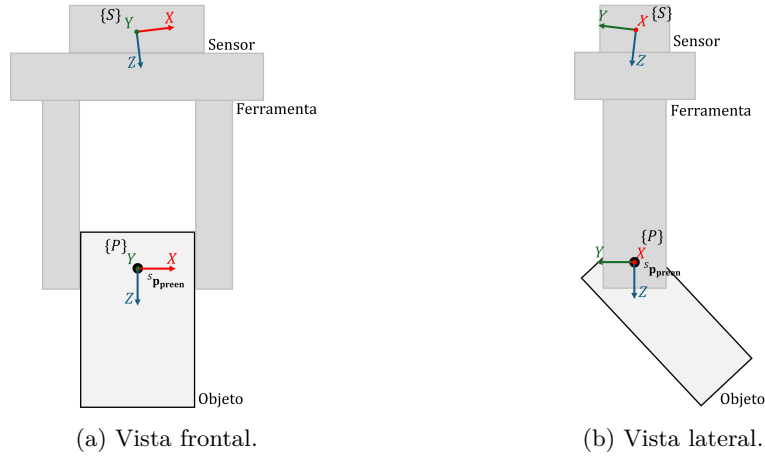


Figura 4.15: Prensão de um objeto através de uma garra paralela de dois dedos. A referência $\{P\}$ foi definida com o plano $Y-Z$ paralelo às superfícies de prensão.

As componentes estimadas de força e binário na referência $\{S\}$ podem ser representadas na referência $\{P\}$ através das Equações 4.58 e 4.59, respetivamente [159].

$${}^P\hat{\mathbf{f}}_{\text{obj}} = {}^P\mathbf{R}_S {}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{obj}} \quad (4.58)$$

em que o vetor ${}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{obj}}$ é estimado através da Equação 4.49.

$${}^P\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{obj}} = {}^P\mathbf{R}_S {}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{obj}} - ({}^P\mathbf{R}_S {}^S\mathbf{p}_{\text{preen}})^A \cdot {}^P\hat{\mathbf{f}}_{\text{obj}} \quad (4.59)$$

em que o vetor ${}^P\hat{\mathbf{f}}_{\text{obj}}$ é estimado através da Equação 4.58 e o sobrescrito A é a representação do vetor no formato de matriz antissimétrica.

4.7 Conclusão

Neste capítulo apresentou-se uma metodologia para a utilização de um sensor de F/B de 6 DoF instalado no punho de um manipulador robótico, com o objetivo de obter informações sobre o contacto e o objeto durante tarefas de manipulação, considerando acelerações e velocidades reduzidas, bem como a ausência de colisões.

Para permitir a utilização de diferentes manipuladores, sensores e ferramentas, aplicou-se a abordagem de Yu *et al.* [151], que permite estimar e compensar as componentes de F/B da ferramenta devidas à gravidade, assim como os desvios angulares de instalação e os desvios mecânicos do sensor.

Por fim, apresentaram-se abordagens para a obtenção de informações sobre o contacto e o objeto, utilizando as componentes de F/B obtidas após a compensação, que, na manipulação de corpos rígidos, permitem obter uma maior quantidade de informações.

Capítulo 5

Implementação e Resultados

Neste capítulo apresentam-se a implementação e os resultados da metodologia descrita no Capítulo 4. O presente capítulo inicia-se com a menção das tecnologias de *hardware* e *software* utilizadas no trabalho, seguida por uma breve descrição da implementação realizada no simulador Gazebo. Em seguida, é apresentada a arquitetura do sistema e uma descrição dos algoritmos implementados, finalizando com apresentação dos resultados para os vários métodos e uma conclusão sucinta do presente capítulo.

5.1 Ambiente de Simulação

Esta secção menciona as tecnologias de *hardware* e *software* utilizadas na implementação do trabalho, bem como uma breve descrição da simulação realizada no Gazebo.

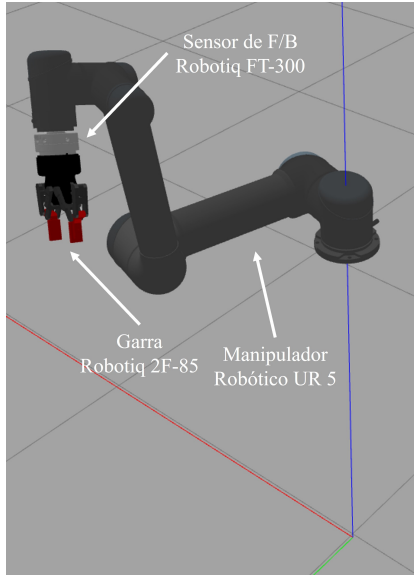
A máquina utilizada no desenvolvimento deste trabalho está equipada com um processador i5-12500H, uma placa gráfica RTX 4060, 16 GB de memória RAM DDR4 e o sistema operativo Ubuntu 20.04.6 LTS. O trabalho foi implementado em *Robot Operating System* (ROS) Noetic [9], descrito na Subsecção 2.2.1, utilizando a linguagem de programação C++ e o ambiente de desenvolvimento Catkin [11]. Foram simulados o manipulador robótico *Universal Robots* (UR) 5 [148], o sensor de Força e Binário (F/B) de 6 *Degrees of Freedom* (DoF) Robotiq FT-300 [149] e a garra de dois dedos Robotiq 2F-85 [150] através do ambiente de simulação Gazebo 11.14.0 [147], descrito na Subsecção 2.2.2. O MoveIt 1.1.13 [160] e o Rviz 1.14.20 [14] foram

utilizados para o planeamento dos movimentos do robô e da ferramenta, descritos nas Subsecções 2.2.3 e 2.2.4, respetivamente.

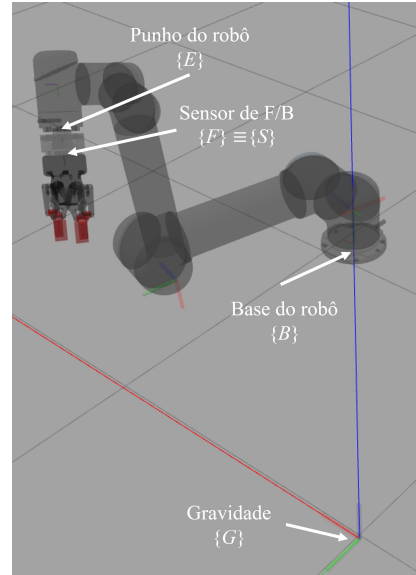
A simulação do manipulador robótico UR 5 e da garra Robotiq 2F-85 foi realizada com base no tutorial apresentado por Zhang [161]. Foram efetuadas adaptações para permitir a simulação da apreensão de objetos e do escorregamento entre o objeto e os dedos da garra, nomeadamente:

- substituição dos controladores das juntas do manipulador robótico e da garra, de `hardware_interface/PositionJointInterface` para `hardware_interface/EffortJointInterface`, permitindo o controlo direto do esforço (força ou binário) aplicado nas juntas. Esta alteração permite a interação entre os modelos no simulador Gazebo, conforme discutido por Hoorn [162];
- consideração da física de contacto nas pontas dos dedos da garra Robotiq 2F-85, conforme descrito em [163].

O sensor de F/B foi simulado utilizando o modelo *Unified Robot Description Format* (URDF) do Robotiq FT-300 e o *plug-in libgazebo_ros_ft_sensor* [164], seguindo o tutorial apresentado por Meng [165]. A frequência de amostragem do sensor foi definida em 50 Hz. Na Figura 5.1a observa-se o manipulador robótico, o sensor de F/B e a garra instalados no ambiente de simulação Gazebo. A Figura 5.1b apresenta as referências consideradas neste trabalho, sendo que a referência da ferramenta $\{F\}$ coincide com a referência do sensor $\{S\}$.



(a) Ilustração da montagem do manipulador robótico, sensor de F/B e ferramenta.



(b) Ilustração das referências da gravidade $\{G\}$, da base $\{B\}$ e punho $\{E\}$ do robô, sensor $\{S\}$ e ferramenta $\{F\}$.

Figura 5.1: Manipulador robótico UR 5 [148], sensor de F/B Robotiq FT-300 [149] e garra Robotiq 2F-85 [150] no ambiente de simulação Gazebo [147].

5.2 Arquitetura do Sistema

A Figura 5.2 apresenta a arquitetura do sistema. O processo inicia-se com a instalação do manipulador robótico, do sensor e da ferramenta. Após a instalação, o punho do robô é orientado em relação à base em n orientações diferentes, de acordo com o volume de trabalho do robô: *Special Robot Orientation* (SRO) ou *Limited Robot Orientation* (LRO), conforme descrito na Subsecção 4.4.2. As observações da matriz de rotação ${}^E\mathbf{R}_B$ e das componentes de F/B, ${}^S\mathbf{f}$ e ${}^S\boldsymbol{\tau}$, para cada uma das n orientações, são registadas num ficheiro *Comma-Separated Values* (CSV). O ficheiro é carregado no Octave [166] e o método de calibração SRO ou LRO é aplicado considerando as n observações, obtendo-se as componentes estimadas da ferramenta e os desvios: ${}^B\hat{\mathbf{f}}_{\text{fer}}$, ${}^S\hat{\mathbf{p}}_{\text{fer}}$, ${}^S\hat{\mathbf{R}}_E$, ${}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{dsv}}$ e ${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{dsv}}$.

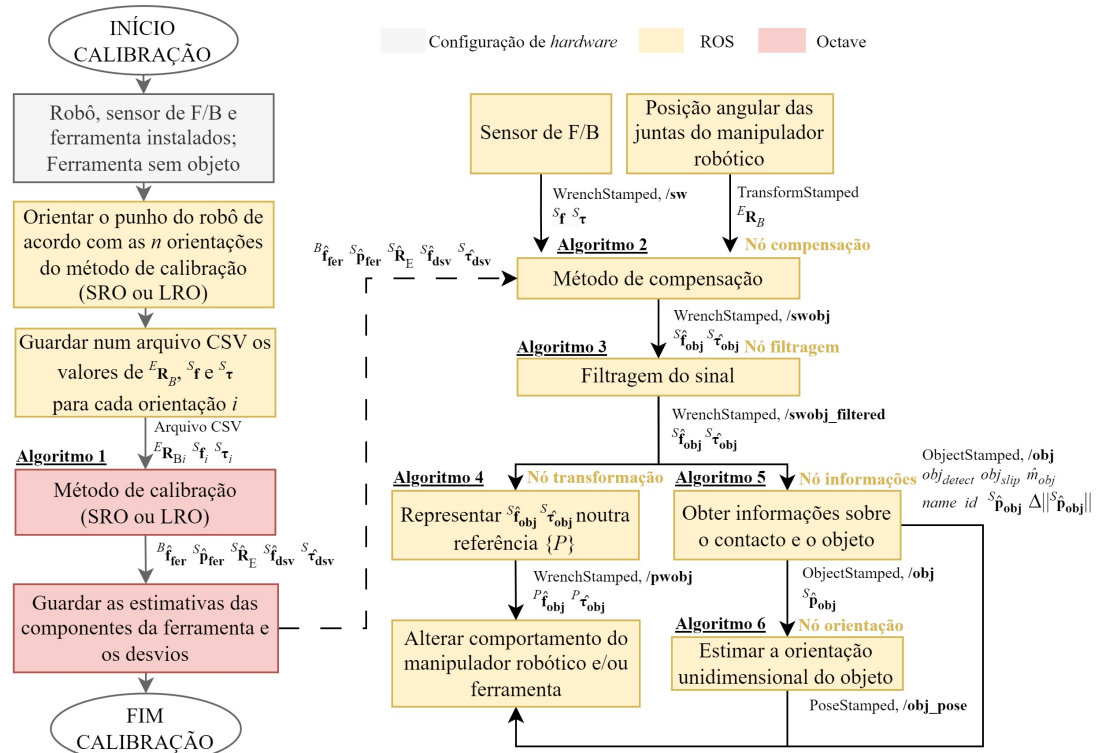


Figura 5.2: Diagrama de blocos com a implementação.

O método de compensação, descrito na Secção 4.5, é implementado no nó ROS "compensação". Neste nó, são definidas as componentes estimadas, e subscreve-se o tópico que fornece as componentes de F/B medidas pelo sensor, ${}^S\mathbf{f}$ e ${}^S\boldsymbol{\tau}$. A matriz de rotação ${}^E\mathbf{R}_B$ é obtida a partir da posição angular das juntas do manipulador, e a sincronização dos dados é realizada através da *timestamp* da mensagem do tópico do sensor de F/B. As componentes de F/B do objeto, ${}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{obj}}$ e ${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{obj}}$, são então estimadas pelo método de compensação.

Posteriormente, aplica-se uma filtragem digital às componentes ${}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{obj}}$ e ${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{obj}}$ utilizando um filtro Butterworth passa-baixo *Infinite Impulse Response* (IIR) de 3ª ordem, com uma frequência de corte de 1,5 Hz. Este filtro, implementado no nó "filtragem", tem como objetivo atenuar as componentes de F/B resultantes das interações entre a ferramenta e o objeto, assim como das componentes dinâmicas não consideradas.

A transformação das componentes ${}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{obj}}$ e ${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{obj}}$ para uma nova referência $\{P\}$, ${}^P\hat{\mathbf{f}}_{\text{obj}}$ e ${}^P\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{obj}}$, descrita na Subsecção 4.6.2, é realizada no nó "transformação". As informações sobre o contacto e o objeto, descritas nas Subsecções 4.6.2 e 4.6.1, respetivamente, são estimadas no nó "informações" e encapsuladas na mensagem ROS `ObjectStamped`, apresentada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Estrutura da mensagem ROS `ObjectStamped`.

Tipo de dados	Variável	Descrição
Header	<i>header</i>	Cabeçalho com <i>timestamp</i> e referência
bool	<i>detected</i>	Indica se foi detetado objeto
bool	<i>slip</i>	Indica se existe escorregamento total
float64	<i>mass</i>	Massa do objeto
string	<i>name</i>	Nome do objeto
int32	<i>id</i>	Identificador do objeto
float64	<i>comX</i>	Coordenada <i>X</i> do Centro de Massa (CoM) do objeto
float64	<i>comY</i>	Coordenada <i>Y</i> do CoM do objeto
float64	<i>comZ</i>	Coordenada <i>Z</i> do CoM do objeto
float64	<i>deltaCom</i>	Deslocamento do CoM do objeto

Por fim, a abordagem para estimar a orientação unidimensional do objeto manipulado, descrita no diagrama de blocos da Figura 4.12, é implementada no nó "orientação". As informações obtidas nos nós: "transformação", "informações" e "orientação", podem ser utilizadas para ajustar o comportamento do manipulador robótico e/ou da ferramenta, embora essa questão não seja abordada neste trabalho.

O método de calibração em Octave é executado uma única vez, após a instalação do manipulador, do sensor e da ferramenta. Todos os nós ROS devem estar em execução durante as tarefas de manipulação, à exceção do nó "orientação", que só deve ser executado se não houver colisões da ferramenta ou do objeto com o ambiente envolvente, durante a tarefa de manipulação.

5.3 Algoritmos

Esta secção descreve os algoritmos utilizados na arquitetura do sistema, apresentados no Anexo A. Inicialmente, é descrito o algoritmo implementado em Octave, seguido pela apresentação dos algoritmos utilizados no ROS.

5.3.1 Octave

O método de calibração utilizado para estimar as componentes da ferramenta e os desvios foi implementado em Octave, conforme referido na Secção 5.2. O Algoritmo 1 apresenta a lógica utilizada na elaboração do programa. As funções `SR0`, `LRO` e `estim_calib` foram desenvolvidas de acordo com a metodologia descrita na Subsecção 4.4.2 e encontram-se em ficheiros separados, com os mesmos nomes das funções, estando na mesma pasta que o ficheiro principal do Algoritmo 1. Para a implementação das funções `SR0`, `LRO` e `estim_calib` foram utilizadas funções nativas do Octave, que simplificaram o processo, destacando-se: `svd`, `rank`, `inv`, `diag` e `eig` [167].

5.3.2 ROS

Esta subsecção descreve os algoritmos utilizados no ROS, nomeadamente: método de compensação e filtragem do sinal, transformação das componentes de F/B do objeto para uma nova referência, informações sobre o contacto e o objeto e, por fim, estimativa da orientação unidimensional do objeto.

Método de Compensação e Filtragem do Sinal

O método de compensação utilizado para estimar as componentes de F/B do objeto foi implementado num nó ROS, conforme descrito na Secção 5.2, e segue a estrutura apresentada no Algoritmo 2. Para cada amostra de F/B do sensor, as componentes da ferramenta são compensadas de acordo com a orientação do punho do robô em relação à sua base, utilizando a biblioteca `tf2_ros` [168]. Após a compensação, as componentes do objeto são publicadas no tópico `\swobj` através de mensagens do tipo `WrenchStamped`, contendo o *timestamp* correspondente à amostra de F/B do sensor.

A filtragem das componentes de F/B do objeto foi realizada num nó ROS, seguindo a estrutura apresentada no Algoritmo 3. A saída do filtro é calculada de forma matricial, conforme descrito na Equação 5.1. Para o cálculo matricial, foi utilizada a biblioteca `Eigen` [169].

$$\mathbf{y}_{t \times 3} = \mathbf{b}_{1 \times (n+1)} \cdot \mathbf{X}_{(n+1) \times 3} - \mathbf{a}_{1 \times n} \cdot \mathbf{Y}_{n \times 3} \quad (5.1)$$

em que $\mathbf{y}_t$ representa a saída atual, $\mathbf{b} = [b_0 \ b_1 \ \dots \ b_n]$ e $\mathbf{a} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n]$ são os coeficientes do filtro de ordem n , $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_t \ \mathbf{x}_{t-1} \ \dots \ \mathbf{x}_{t-n}]^T$ é a matriz de entrada e $\mathbf{Y} = [\mathbf{y}_{t-1} \ \mathbf{y}_{t-2} \ \dots \ \mathbf{y}_{t-n}]^T$ é a matriz de saídas anteriores do filtro.

Transformação das Componentes de F/B do Objeto para Uma Nova Referência

A transformação das componentes de F/B do objeto para uma nova referência foi realizada conforme descrito no Algoritmo 4. Para cada amostra de F/B é aplicada a transformação, conforme detalhado na Subsecção 4.6.2, e os resultados são publicados no tópico `/pobj`. Esta operação foi implementada utilizando a biblioteca `tf2_ros` [168].

Informações sobre o Contacto e o Objeto

As informações sobre o contacto e o objeto foram obtidas de acordo com o Algoritmo 5. As mensagens do tipo `ObjectStamped` são publicadas a uma frequência definida por `loop_rate.sleep()`, enquanto o cálculo do deslocamento do Centro de Massa (CoM) é realizado a uma frequência determinada pela variável `Fs_slip_num_sample`. Desta forma, a frequência de cálculo do deslocamento do CoM é independente da frequência de publicação, permitindo a deteção de escorregamento total caso sejam utilizadas frequências elevadas de publicação.

No método de classificação de objetos, se nenhum objeto for classificado, é publicada uma mensagem com o identificador 0 e o nome do objeto como: Não Conhecido (NC).

Estimativa da Orientação Unidimensional do Objeto

O algoritmo utilizado para estimar a orientação unidimensional do objeto está apresentado no Algoritmo 6. A lógica seguida está ilustrada no diagrama de blocos da Figura 4.12, descrita na Subsecção 4.6.1. Foram utilizadas estruturas condicionais `if` e instruções de controlo de fluxo `continue`. Neste algoritmo, assumiu-se que a referência da ferramenta $\{F\}$ é coincidente com a referência do sensor $\{S\}$.

5.4 Resultados

Esta secção apresenta os resultados obtidos para a metodologia descrita no Capítulo 4. Inicialmente, são apresentados os resultados para o método de calibração, seguidos pelos resultados do método de compensação, da filtragem do sinal e da transformação das componentes de F/B do objeto para uma nova referência. Por fim, são apresentados os resultados do método de obtenção das informações sobre o contacto e o objeto.

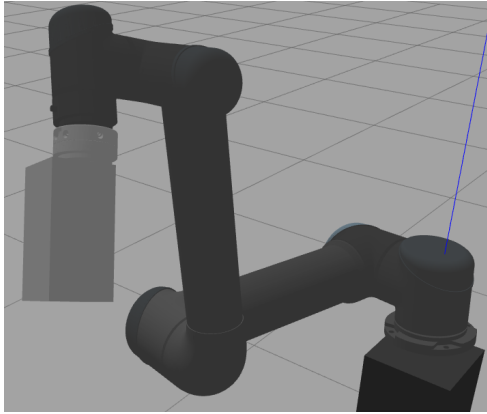
5.4.1 Método de Calibração

Esta subsecção descreve o processo utilizado para testar o método de calibração e, em seguida, apresenta os resultados obtidos desses testes.

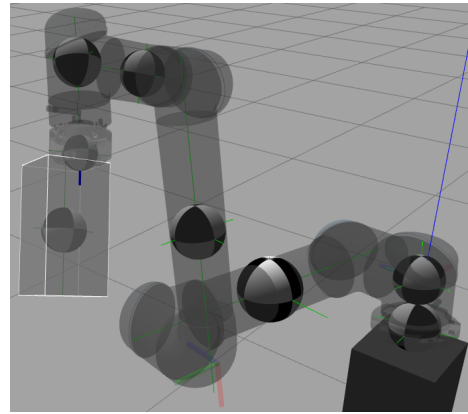
Processo Utilizado para Testar o Método de Calibração

O método de calibração, previamente validado por Yu *et al.* [151], foi testado no presente trabalho para a estimativa das componentes da ferramenta: massa ($\hat{m}$) e posição do CoM (${}^S\hat{\mathbf{p}}_{\text{fer}}$), dos desvios angulares (${}^B\hat{\mathbf{R}}_G$, ${}^S\hat{\mathbf{R}}_E$) e dos desvios mecânicos (${}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{dsv}}$, ${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{dsv}}$).

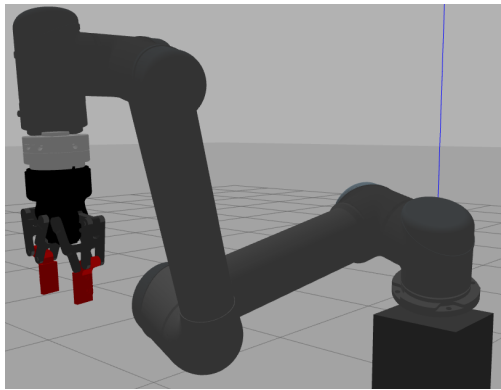
Para a estimativa das componentes da ferramenta, foi utilizada uma barra cúbica com os valores de massa e posição do CoM conhecidos, em substituição da garra Robotiq 2F-85, conforme ilustrado nas Figuras 5.3a e 5.3b. Este procedimento permitiu comparar os valores estimados com os valores reais, uma vez que a garra Robotiq 2F-85 possui várias partes, o que dificulta a obtenção da massa e da posição do CoM do conjunto, conforme ilustrado nas Figuras 5.3c e 5.3d.



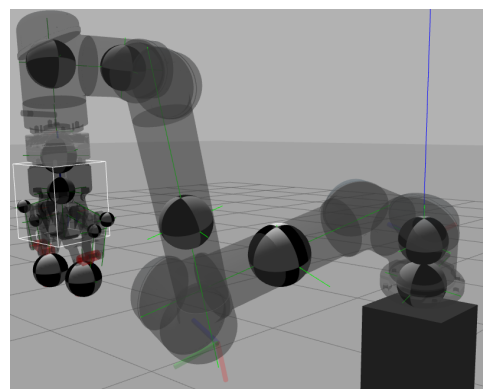
(a) Representação da barra cúbica instalada no sensor.



(b) Representação da posição do CoM das partes do robô, sensor e da barra cúbica.



(c) Representação da garra Robotiq 2F-85 instalada no sensor.



(d) Representação da posição do CoM das partes do robô, sensor e da garra Robotiq 2F-85.

Figura 5.3: Ferramentas utilizadas para teste do método de calibração no ambiente de simulação Gazebo.

Para a estimativa dos desvios angulares e mecânicos, foram aplicados desvios angulares conhecidos entre as referências da base do robô $\{B\}$ e da gravidade $\{G\}$,

bem como entre o punho do robô $\{E\}$ e o sensor $\{S\}$. Além disso, foram aplicados desvios conhecidos e constantes às medições de F/B do sensor. Este procedimento permitiu comparar os valores estimados com os valores reais, possibilitando testar a eficácia do método na estimativa dos desvios.

As componentes da ferramenta e os desvios foram estimados em função da disponibilidade do volume de trabalho do robô, utilizando os métodos SRO ou LRO. Para o método de calibração com SRO, o punho do robô foi orientado de acordo com as 24 orientações da matriz ${}^E\mathbf{R}_B$, conforme apresentado na Equação 4.13. Para o método de calibração com LRO, o punho do robô foi orientado aleatoriamente, utilizando matrizes ${}^E\mathbf{R}_B$ geradas a partir de números aleatórios para os ângulos de *roll*, *pitch* e *yaw*, extraídos de uma distribuição uniforme no intervalo $-\pi$ a π . As matrizes estão apresentadas no Anexo B. O método LRO foi testado com diferentes quantidades de orientações para avaliar o seu desempenho. A posição do punho do robô em relação à sua base foi escolhida arbitrariamente, uma vez que não influencia o método de calibração.

Após validar o método de calibração no presente trabalho utilizando a barra cúbica, foram estimadas as componentes da garra Robotiq 2F-85 e os desvios angulares e mecânicos ($\hat{m}$, ${}^S\hat{\mathbf{p}}_{\text{fer}}$, ${}^B\hat{\mathbf{R}}_G$, ${}^S\hat{\mathbf{R}}_E$, ${}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{dsv}}$ e ${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{dsv}}$). Durante a orientação do punho do robô, os dedos da garra foram mantidos na posição de 25% da abertura máxima.

Na Tabela 5.2 estão apresentados os valores a serem estimados pelo método de calibração, ou seja, o *groundtruth*. A descrição das orientações está apresentada na Tabela 5.3.

Tabela 5.2: Componentes das ferramentas: barra cúbica (F1) e garra Robotiq 2F-85 (F2), e os desvios angulares e mecânicos a serem estimados através do método de calibração. Os valores nas células representam as componentes nas direções x , y , z ou nos ângulos *roll*, *pitch*, *yaw*. As matrizes de rotação estão representadas pelos ângulos Tait-Bryan na ordem $Z - Y - X$.

	Barra Cúbica de 1 kg (F1)			Garra Robotiq 2F-85 (F2)		
	$X - axis$	$Y - axis$	$Z - axis$	$X - axis$	$Y - axis$	$Z - axis$
${}^S\mathbf{p}_{\text{fer}}$ (m)	0,02	-0,01	0,081	-	-	-
${}^B\mathbf{R}_G$ (rad)	-0,05	-0,1	0	0,3	0,15	0
${}^S\mathbf{R}_E$ (rad)	-0,048	-0,071	-0,027	0,08	-0,2	0,1
${}^S\mathbf{f}_{\text{dsv}}$ (N)	-1,4	-0,3	0,6	3,5	-1,5	2,6
${}^S\boldsymbol{\tau}_{\text{dsv}}$ (N m)	-0,2	-0,9	-1,2	1,98	4,9	-7,8

Tabela 5.3: Orientações do punho do robô em relação à sua base utilizadas para o teste do método de calibração.

Orientações	Descrição	Matrizes ${}^E\mathbf{R}_B$
A	24 orientações do método SRO	Equação 4.13
B	24 orientações aleatórias	Equação B.1
C	5 primeiras orientações de B	Equação B.1
D	4 primeiras orientações de B	Equação B.1
E	24 orientações aleatórias	Equação B.2

Resultados para a Estimativa das Componentes da Ferramenta e os Desvios

Os resultados obtidos para as estimativas das componentes das ferramentas (barra cúbica e garra Robotiq 2F-85), assim como para os desvios angulares e mecânicos, estão apresentados nas Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6, respectivamente.

A análise dos resultados permite concluir que o método de calibração utilizando SRO ou LRO apresentou bons resultados na estimativa de todos os valores, com um erro absoluto próximo de zero nas orientações A, B, C e E. No entanto, para quatro orientações aleatórias, referidas como dados D, o método LRO apresentou desvios consideráveis na estimativa de todos os valores, sugerindo a necessidade de mais observações.

Tabela 5.4: Resultados obtidos para a estimativa das componentes das ferramentas: barra cúbica (F1) e garra Robotiq 2F-85 (F2), utilizando os métodos SRO e LRO e as orientações de A a E.

Método	Valores/ Orientações	Componentes da Ferramenta Estimadas				Erro Absoluto			
		${}^S\hat{\mathbf{p}}_{\text{fer}} \text{ (m)}$			$\hat{m} \text{ (kg)}$	${}^S\hat{\mathbf{p}}_{\text{fer}} \text{ (m)}$			$\hat{m} \text{ (kg)}$
		x	y	z		x	y	z	
SRO	F1/A	0,02	-0,01	0,081	1	0	0	0	0
LRO	F1/B	0,02	-0,01	0,081	1	0	0	0	0
LRO	F1/C	0,02	-0,01	0,081	1	0	0	0	0
LRO	F1/D	0,02	-0,01	0,081	0,162	0	0	0	0,838
LRO	F2/E	0	0	0,114	1,364	-	-	-	-

F1 e F2: valores a serem estimados (Tabela 5.2); de A a E: orientações consideradas para estimar os valores (Tabela 5.3).

Tabela 5.5: Resultados obtidos para a estimativa das matrizes de rotação, representadas pelos ângulos Tait-Bryan na ordem $Z - Y - X$, utilizando os métodos SRO e LRO e as orientações de A a E.

Método	Valores/ Orientações	Matrizes de Rotação Estimadas						Erro Absoluto					
		${}^B\hat{\mathbf{R}}_G$ (rad)			${}^S\hat{\mathbf{R}}_E$ (rad)			${}^B\hat{\mathbf{R}}_G$ (rad)			${}^S\hat{\mathbf{R}}_E$ (rad)		
		roll	pitch	yaw	roll	pitch	yaw	roll	pitch	yaw	roll	pitch	yaw
SRO	F1/A	-0,044	-0,105	0	-0,048	-0,071	-0,026	0,006	0,005	0	0	0	0,001
LRO	F1/B	-0,05	-0,1	0	-0,048	-0,071	-0,026	0	0	0	0	0	0,001
LRO	F1/C	-0,049	-0,1	0	-0,048	-0,071	-0,026	0,001	0	0	0	0	0,001
LRO	F1/D	0,402	0,092	0	0,142	-0,005	0,522	0,452	0,192	0	0,19	0,066	0,549
LRO	F2/E	0,3	0,15	0	0,08	-0,2	0,1	0	0	0	0	0	0

F1 e F2: valores a serem estimados (Tabela 5.2); de A a E: orientações consideradas para estimar os valores (Tabela 5.3).

${}^B\hat{\mathbf{R}}_G$ e ${}^S\hat{\mathbf{R}}_E$: Matrizes de rotação que representam os desvios angulares entre a gravidade e a base do robô e o punho do robô e o sensor.

Tabela 5.6: Resultados obtidos para as estimativas dos desvios mecânicos do sensor, utilizando os métodos SRO e LRO e as orientações de A a E.

Método	Valores/ Orientações	Desvios Mecânicos do Sensor Estimados						Erro Absoluto					
		${}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{dsv}}$ (N)			${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{dsv}}$ (N m)			${}^S\hat{\mathbf{f}}_{\text{dsv}}$ (N)			${}^S\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{dsv}}$ (N m)		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
SRO	F1/A	-1,4	-0,3	0,6	-0,2	-0,9	-1,2	0	0	0	0	0	0
LRO	F1/B	-1,4	-0,3	0,6	-0,2	-0,9	-1,2	0	0	0	0	0	0
LRO	F1/C	-1,4	-0,3	0,599	-0,2	-0,9	-1,2	0	0	0,001	0	0	0
LRO	F1/D	-3,45	-2,159	2,228	-0,066	-1,099	-1,258	2,05	1,859	1,628	0,134	0,199	0,058
LRO	F2/E	3,498	-1,5	2,601	1,98	4,901	-7,8	0,002	0	0,001	0	0,001	0

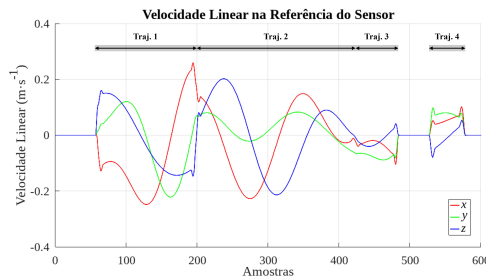
F1 e F2: valores a serem estimados (Tabela 5.2); de A a E: orientações consideradas para estimar os valores (Tabela 5.3).

5.4.2 Método de Compensação

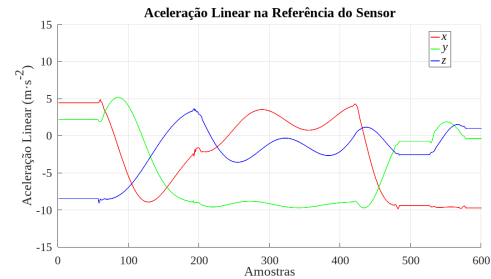
Esta subsecção descreve o processo utilizado para testar o método de compensação e, em seguida, apresenta os resultados obtidos desses testes.

Processo Utilizado para Testar o Método de Compensação

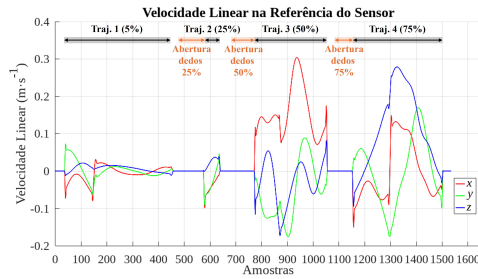
O método de compensação foi testado com as ferramentas barra cúbica e garra Robotiq 2F-85, considerando os valores estimados correspondentes a F1/A e F2/E, apresentados nas Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6. As componentes de F/B após a aplicação do método de compensação (${}^S\mathbf{f}_{\text{obj}}$, ${}^S\boldsymbol{\tau}_{\text{obj}}$) foram analisadas em quatro trajetórias aleatórias para cada ferramenta. No teste com a barra cúbica, as velocidades e acelerações lineares estão apresentadas nas Figuras 5.4a e 5.4b. No caso da garra Robotiq 2F-85, foi utilizada uma posição de abertura máxima dos dedos da garra diferente para cada trajetória: 5% para a trajetória 1, 25% para a trajetória 2, 50% para a trajetória 3 e 75% para a trajetória 4, com o objetivo de testar o método para várias posições dos dedos. As velocidades e acelerações lineares para essas trajetórias estão apresentadas nas Figuras 5.4c e 5.4d. As velocidades e acelerações lineares foram obtidas utilizando as bibliotecas `LinkStates` [170] e `libhector_gazebo_ros_imu` [171], respectivamente.



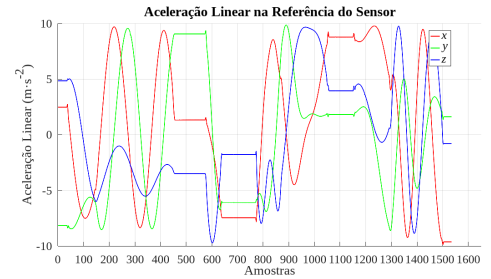
(a) Componentes de velocidade linear com a barra cúbica instalada no sensor.



(b) Componentes de aceleração linear com a barra cúbica instalada no sensor.



(c) Componentes de velocidade linear com a garra Robotiq 2F-85 instalada no sensor.



(d) Componentes de aceleração linear com a garra Robotiq 2F-85 instalada no sensor.

Figura 5.4: Componentes de velocidade e aceleração linear durante a execução das trajetórias de teste do método de compensação.

Resultados para Compensação das Componentes da Ferramenta e os Desvios Mecânicos

Os resultados obtidos para a compensação das componentes de F/B da barra cúbica, da garra Robotiq 2F-85 e os desvios mecânicos do sensor, estão apresentados nas Figuras 5.5 e 5.6.

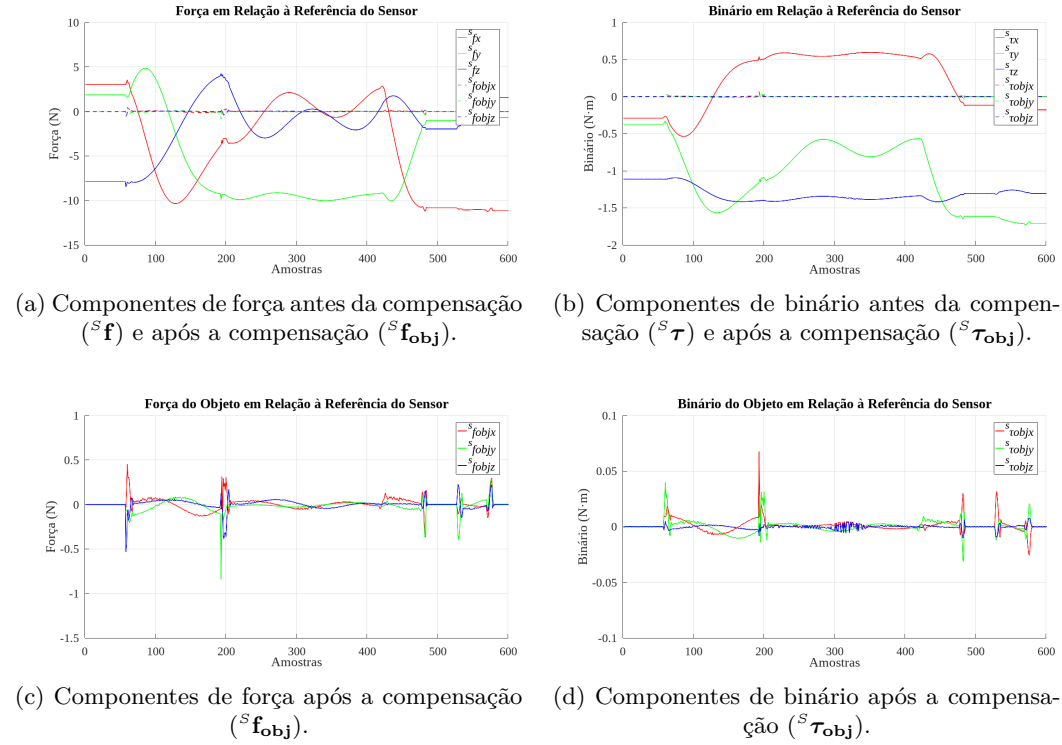


Figura 5.5: Componentes de força e binário durante a execução das trajetórias de teste do método de compensação, com a barra cúbica instalada no sensor.

Para a barra cúbica instalada no sensor, as Figuras 5.5a e 5.5b mostram, respectivamente, as componentes de F/B antes (${}^S\mathbf{f}$, ${}^S\boldsymbol{\tau}$) e após (${}^S\mathbf{f}_{obj}$, ${}^S\boldsymbol{\tau}_{obj}$) aplicar o método de compensação. Já nas Figuras 5.5c e 5.5d, são apresentadas em maior detalhe as componentes de F/B após compensação (${}^S\mathbf{f}_{obj}$, ${}^S\boldsymbol{\tau}_{obj}$). A análise das figuras permite concluir o correto funcionamento do método de compensação, que foi capaz de remover as componentes de F/B associadas à barra cúbica e aos desvios mecânicos do sensor, durante as tarefas de manipulação. Nas Figuras 5.5c e 5.5d, observam-se componentes de alta frequência, resultantes do início e fim das trajetórias, devido a componentes dinâmicas que não foram consideradas.

Para a garra Robotiq 2F-85 instalada no sensor, as Figuras 5.6a e 5.6b mostram, respectivamente, as componentes de F/B antes (${}^S\mathbf{f}$, ${}^S\boldsymbol{\tau}$) e após (${}^S\mathbf{f}_{obj}$, ${}^S\boldsymbol{\tau}_{obj}$) aplicar o método de compensação. Já nas Figuras 5.6c e 5.6d, as componentes de F/B

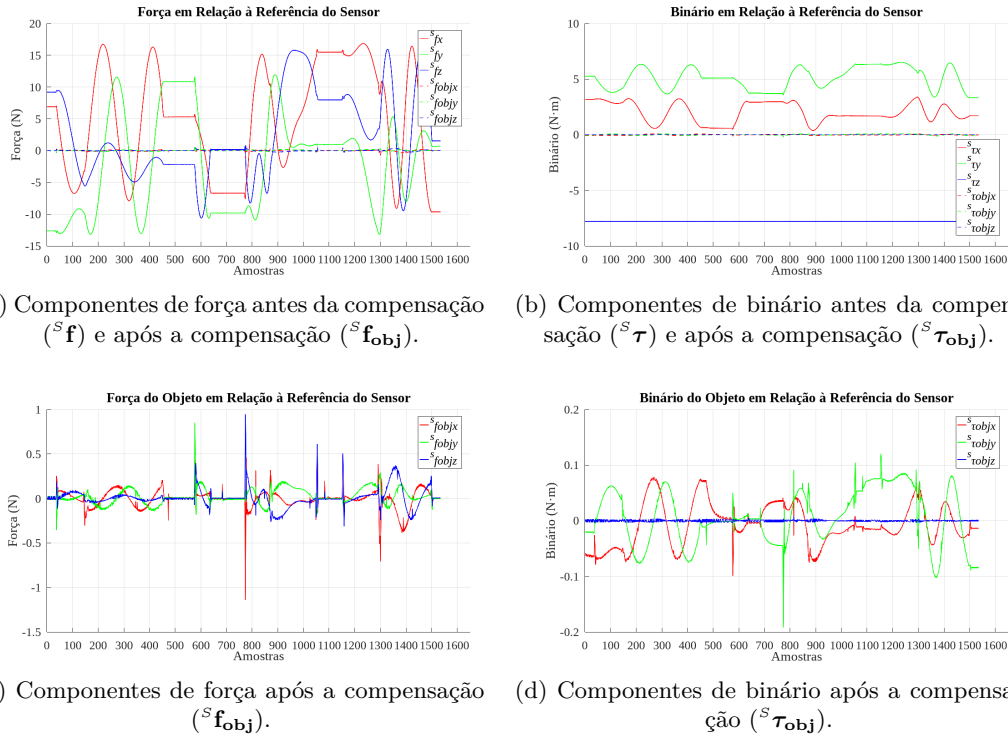


Figura 5.6: Componentes de força e binário durante a execução das trajetórias de teste do método de compensação, com a garra Robotiq 2F-85 instalada no sensor.

após compensação (${}^S\mathbf{f}_{obj}$, ${}^S\boldsymbol{\tau}_{obj}$) são apresentadas em maior detalhe. A análise das figuras permite concluir que o método de compensação funcionou corretamente, uma vez que as componentes de F/B após a compensação estão próximas de zero, como observado nas Figuras 5.6c e 5.6d. Para a posição de abertura dos dedos de 25% da abertura máxima (amostras aproximadamente entre 550 e 690), que corresponde à abertura considerada no método de calibração, o método de compensação apresentou os melhores resultados, com as componentes de F/B mais próximas de zero. As componentes de alta frequência resultam, tal como na ferramenta barra cúbica, do início e fim das trajetórias e também do movimento dos dedos, devido a dinâmicas não consideradas.

5.4.3 Filtragem do Sinal e Transformação das Componentes de F/B do Objeto para Uma Nova Referência

Esta subsecção descreve o processo utilizado para dimensionar o filtro passa-baixo digital aplicado na filtragem das componentes de F/B do objeto e, em seguida, apresenta os resultados da filtragem, bem como a transformação das componentes de F/B filtradas para uma nova referência.

Processo Utilizado para o Dimensionamento do Filtro Passa-Baixo

Após a validação do método de compensação apresentado na Subsecção 5.4.2, foi manipulado um objeto de 1 kg utilizando a garra Robotiq 2F-85. As componentes de F/B durante a tarefa de manipulação e após a compensação, ${}^S\mathbf{f}_{obj}$ e ${}^S\boldsymbol{\tau}_{obj}$, estão representadas na Figura 5.7. Observa-se a presença de componentes de alta frequência no sinal, associadas a efeitos dinâmicos não considerados e ao contacto entre o objeto e os dedos da garra.

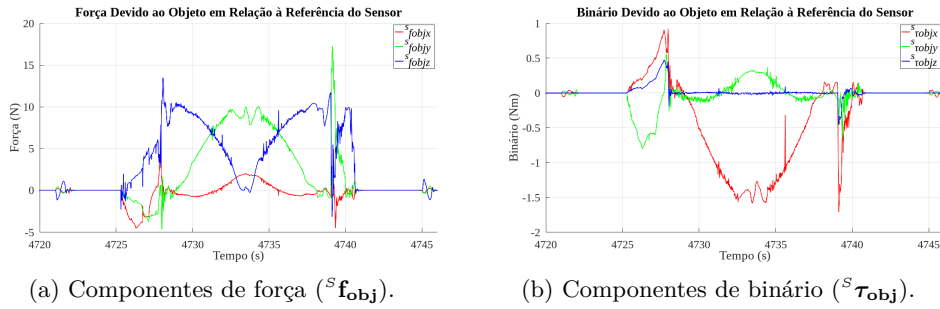


Figura 5.7: Componentes de força e binário do objeto de 1 kg manipulado pela garra Robotiq 2F-85.

De forma a atenuar as componentes não consideradas no método de compensação, propôs-se a utilização de um filtro digital Butterworth passa-baixo IIR de 3ª ordem, conforme descrito na Secção 5.2. O dimensionamento do filtro foi baseado na análise da resposta em frequência das componentes de F/B apresentadas na Figura 5.7, onde se verificou que a maior parte da informação associada ao efeito da gravidade sobre o objeto está concentrada entre 0 Hz e 1,5 Hz. Assim, foi projetado o filtro passa-baixo com uma frequência de corte de 1,5 Hz através do Octave, utilizando a função `butter` do pacote `signal` [172, 153].

Na Figura 5.8a, observa-se a resposta em amplitude e fase do filtro digital, com o eixo horizontal representado em frequência normalizada, que pode ser convertida para frequência analógica pela Equação 5.2 [153]. Na Figura 5.8b, são apresentados os zeros e polos do filtro no plano Z .

$$f = \frac{f_{norm}}{2} f_s \quad (5.2)$$

em que f é a frequência analógica, f_{norm} é a frequência normalizada entre 0 e 1 e f_s é a frequência de amostragem.

Os coeficientes **a** e **b** do filtro passa-baixo utilizados na implementação da Equação 5.1 estão apresentados na Equação 5.3, juntamente com a frequência de amostragem (f_s), a frequência de corte (f_c) e a ordem do filtro.

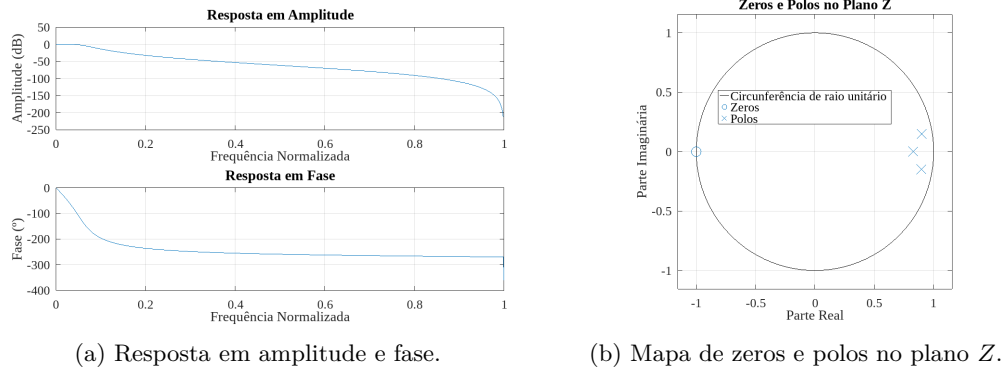


Figura 5.8: Resposta em amplitude e fase, e mapa de zeros e polos do filtro digital Butterworth passa-baixo IIR de 3ª ordem com frequência de corte de 1,5 Hz.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{a} &= [-2,62355 \ 2,31468 \ -0,68554] \\
 \mathbf{b} &= [0,00069935 \ 0,00209805 \ 0,00209805 \ 0,00069935] \\
 f_s &= 50 \text{ Hz} \\
 f_c &= 3 \text{ Hz} \\
 \text{ordem} &= 3
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

Resultados para a Filtragem e Transformação das Componentes de F/B Devidas ao Objeto

Os resultados da filtragem digital das componentes de F/B após a compensação (${}^S\mathbf{f}_{\text{obj}}$, ${}^S\boldsymbol{\tau}_{\text{obj}}$) e a sua transformação para uma nova referência $\{P\}$ (${}^P\mathbf{f}_{\text{obj}}$, ${}^P\boldsymbol{\tau}_{\text{obj}}$) estão apresentados na Figura 5.9.

Nas Figuras 5.9a e 5.9b são mostradas as componentes ${}^S\mathbf{f}_{\text{obj}}$ e ${}^S\boldsymbol{\tau}_{\text{obj}}$ filtradas, em que se observa a atenuação das componentes de alta frequência quando comparadas ao sinal antes da filtragem, apresentado nas Figuras 5.7a e 5.7b.

Nas Figuras 5.9c e 5.9d são representadas as componentes ${}^S\mathbf{f}_{\text{obj}}$ e ${}^S\boldsymbol{\tau}_{\text{obj}}$ filtradas na referência $\{P\}$, ${}^P\mathbf{f}_{\text{obj}}$ e ${}^P\boldsymbol{\tau}_{\text{obj}}$. Para validar o método, a posição da referência $\{P\}$ foi transladada para coincidir com o CoM do objeto manipulado, mantendo a mesma orientação que a referência do $\{S\}$. Desta forma, comprova-se o correto funcionamento da transformação, uma vez que, idealmente, não existem componentes de binário no CoM do objeto e as forças mantêm o mesmo valor da referência $\{S\}$, considerando apenas o efeito da gravidade sobre o objeto. O objetivo é representar as componentes de F/B num ponto de prensão, permitindo ajustar a força de prensão com base nessas componentes.

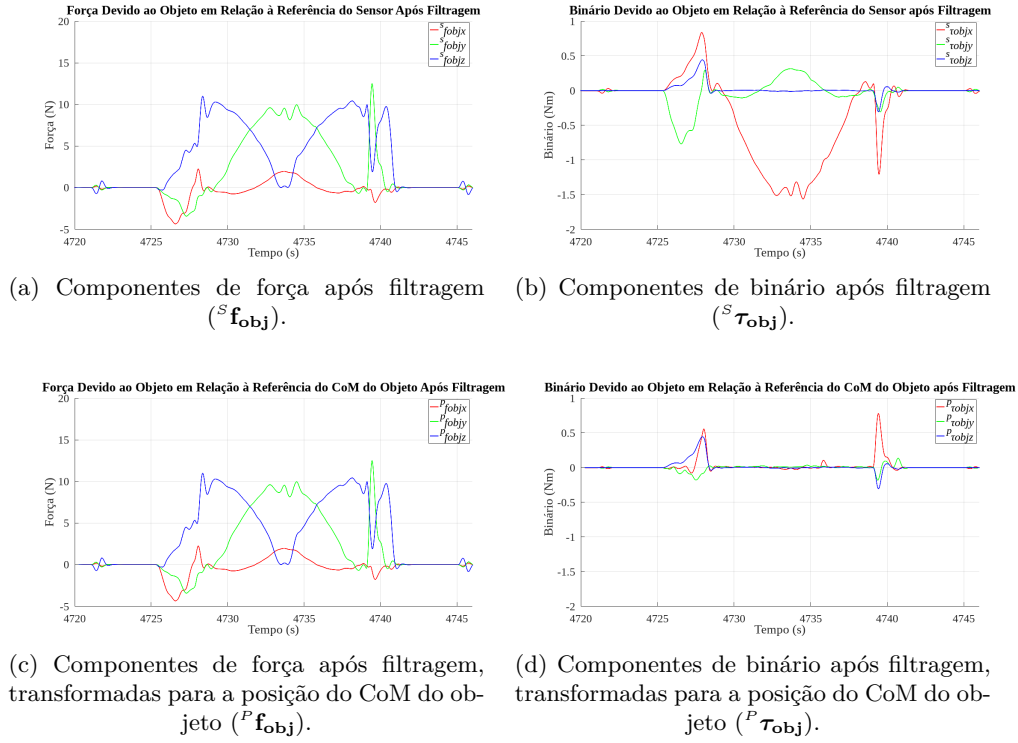


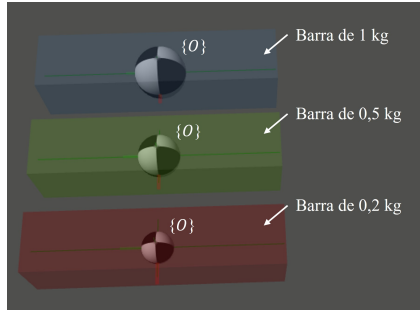
Figura 5.9: Componentes de força e binário do objeto de 1 kg manipulado pela garra Robotiq 2F-85, após filtragem e transformadas para a posição do CoM do objeto.

5.4.4 Informações sobre o Contacto e o Objeto

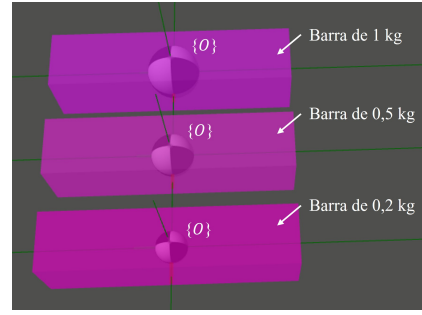
Esta subsecção descreve, inicialmente, a configuração do espaço de trabalho e dos objetos utilizados nas tarefas de manipulação para testar os métodos de obtenção das informações sobre o contacto e o objeto. Em seguida, são apresentados os resultados desses métodos durante a manipulação dos objetos.

Configuração do Espaço de Trabalho e dos Objetos

Para testar os métodos para obtenção das informações sobre o contacto e o objeto, foram manipulados três objetos rígidos com diferentes propriedades físicas: uma barra de 0,2 kg, uma barra de 0,5 kg e uma barra de 1 kg, conforme apresentado na Figura 5.10. Os objetos foram modelados através do *Model Editor* [173] no Gazebo, e as suas propriedades físicas foram automaticamente definidas pelo simulador, o que é possível para objetos com geometrias simples. Assim como nas pontas dos dedos da ferramenta, foi considerada a física de contacto, conforme discutido por Hoorn [163]. A origem da referência de cada objeto $\{O\}$ coincide com a posição do seu CoM e segue a orientação mostrada na Figura 5.10a.



(a) Representação do CoM e das referências dos objetos.

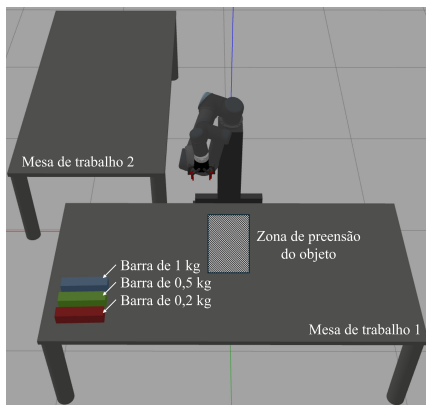


(b) Representação da inércia dos objetos.

Figura 5.10: Objetos utilizados para teste dos métodos de obtenção das informações sobre o contacto e o objeto.

A disposição do espaço de trabalho do manipulador robótico está representada na Figura 5.11a. O manipulador foi posicionado com um deslocamento de 1 m no eixo Z , em relação à referência do mundo do Gazebo. Considerou-se a garra Robotiq 2F-85 (F2), juntamente com os respetivos desvios angulares e mecânicos apresentados na Tabela 5.2. Foram aplicados o método de compensação e a filtragem digital para obter as componentes do objeto durante as tarefas de manipulação (${}^S\mathbf{f}_{\text{obj}}$, ${}^S\boldsymbol{\tau}_{\text{obj}}$).

A disposição do objeto no momento da preensão é tal que a referência do objeto $\{O\}$ possui a mesma orientação da referência da ferramenta $\{F\}$, que, por sua vez, coincide com a referência do sensor $\{S\}$, como mostrado na Figura 5.11b. Desta forma, é possível obter a posição e a orientação do objeto em relação às referências $\{S\}$ e $\{F\}$ durante a tarefa de manipulação, utilizando a biblioteca `GetModelState` [174]. Assim, é possível testar o método de estimativa do CoM e da orientação unidimensional do objeto, conforme discutido na Subsecção 4.6.1.



(a) Disposição do espaço de trabalho.

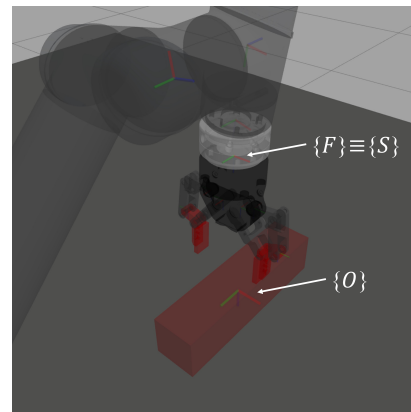
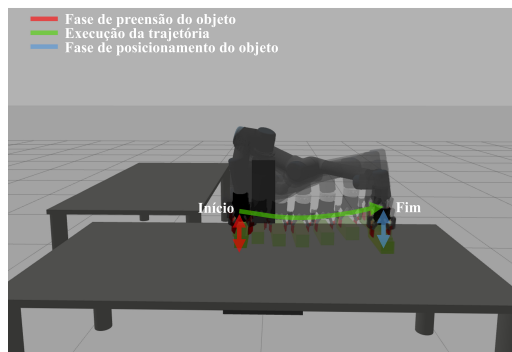
(b) Referências da ferramenta $\{F\}$, do sensor $\{S\}$ e do objeto $\{O\}$ consideradas, momento antes da preensão do objeto.

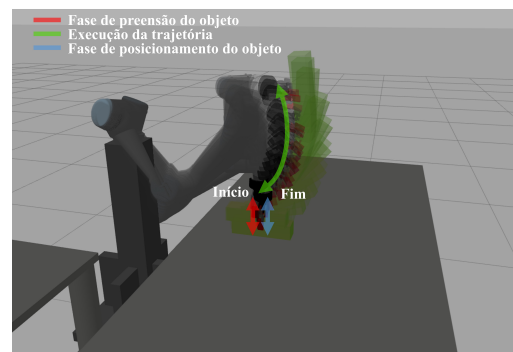
Figura 5.11: Espaço de trabalho do manipulador robótico no simulador Gazebo.

Para testar os métodos de obtenção das informações sobre o contacto e o objeto, além dos três objetos, foram consideradas quatro tarefas de manipulação com diferentes trajetórias e complexidades, conforme ilustradas na Figura 5.12. Nas tarefas n.º 1, 2 e 3, mostradas nas Figuras 5.12a, 5.12b e 5.12c respectivamente, o objetivo é não existir escorregamento entre o objeto e os dedos, realizando a preensão próxima ao CoM do objeto. Na tarefa n.º 4, ilustrada na Figura 5.12d, a preensão é realizada com um deslocamento em relação ao CoM, permitindo o escorregamento. Além disso, durante a execução da trajetória, a abertura dos dedos foi variada, o que alterou a força de preensão e permitiu, ou não, a ocorrência de escorregamento. Para mais detalhes sobre os movimentos do manipulador robótico, recomenda-se a visualização dos vídeos das trajetórias¹.

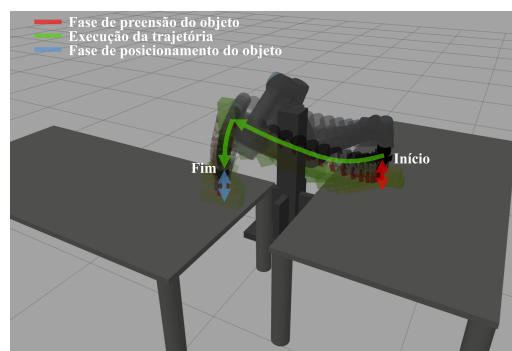
A manipulação de vários objetos, associada a trajetórias de diferentes complexidades e à presença ou ausência de escorregamento, permite avaliar os métodos sob diversas condições, testando o seu desempenho em diferentes cenários de preensão e manipulação.



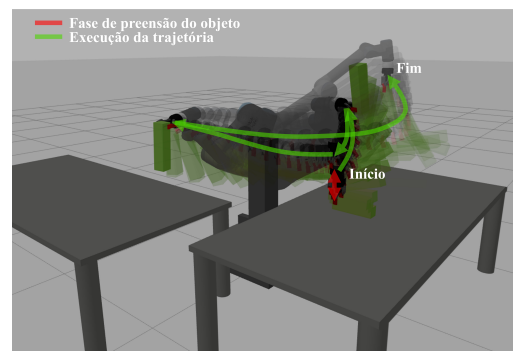
(a) Tarefa de manipulação n.º 1.



(b) Tarefa de manipulação n.º 2.



(c) Tarefa de manipulação n.º 3.



(d) Tarefa de manipulação n.º 4.

Figura 5.12: Tarefas de manipulação consideradas para teste dos métodos de obtenção das informações sobre o contacto e o objeto.

¹Vídeos das tarefas de manipulação disponíveis em: <https://www.youtube.com/@FilipeCampos-r9m>

Os parâmetros utilizados nos métodos para obtenção das informações estão apresentados na Tabela 5.7. Para a estimativa da posição do CoM do objeto, utilizando a técnica de *Singular Value Decomposition* (SVD), foram consideradas 24 observações dos vetores ${}^s\hat{\tau}_{obj}$ e ${}^s\hat{f}_{obj}$ nas tarefas n.º 1, 2 e 3 e 48 observações na tarefa n.º 4. Os parâmetros foram selecionados com base em várias experiências, nas quais se observou a melhor resposta, que será apresentada a seguir.

Tabela 5.7: Parâmetros utilizados nos métodos para obtenção das informações sobre o contacto e o objeto.

	Escorreg. Total	Deteção de Objeto	Classificação do Objeto	Posição do CoM
Limiar/Tolerância	0,01 m	0,1 kg	$\pm 0,05$ kg	-
Frequência	2 Hz	8 Hz		

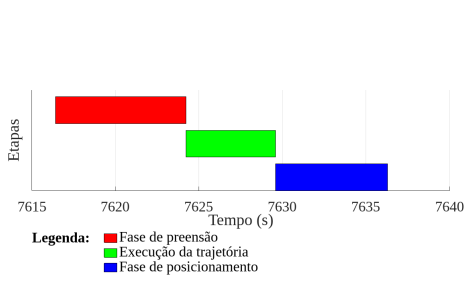
Resultados Obtidos na Manipulação dos Objetos

Os resultados estão organizados por objeto: inicialmente serão apresentados os resultados da manipulação da barra de 0,2 kg (Figuras 5.13 e 5.14), seguidos pelos resultados da barra de 0,5 kg (Figuras 5.15 e 5.16) e, por fim, da barra de 1 kg (Figuras 5.17 e 5.18).

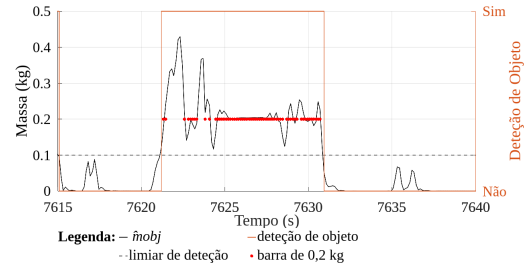
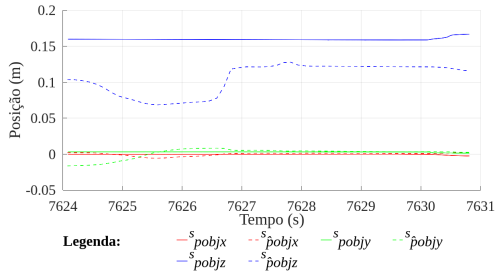
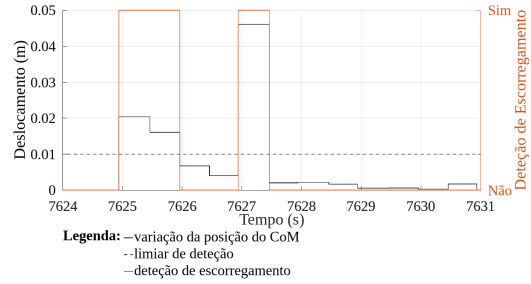
Para cada objeto são apresentados os resultados de cada tarefa de manipulação (de n.º 1 a n.º 4), organizados em quatro gráficos. O primeiro gráfico mostra a sequência temporal da tarefa de manipulação; no segundo gráfico apresenta-se a estimativa da massa do objeto (m_{obj}), a deteção e a classificação do objeto durante toda a tarefa de manipulação. O terceiro gráfico exibe a posição real (${}^s\mathbf{p}_{obj}$) e estimada (${}^s\hat{\mathbf{p}}_{obj}$) do CoM do objeto. Por fim, no quarto gráfico é apresentada a variação da posição do CoM do objeto e a deteção de escorregamento.

Resultados para a Barra de 0,2 kg

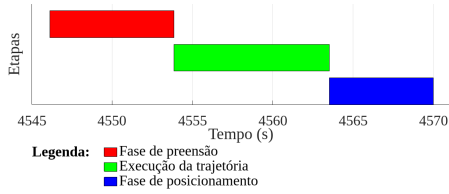
Os resultados obtidos para a manipulação da barra de 0,2 kg nas quatro trajetórias podem ser observados nas Figuras 5.13 e 5.14.



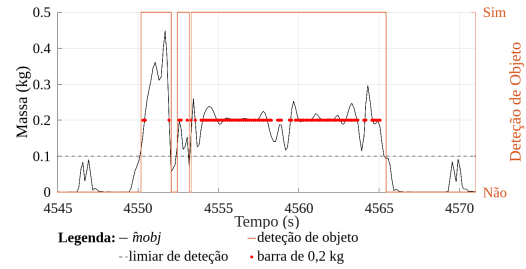
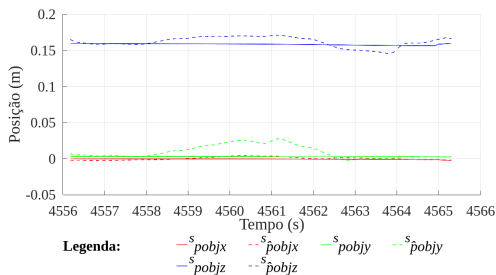
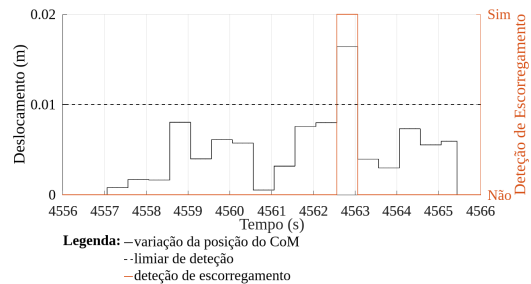
(a) Sequência temporal da tarefa de manipulação n.º 1.

(b) Estimativa da massa ($\hat{m}_{obj}$), detecção e classificação do objeto durante a tarefa de manipulação n.º 1.(c) Componentes da posição real (s_{Pobj}) e estimada ($s_{\hat{Pobj}}$) do CoM do objeto, durante a tarefa de manipulação n.º 1.

(d) Estimativa da detecção de escorregamento entre o objeto e os dedos durante a tarefa de manipulação n.º 1.

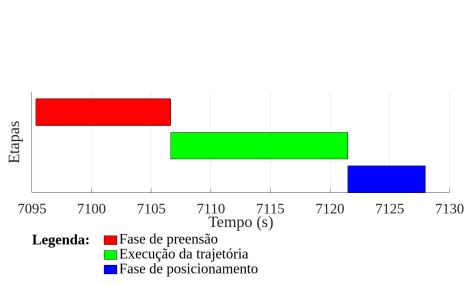


(e) Sequência temporal da tarefa de manipulação n.º 2.

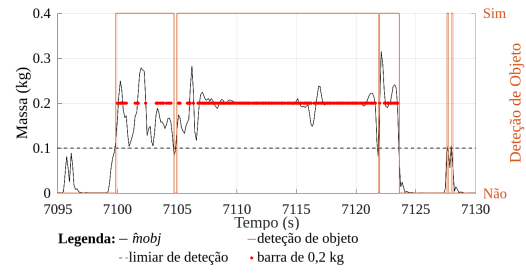
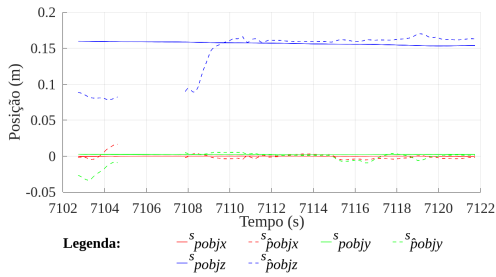
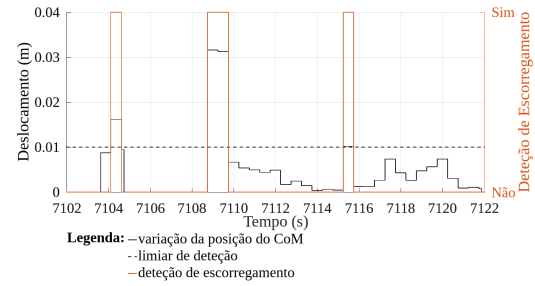
(f) Estimativa da massa ($\hat{m}_{obj}$), detecção e classificação do objeto durante a tarefa de manipulação n.º 2.(g) Componentes da posição real (s_{Pobj}) e estimada ($s_{\hat{Pobj}}$) do CoM do objeto, durante a tarefa de manipulação n.º 2.

(h) Estimativa da detecção de escorregamento entre o objeto e os dedos durante a tarefa de manipulação n.º 2.

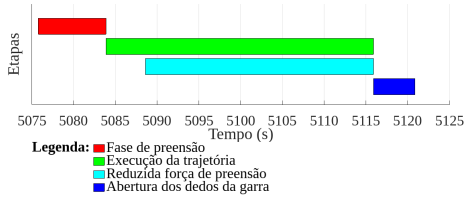
Figura 5.13: Resultados obtidos para o método de obtenção de informações sobre o contacto e o objeto durante as tarefas de manipulação n.º 1 e 2, manipulando a barra de 0,2 kg com a garra Robotiq 2F-85.



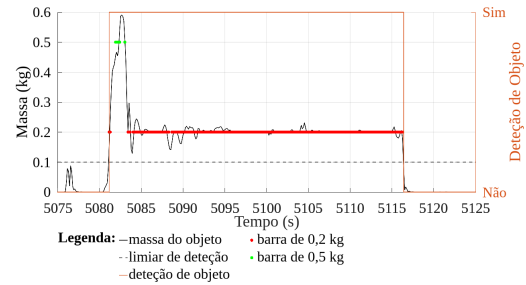
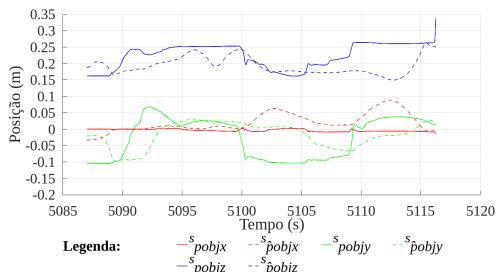
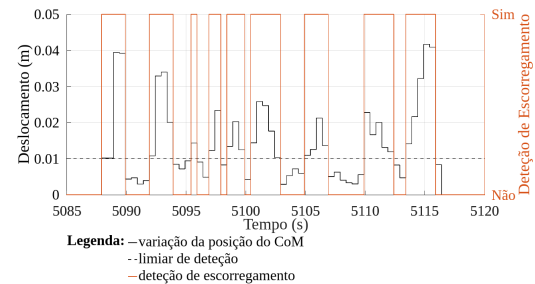
(a) Sequência temporal da tarefa de manipulação n.º 3.

(b) Estimativa da massa ($\hat{m}_{obj}$), detecção e classificação do objeto durante a tarefa de manipulação n.º 3.(c) Componentes da posição real (s_{pobj}) e estimada ($\hat{s}_{pobj}$) do CoM do objeto, durante a tarefa de manipulação n.º 3.

(d) Estimativa da detecção de escorregamento entre o objeto e os dedos durante a tarefa de manipulação n.º 3.



(e) Sequência temporal da tarefa de manipulação n.º 4.

(f) Estimativa da massa ($\hat{m}_{obj}$), detecção e classificação do objeto durante a tarefa de manipulação n.º 4.(g) Componentes da posição real (s_{pobj}) e estimada ($\hat{s}_{pobj}$) do CoM do objeto, durante a tarefa de manipulação n.º 4.

(h) Estimativa da detecção de escorregamento entre o objeto e os dedos durante a tarefa de manipulação n.º 4.

Figura 5.14: Resultados obtidos para o método de obtenção de informações sobre o contacto e o objeto durante as tarefas de manipulação n.º 3 e 4, manipulando a barra de 0,2 kg com a garra Robotiq 2F-85.

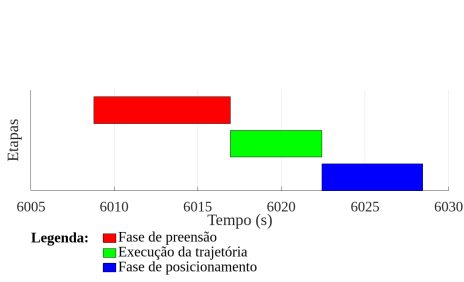
Na estimativa da massa do objeto ($\hat{m}_{obj}$), conforme mostrado nas Figuras 5.13b, 5.13f, 5.14b e 5.14f, observa-se que, durante a execução das trajetórias, os valores de $\hat{m}_{obj}$ tendem a estabilizar em 0,2 kg, correspondente à massa do objeto manipulado, mesmo na presença de escorregamento, como observado na tarefa n.º 4 (Figura 5.14f). Nota-se uma variação em $\hat{m}_{obj}$ durante as fases de prensão e posicionamento do objeto, resultante das interações com o ambiente, não previstas no algoritmo. O objeto é detetado durante a fase de prensão, havendo momentos em que deixa de ser detetado devido às variações em $\hat{m}_{obj}$. O objeto permanece detetado durante a execução da trajetória, em que não ocorrem colisões entre o conjunto garra e objeto com o ambiente, e deixa de ser detetado durante a fase de posicionamento, quando já não está a ser manipulado, como esperado. O objeto é classificado corretamente durante a execução da trajetória, sendo identificada a barra de 0,2 kg, embora a classificação tenda a mudar durante as fases de prensão e posicionamento devido às variações em $\hat{m}_{obj}$, resultantes de colisões não consideradas.

A estimativa da posição do CoM tende a convergir para o valor real durante a execução das trajetórias, conforme mostrado nas Figuras 5.13c, 5.13g, 5.14c e 5.14g, nas quais não ocorrem colisões com o ambiente. O cálculo da estimativa é iniciado após a deteção do objeto, aguardando o preenchimento do *buffer* com as observações de F/B, o que causa um atraso na estimativa logo após a deteção do objeto. Além disso, nas estimativas iniciais, há um desvio considerável entre a posição real e a estimada, causado pela inclusão das amostras de F/B durante a fase de prensão, uma vez que o objeto é detetado nessa fase. Na trajetória n.º 1, Figura 5.13c, a estimativa tende a estabilizar após os instantes iniciais, apresentando um desvio na direção Z, sugerindo que, para movimentos simples em que não há rotação do punho do robô, a estimativa apresenta desvios. Já na trajetória n.º 4, a estimativa tende a acompanhar o valor real após o escorregamento, embora apresente um atraso na estimativa, devido ao tamanho do *buffer* e à frequência de cálculo.

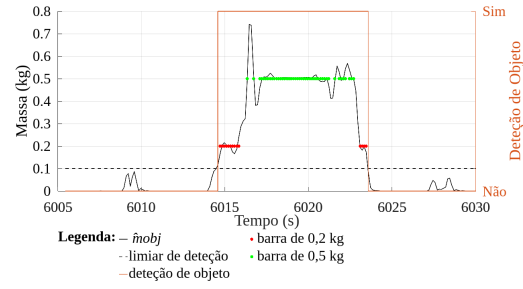
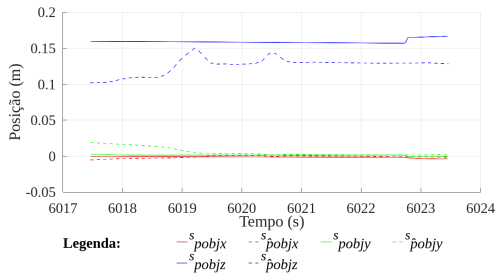
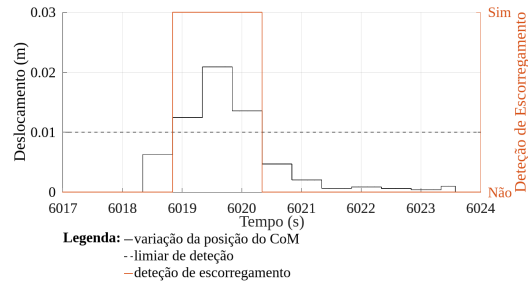
Os resultados para a deteção de escorregamento estão apresentados nas Figuras: 5.13d, 5.13h, 5.14d e 5.14h. Nas tarefas onde não ocorre escorregamento, o algoritmo não deteta escorregamento durante a execução da trajetória, como previsto, com exceção das tarefas n.º 2 e n.º 3 (Figuras 5.13h e 5.14d), nas quais foram detetados dois falsos positivos. Na tarefa n.º 4, o escorregamento é corretamente detetado após a redução da força de prensão. Em todas as trajetórias, nos instantes iniciais, é detetado escorregamento, apesar de este não ocorrer, devido às variações na estimativa da posição do CoM nesse período, causadas pela inclusão das amostras de F/B durante a fase de prensão, como referido anteriormente.

Resultados para a Barra de 0,5 kg

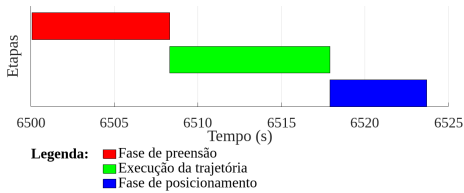
Os resultados obtidos para a manipulação da barra de 0,5 kg nas quatro trajetórias podem ser observados nas Figuras 5.15 e 5.16.



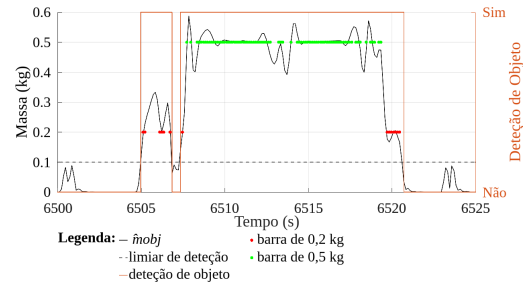
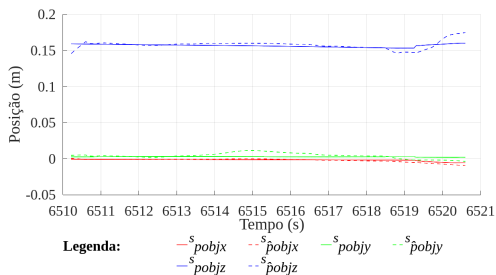
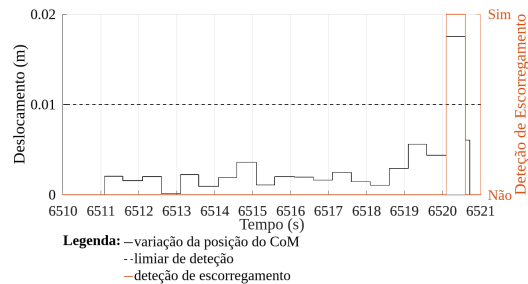
(a) Sequência temporal da tarefa de manipulação n.º 1.

(b) Estimativa da massa ($\hat{m}_{obj}$), detecção e classificação do objeto durante a tarefa de manipulação n.º 1.(c) Componentes da posição real (s_{Pobj}) e estimada ($s_{\hat{Pobj}}$) do CoM do objeto, durante a tarefa de manipulação n.º 1.

(d) Estimativa da detecção de escorregamento entre o objeto e os dedos durante a tarefa de manipulação n.º 1.

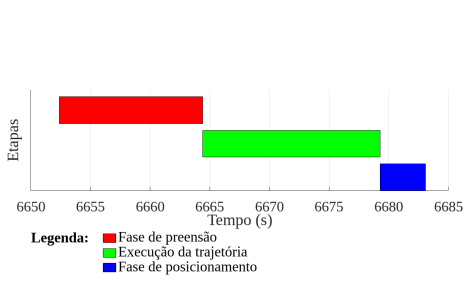


(e) Sequência temporal da tarefa de manipulação n.º 2.

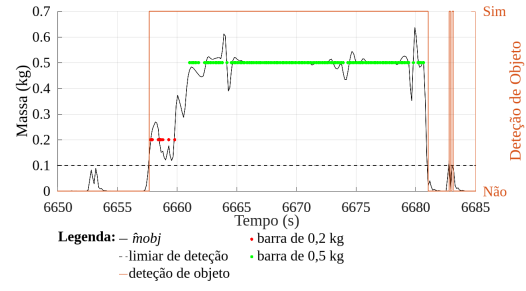
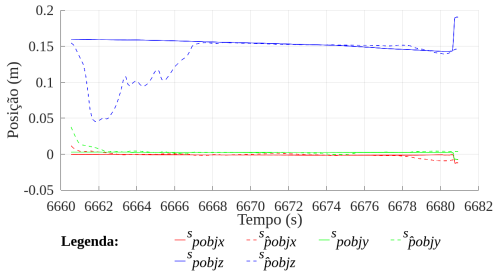
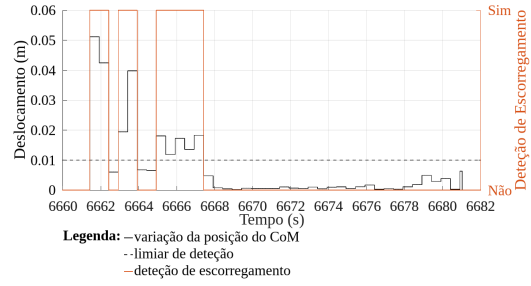
(f) Estimativa da massa ($\hat{m}_{obj}$), detecção e classificação do objeto durante a tarefa de manipulação n.º 2.(g) Componentes da posição real (s_{Pobj}) e estimada ($s_{\hat{Pobj}}$) do CoM do objeto, durante a tarefa de manipulação n.º 2.

(h) Estimativa da detecção de escorregamento entre o objeto e os dedos durante a tarefa de manipulação n.º 2.

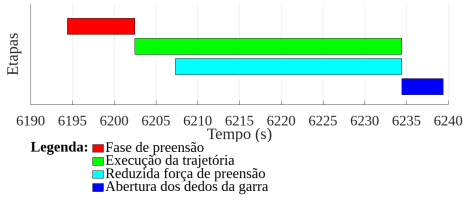
Figura 5.15: Resultados obtidos para o método de obtenção de informações sobre o contacto e o objeto durante as tarefas de manipulação n.º 1 e 2, manipulando a barra de 0,5 kg com a garra Robotiq 2F-85.



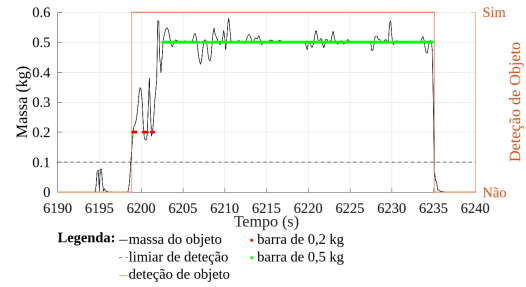
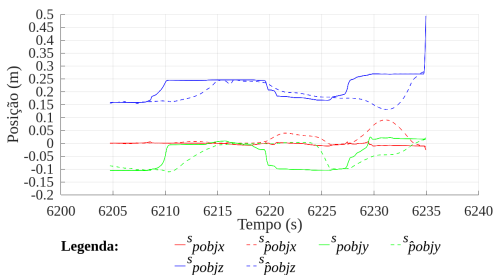
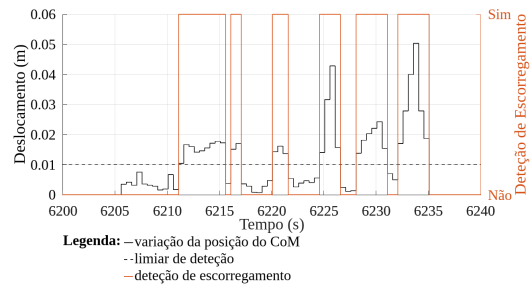
(a) Sequência temporal da tarefa de manipulação n.º 3.

(b) Estimativa da massa ($\hat{m}_{obj}$), detecção e classificação do objeto durante a tarefa de manipulação n.º 3.(c) Componentes da posição real (s_{Pobj}) e estimada ($\hat{s}_{Pobj}$) do CoM do objeto, durante a tarefa de manipulação n.º 3.

(d) Estimativa da detecção de escorregamento entre o objeto e os dedos durante a tarefa de manipulação n.º 3.



(e) Sequência temporal da tarefa de manipulação n.º 4.

(f) Estimativa da massa ($\hat{m}_{obj}$), detecção e classificação do objeto durante a tarefa de manipulação n.º 4.(g) Componentes da posição real (s_{Pobj}) e estimada ($\hat{s}_{Pobj}$) do CoM do objeto, durante a tarefa de manipulação n.º 4.

(h) Estimativa da detecção de escorregamento entre o objeto e os dedos durante a tarefa de manipulação n.º 4.

Figura 5.16: Resultados obtidos para o método de obtenção de informações sobre o contacto e o objeto durante as tarefas de manipulação n.º 3 e 4, manipulando a barra de 0,5 kg com a garra Robotiq 2F-85.

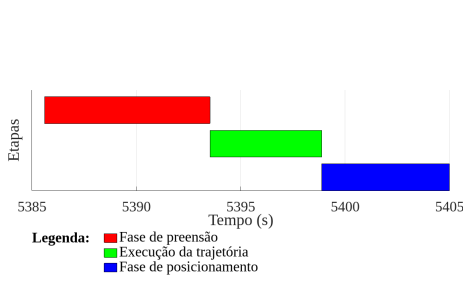
Os resultados são semelhantes aos apresentados para a barra de 0,2 kg. A estimativa da massa do objeto $\hat{m}_{obj}$ tende a convergir para o valor correto durante a execução da trajetória, apresentando oscilações nas fases de preensão e posicionamento, como esperado. O objeto é detetado no início da fase de preensão e permanece detetado durante a execução da trajetória até ser posicionado. No entanto, há momentos em que o objeto deixa de ser detetado devido a variações em $\hat{m}_{obj}$, como ocorreu com a barra de 0,2 kg. O objeto é corretamente classificado durante a execução da trajetória. A classificação tende a ser imprecisa durante as fases de preensão e posicionamento, uma vez que, nessas fases, o objeto está em contacto com o ambiente.

A estimativa da posição do CoM converge para o valor real durante a execução da trajetória, após a fase de preensão, como observado com a barra de 0,2 kg. No entanto, verifica-se que há menos variações na estimativa do CoM em comparação com a barra de 0,2 kg, o que sugere que o aumento da massa do objeto melhora a precisão da estimativa do CoM.

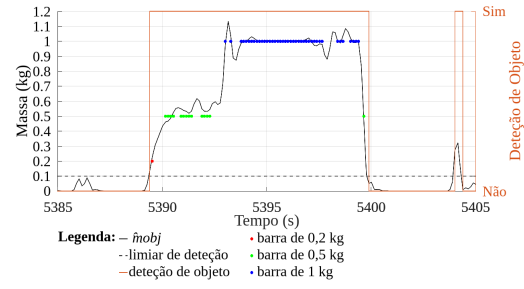
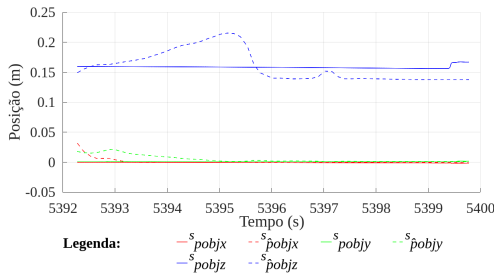
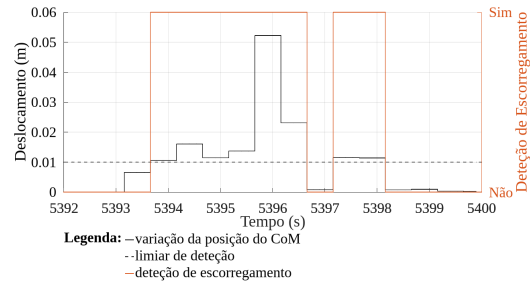
Durante a execução das trajetórias n.º 1, 2 e 3, nas quais não ocorre escorregamento, o algoritmo não deteta escorregamento durante a execução da trajetória, confirmando o seu bom funcionamento. No entanto, o algoritmo tende a detetar escorregamento durante as fases de preensão e posicionamento, bem como nos instantes iniciais da execução da trajetória, como observado no caso da manipulação da barra de 0,2 kg, uma vez que ainda são consideradas amostras de F/B da fase de preensão para a estimativa do CoM, resultando em variações. Na trajetória n.º 4 o algoritmo consegue detetar corretamente o escorregamento durante a execução da trajetória.

Resultados para a Barra de 1 kg

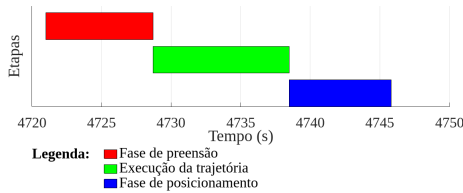
Os resultados obtidos para a manipulação da barra de 1 kg nas quatro trajetórias podem ser observados nas Figuras 5.17 e 5.18.



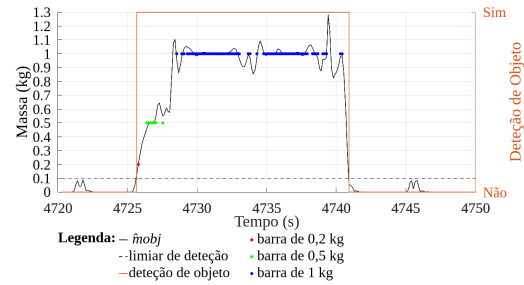
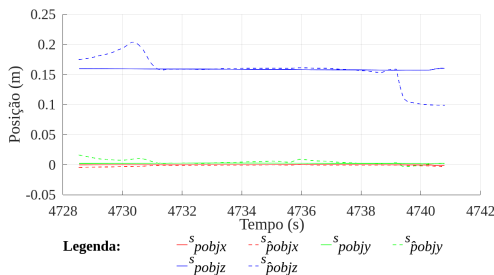
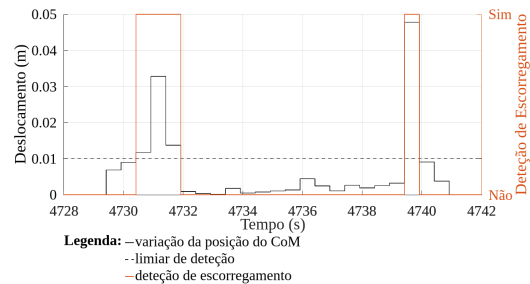
(a) Sequência temporal da tarefa de manipulação n.º 1.

(b) Estimativa da massa ($\hat{m}_{obj}$), detecção e classificação do objeto durante a tarefa de manipulação n.º 1.(c) Componentes da posição real (s_{pobj}) e estimada ($\hat{s}_{pobj}$) do CoM do objeto, durante a tarefa de manipulação n.º 1.

(d) Estimativa da detecção de escorregamento entre o objeto e os dedos durante a tarefa de manipulação n.º 1.

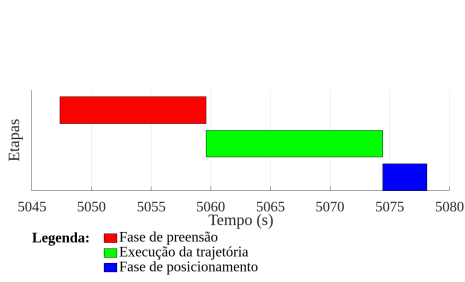


(e) Sequência temporal da tarefa de manipulação n.º 2.

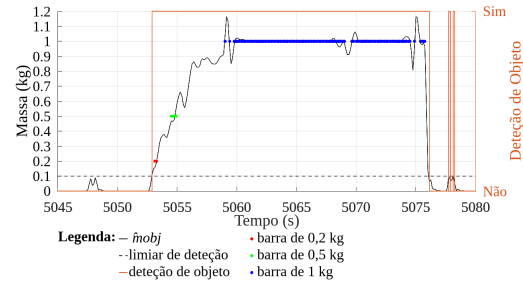
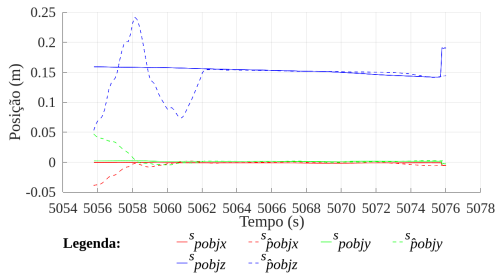
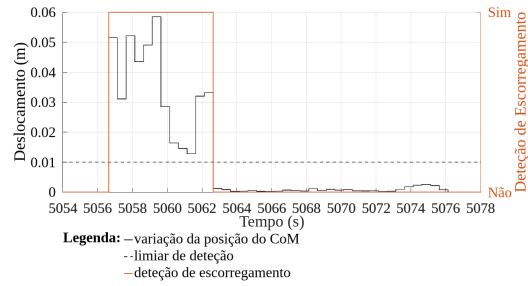
(f) Estimativa da massa ($\hat{m}_{obj}$), detecção e classificação do objeto durante a tarefa de manipulação n.º 2.(g) Componentes da posição real (s_{pobj}) e estimada ($\hat{s}_{pobj}$) do CoM do objeto, durante a tarefa de manipulação n.º 2.

(h) Estimativa da detecção de escorregamento entre o objeto e os dedos durante a tarefa de manipulação n.º 2.

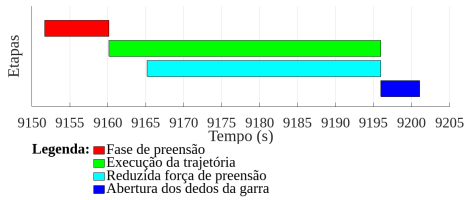
Figura 5.17: Resultados obtidos para o método de obtenção de informações sobre o contacto e o objeto durante as tarefas de manipulação n.º 1 e 2, manipulando a barra de 1 kg com a garra Robotiq 2F-85.



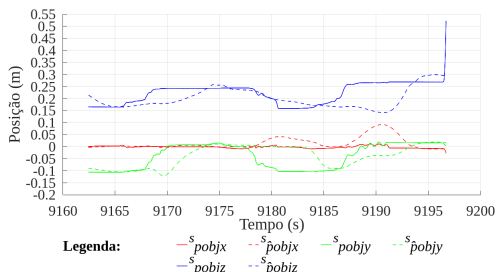
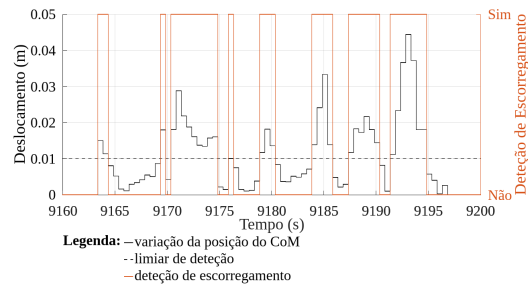
(a) Sequência temporal da tarefa de manipulação n.º 3.

(b) Estimativa da massa ($\hat{m}_{obj}$), detecção e classificação do objeto durante a tarefa de manipulação n.º 3.(c) Componentes da posição real (s_{Pobj}) e estimada ($s_{\hat{Pobj}}$) do CoM do objeto, durante a tarefa de manipulação n.º 3.

(d) Estimativa da detecção de escorregamento entre o objeto e os dedos durante a tarefa de manipulação n.º 3.



(e) Sequência temporal da tarefa de manipulação n.º 4.

(f) Estimativa da massa ($\hat{m}_{obj}$), detecção e classificação do objeto durante a tarefa de manipulação n.º 4.(g) Componentes da posição real (s_{Pobj}) e estimada ($s_{\hat{Pobj}}$) do CoM do objeto, durante a tarefa de manipulação n.º 4.

(h) Estimativa da detecção de escorregamento entre o objeto e os dedos durante a tarefa de manipulação n.º 4.

Figura 5.18: Resultados obtidos para o método de obtenção de informações sobre o contacto e o objeto durante as tarefas de manipulação n.º 3 e 4, manipulando a barra de 1 kg com a garra Robotiq 2F-85.

Para o objeto de 1 kg, os resultados seguem a mesma tendência dos anteriores. A estimativa da massa do objeto tende a convergir para o valor real durante a execução da trajetória, o objeto é detetado durante a fase de preensão e até ao seu posicionamento, e a classificação do objeto é corretamente realizada durante a execução da trajetória.

Na estimativa da posição do CoM, os valores convergem para os valores reais durante a execução da trajetória, com menos variações após as estimativas iniciais, quando comparado com a barra de 0,2 kg. Em comparação com a barra de 0,5 kg, as variações são ainda menores, embora menos evidentes.

Quanto à deteção de escorregamento, o algoritmo não deteta escorregamento durante a execução das trajetórias em que este não ocorre, identificando-o apenas nos instantes iniciais devido às variações da posição do CoM, como referido anteriormente. Na tarefa n.º 4, onde ocorre escorregamento, o algoritmo deteta-o corretamente, comprovando o seu bom funcionamento. No entanto, tal como na manipulação das barras de 0,2 kg e 0,5 kg, durante as fases de preensão e posicionamento, as estimativas do algoritmo tendem a desviar-se dos valores reais, uma vez que há colisões que não são previstas por este algoritmo.

Conclusões Finais sobre os Resultados da Manipulação dos Objetos e Sugestões de Melhoria

Os métodos de obtenção das informações sobre o contacto e o objeto apresentam bons resultados durante a execução das trajetórias, mas tendem a ser menos precisos durante as fases de preensão e posicionamento, devido às colisões que não são previstas pelos métodos.

O início da estimativa da posição do CoM do objeto é determinado pela deteção do objeto. No entanto, durante a fase de preensão, o objeto já é detetado, o que leva à inclusão de amostras dessa fase, provocando desvios na estimativa nos instantes iniciais e resultando na deteção de escorregamento inexistente. Além disso, a classificação do objeto começa logo após a sua deteção, o que pode levar à classificação incorreta, uma vez que o objeto ainda está em contacto com o ambiente, e o valor de m_{obj} ainda não se aproxima do valor real da sua massa.

Diante disso, sugerem-se algumas melhorias, tais como, identificar o início e o fim da execução da trajetória, quando não há mais colisões entre a garra e o objeto com o ambiente. Isso pode ser feito verificando o momento em que m_{obj} apresenta variações mínimas e o momento em que m_{obj} volta a apresentar variações. Após a identificação do primeiro instante, recomenda-se que a classificação do objeto e a estimativa do CoM comecem a partir desse ponto e continuem até o instante final. Dessa forma, evita-se a consideração de observações de F/B durante as fases de preensão e posicionamento, que não são previstas pelos métodos.

Por fim, na tarefa de manipulação n.º 1, verificaram-se desvios no eixo Z durante a estimativa da posição do CoM. Sugere-se, portanto, a realização de mais testes com trajetórias simples, para avaliar quais delas não devem ser consideradas na estimativa.

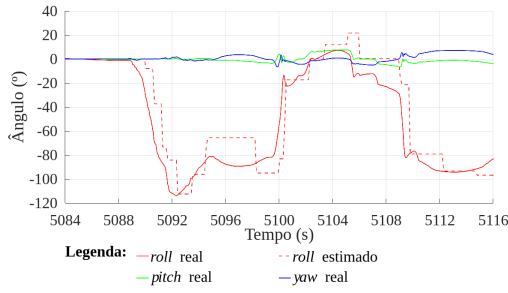
Resultados Obtidos para a Estimativa da Orientação Unidimensional do Objeto

A orientação unidimensional do objeto manipulado foi estimada através da abordagem descrita na Subsecção 4.6.1. A seleção dos melhores parâmetros utilizados no algoritmo, apresentado nas Figuras 4.11 e 4.12, foi realizada com base na atribuição de diferentes valores, seguida da análise dos resultados obtidos na estimativa da orientação unidimensional do objeto durante a tarefa de manipulação n.º 4, com escorregamento. Os testes foram realizados individualmente para cada uma das três barras, considerando tanto a posição real (${}^s\mathbf{p}_{\text{obj}}$) quanto a estimada (${}^s\hat{\mathbf{p}}_{\text{obj}}$) do CoM do objeto. A melhor estimativa da orientação resultou nos valores dos parâmetros apresentados na Tabela 5.8 e nos resultados mostrados na Figura 5.19.

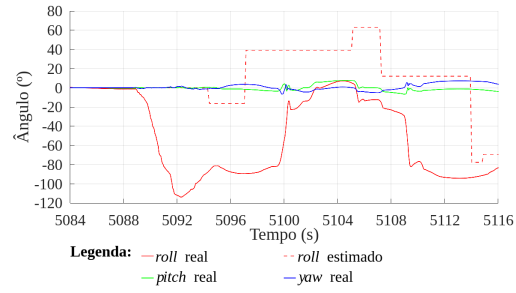
Tabela 5.8: Parâmetros utilizados no algoritmo para estimar a orientação unidimensional do objeto manipulado.

	f_s (Hz)	t_d (m)	t_y (rad)	t_p (amostras)
${}^s\mathbf{p}_{\text{obj}}$	8	0,003	0,7	5
${}^s\hat{\mathbf{p}}_{\text{obj}}$	8	0,013	0,7	5

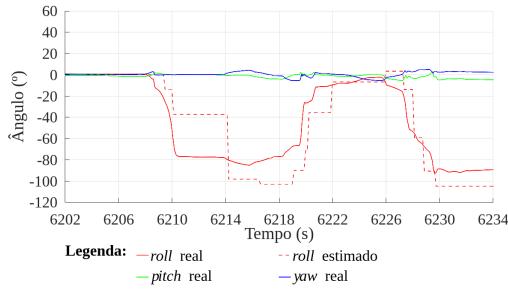
Os resultados para a estimativa da orientação unidimensional, considerando a posição real (${}^s\mathbf{p}_{\text{obj}}$) do CoM do objeto, para as barras de 0,2 kg, 0,5 kg e 1 kg, estão apresentados nas Figuras 5.19a, 5.19c e 5.19e, respetivamente. Já os resultados para a estimativa da orientação unidimensional, considerando a posição estimada (${}^s\hat{\mathbf{p}}_{\text{obj}}$) do CoM do objeto, para as barra de 0,2 kg, 0,5 kg e 1 kg, estão apresentados nas Figuras 5.19b, 5.19d e 5.19f, respetivamente.



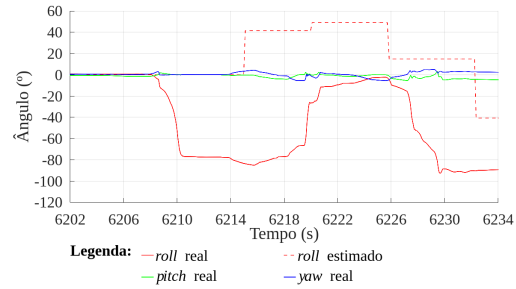
(a) Orientações da barra de 0,2 kg, em que a estimativa da orientação unidimensional é calculada através da posição real (${}^S\mathbf{p}_{obj}$) do CoM do objeto.



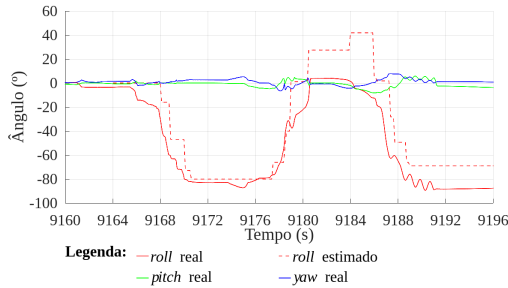
(b) Orientações da barra de 0,2 kg, em que a estimativa da orientação unidimensional é calculada através da posição estimada (${}^S\hat{\mathbf{p}}_{obj}$) do CoM do objeto.



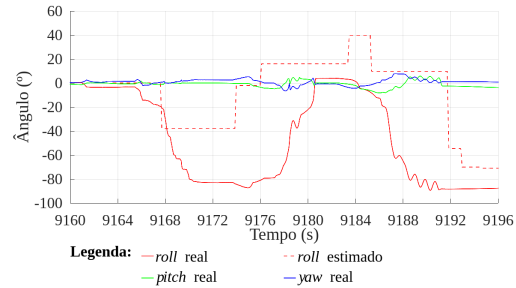
(c) Orientações da barra de 0,5 kg, em que a estimativa da orientação unidimensional é calculada através da posição real (${}^S\mathbf{p}_{obj}$) do CoM do objeto.



(d) Orientações da barra de 0,5 kg, em que a estimativa da orientação unidimensional é calculada através da posição estimada (${}^S\hat{\mathbf{p}}_{obj}$) do CoM do objeto.



(e) Orientações da barra de 1 kg, em que a estimativa da orientação unidimensional é calculada através da posição real (${}^S\mathbf{p}_{obj}$) do CoM do objeto.



(f) Orientações da barra de 1 kg, em que a estimativa da orientação unidimensional é calculada através da posição estimada (${}^S\hat{\mathbf{p}}_{obj}$) do CoM do objeto.

Figura 5.19: Resultados obtidos para o método de estimativa da orientação unidimensional do objeto, manipulado com a garra Robotiq 2F-85 durante a tarefa de manipulação n.º 4.

Analisando os resultados da estimativa da orientação unidimensional, considerando ${}^S\mathbf{p}_{obj}$ para as três barras, observa-se que as estimativas da orientação ($\hat{roll}$) acompanham os valores reais ($roll$) após o escorregamento do objeto. No entanto, ao considerar ${}^S\hat{\mathbf{p}}_{obj}$, os valores estimados ($\hat{roll}$) tendem a seguir a mesma tendência dos valores reais ($roll$), mas apresentam desvios elevados. Isso ocorre porque o método

de estimativa da orientação unidimensional requer uma precisão elevada na estimativa de ${}^s\hat{\mathbf{p}}_{\text{obj}}$ durante a fase de escorregamento, algo que a técnica SVD não está a fornecer adequadamente. Embora, durante a tarefa com escorregamento, a técnica SVD permita que o valor estimado de ${}^s\hat{\mathbf{p}}_{\text{obj}}$ convirja para o valor real de ${}^s\mathbf{p}_{\text{obj}}$, como demonstrado nas Figuras 5.14g, 5.16g e 5.18g, a precisão dessa estimativa durante o processo de escorregamento não foi suficiente para garantir a convergência do método de orientação.

Dessa forma, como sugestão de melhoria, pode-se optar por outra técnica para obter ${}^s\hat{\mathbf{p}}_{\text{obj}}$ durante o processo de escorregamento, como, por exemplo, a utilização de uma rede *Long Short-Term Memory* (LSTM). As redes LSTM são adequadas para lidar com séries temporais complexas, ao capturar as dependências temporais e as variações no comportamento do sistema ao longo do tempo [175]. Isso pode resultar numa estimativa mais precisa de ${}^s\hat{\mathbf{p}}_{\text{obj}}$ durante o processo de escorregamento, melhorando a precisão da estimativa da orientação e a convergência do método.

5.5 Conclusão

No presente capítulo, descreveu-se a implementação, os testes e os respetivos resultados da metodologia apresentada no Capítulo 4. Através do ambiente de simulação Gazebo [147], foram simulados o manipulador robótico UR 5 [148], o sensor Robotiq FT-300 [149] e a garra Robotiq 2F-85 [150]. Foram apresentados os testes e os resultados relativos ao método de calibração e compensação, bem como às abordagens para a obtenção de informações sobre o contacto e o objeto.

Nos testes de calibração e compensação, foi utilizado um objeto (uma barra cúbica) e uma garra Robotiq 2F-85. Verificou-se que o método proposto por Yu *et al.* [151] permitiu estimar e compensar eficazmente as componentes da ferramenta devidas à gravidade, bem como os desvios angulares de instalação e os desvios mecânicos do sensor. Após a compensação, foi implementado um filtro Butterworth passa-baixo para atenuar as componentes de alta frequência associadas a componentes de F/B não consideradas.

Nos métodos de obtenção de informações sobre o contacto e o objeto, foram simulados três objetos com diferentes propriedades físicas, que foram manipulados em quatro trajetórias distintas: três sem escorregamento e uma com escorregamento. Os resultados demonstraram que os métodos apresentaram um bom desempenho durante a execução das trajetórias, na ausência de colisões. No entanto, o método de estimativa da orientação unidimensional do objeto apresentou desvios consideráveis quando se utilizou a estimativa da posição do CoM do objeto, sugerindo que a precisão na estimativa durante o escorregamento foi insuficiente para garantir a convergência do método.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo apresentam-se as conclusões e algumas ideias, tendo por base a experiência adquirida com a realização deste trabalho, para possíveis desenvolvimentos futuros.

6.1 Conclusões

A percepção sensorial proprioceptiva e exteroceptiva física está presente no ser humano, conferindo-lhe agilidade e precisão na execução de tarefas de manipulação e preensão de objetos. Embora a visão seja um dos sentidos mais importantes, depender exclusivamente dela para realizar tarefas que envolvam contacto pode ser desafiador [1].

Na robótica, as tecnologias de percepção propriocetiva, especificamente sensores de Força e Binário (F/B) instalados no punho do robô, têm sido amplamente utilizadas no controlo de força em tarefas que envolvem o contacto entre a ferramenta e o ambiente (Secção 3.4). Por outro lado, as tecnologias de percepção exteroceptiva física têm recebido maior atenção da comunidade científica para a obtenção de informações sobre o contacto e o objeto, em tarefas de manipulação utilizando garras com dedos (Secção 3.5).

Neste trabalho, utilizou-se um sensor de F/B instalado no punho de um manipulador robótico, permitindo a obtenção de informações sobre o contacto entre o objeto e a ferramenta, bem como sobre o próprio objeto, durante tarefas de manipulação. Seguiu-se a abordagem proposta por Yu *et al.* [151] para estimar e compensar

as componentes da ferramenta devidas à gravidade, os desvios mecânicos do sensor e os desvios angulares de fixação do manipulador e do sensor (Secções 4.4 e 4.5). Utilizando as componentes de F/B obtidas após a aplicação do método proposto por Yu *et al.* [151], foram apresentadas metodologias que, até onde se tem conhecimento, representam soluções inovadoras para adquirir informações sobre o contacto e o objeto (Secção 4.6). Essas informações incluem: estimativa da massa e posição do centro de massa do objeto; classificação do objeto; estimativa da orientação unidimensional do objeto; deteção do objeto e de escorregamento total; e, por fim, a transformação das componentes de F/B da referência do sensor para um ponto de preensão.

Embora as informações sobre o contacto e o objeto não tenham sido aplicadas neste trabalho, é possível destacar alguns comportamentos que podem ser ajustados com base nessas informações:

- a estimativa da massa e do centro de massa do objeto é importante para o controlo do manipulador robótico, pois representa uma carga adicional para o robô;
- a estimativa da posição do centro de massa do objeto pode ser utilizada para ajustar uma nova preensão, mais próxima do centro de massa, evitando binários resultantes do deslocamento entre o centro de massa e o ponto de preensão;
- ao atribuir uma geometria aos objetos classificados, juntamente com a estimativa da pose do objeto durante a tarefa de manipulação, é possível ajustar os movimentos do manipulador robótico para evitar colisões, posicionar o objeto corretamente e com precisão, sem o danificar, e verificar se o objeto está no limite de preensão;
- a deteção do objeto durante a manipulação permite identificar se o robô está a manipular um objeto ou se o objeto foi inadvertidamente perdido, o que pode resultar na paragem imediata do manipulador robótico;
- a deteção de escorregamento total e a transformação das componentes de F/B para o ponto de preensão podem servir para o controlo da força de preensão.

A implementação do trabalho foi realizada no ambiente de simulação Gazebo [147], foram simulados o manipulador robótico *Universal Robots* (UR) 5 [148], o sensor de F/B (utilizando o modelo *Unified Robot Description Format* (URDF) Roboti FT-300 [149] e o *plug-in libgazebo_ros_ft_sensor* [164]) e a garra Robotiq 2F-85 [150] (Secções 5.1 a 5.3). A utilização do simulador Gazebo permitiu a validação dos métodos desenvolvidos neste trabalho, algo que seria mais difícil numa situação real.

Através dos resultados obtidos, verificou-se que o método proposto por Yu *et al.* [151] apresentou bons resultados na estimativa e compensação das componentes

da ferramenta devidas à gravidade, bem como dos desvios mecânicos e angulares (Subsecções 5.4.1 e 5.4.2). Após a compensação, foi aplicado um filtro digital passa-baixo *Infinite Impulse Response* (IIR) com o objetivo de atenuar as componentes de F/B associadas a efeitos dinâmicos não considerados, o que resultou em sinais de F/B menos ruidosos nos momentos iniciais e finais das trajetórias, assim como durante o escorregamento (Subsecção 5.4.3).

Os métodos para a obtenção das informações sobre o contacto e o objeto apresentaram bons resultados durante a execução de trajetórias em que não ocorreram colisões entre o objeto e a ferramenta com o ambiente (Subsecção 5.4.4). No entanto, a estimativa da posição do centro de massa do objeto apresentou variações nos primeiros instantes após a execução da trajetória. A estimativa da orientação unidimensional do objeto mostrou-se eficaz quando se utilizou a posição real do centro de massa durante o escorregamento. No entanto, exibiu desvios consideráveis ao utilizar a estimativa obtida pela técnica *Singular Value Decomposition* (SVD), sugerindo que a precisão dessa estimativa durante o processo de escorregamento não foi suficiente para garantir a convergência do método.

6.2 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, além das sugestões apresentadas na Subsecção 5.4.4, propõe-se testar os métodos desenvolvidos num ambiente real e realizar a manipulação de objetos de geometria complexa. No ambiente real, onde as componentes da ferramenta e os desvios não são conhecidos à priori, o método proposto por Yu *et al.* [151] pode ser validado verificando se os valores de F/B após a compensação se aproximam de zero para diferentes orientações do punho do manipulador em relação à sua base.

Outro ponto relevante é a aplicação dos métodos desenvolvidos em diferentes manipuladores robóticos e ferramentas de preensão, como garras a vácuo ou eletromagnéticas. Nesses casos, o método de estimativa da orientação unidimensional do objeto pode não ser aplicável, caso a preensão não limite os movimentos do objeto a um plano. Além disso, a detecção de escorregamento não indicaria necessariamente um escorregamento entre o objeto e os dedos, mas sim um deslocamento do objeto, como no caso de uma ventosa que perde vácuo ou uma perda de força eletromagnética.

Por fim, sugere-se como trabalho futuro a consideração das componentes dinâmicas da ferramenta e do objeto na obtenção das informações, conforme sugerido por estudos anteriores [155, 33, 156, 176], permitindo a manipulação de objetos com maior rapidez. Além disso, será interessante investigar o comportamento das componentes de F/B durante colisões, de modo a identificar possíveis colisões entre o conjunto objeto e garra e o ambiente, durante as tarefas de manipulação.

Referências

- [1] J. Rothwell, M. Traub, B. Day, J. Obeso, P. Thomas, and C. Marsden, “Manual motor performance in a deafferented man,” *Brain*, vol. 105, no. 3, pp. 515–542, 1982. [Citado nas páginas 1 e 107]
- [2] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot modeling and control*. John Wiley & Sons, 2020. [Citado nas páginas 6, 7 e 8]
- [3] G. H. Golub and C. F. V. Loan, *Matrix Computations*. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press, 3rd ed., 1996. [Citado na página 7]
- [4] W. Ledermann, “A note on skew-symmetric determinants,” *Proceedings of the Edinburgh Mathematical Society*, vol. 36, no. 2, pp. 335–338, 1993. [Citado na página 8]
- [5] L. Sousa, “Notas de Álgebra linear e geometria analítica,” *Departamento de Matemática da Escola Superior de Tecnologia do IPV*, 2009. [Citado na página 8]
- [6] K. Baker, “Singular value decomposition tutorial,” *The Ohio State University*, vol. 24, p. 22, 2005. [Citado na página 9]
- [7] G. H. Golub and C. F. Van Loan, *Matrix Computations*. Johns Hopkins University Press, 4 ed., 2013. [Citado nas páginas 9 e 10]
- [8] C. Heij, P. de Boer, P. H. Franses, T. Kloek, and H. K. van Dijk, “Least squares in matrix form,” in *Econometric Methods with Applications in Business and Economics*, pp. 117–186, Oxford University Press, 2004. Accessed: 2024-06-30. [Citado nas páginas 10, 11 e 12]
- [9] ROS, “Ros: Robot operating system.” <https://www.ros.org/>, 2021. Consultado em: 01/09/2024. [Citado nas páginas 12 e 75]
- [10] M. Quigley, B. Gerkey, and W. D. Smart, *Programming Robots with ROS: a practical introduction to the Robot Operating System*. "O'Reilly Media, Inc.", 2015. [Citado na página 12]
- [11] ROS Wiki, “catkin: Conceptual overview.” https://wiki.ros.org/catkin/conceptual_overview, 2020. Consultado em: 01/09/2024. [Citado nas páginas 12 e 75]

- [12] N. Koenig and A. Howard, “Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2149–2154, IEEE, 2004. [Citado na página 13]
- [13] S. Chitta, “Moveit!: an introduction,” *Robot Operating System (ROS) The Complete Reference (Volume 1)*, pp. 3–27, 2016. [Citado na página 13]
- [14] D. Hersherberger, R. Gossow, and R. Codd-Downey, “Rviz.” <http://wiki.ros.org/rviz>, 2018. Consultado em: 01/09/2024. [Citado nas páginas 14 e 75]
- [15] S. Luo, J. Bimbo, R. Dahiya, and H. Liu, “Robotic tactile perception of object properties: A review,” *Mechatronics*, vol. 48, pp. 54–67, 2017. [Citado na página 16]
- [16] N. Navarro-Guerrero, S. Toprak, J. Josifovski, and L. Jamone, “Visuo-haptic object perception for robots: an overview,” *Autonomous Robots*, vol. 47, no. 4, pp. 377–403, 2023. [Citado na página 16]
- [17] E. R. Kandel, J. H. Schwartz, T. M. Jessell, S. A. Siegelbaum, and A. J. Hudspeth, *Principles of Neural Science*. New York: McGraw-Hill Education, 5th ed., 2013. [Citado na página 16]
- [18] A. L. Ager, D. Borms, L. Deschepper, R. Dhooghe, J. Dijkhuis, J.-S. Roy, and A. Cools, “Proprioception: How is it affected by shoulder pain? a systematic review,” *Journal of hand therapy*, vol. 33, no. 4, pp. 507–516, 2020. [Citado na página 16]
- [19] Q. Li, O. Kroemer, Z. Su, F. F. Veiga, M. Kaboli, and H. J. Ritter, “A review of tactile information: Perception and action through touch,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 36, no. 6, pp. 1619–1634, 2020. [Citado nas páginas ix, 17, 18, 19 e 21]
- [20] M. T. Francomano, D. Accoto, and E. Guglielmelli, “Artificial sense of slip—a review,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 7, pp. 2489–2498, 2013. [Citado nas páginas xiii, 18, 21 e 29]
- [21] S. Caron, “Friction cones.” <https://scaron.info/robotics/friction-cones.html>, 2024. Consultado em: 11/06/2024. [Citado na página 18]
- [22] J. P. C. de Souza, L. F. Rocha, P. M. Oliveira, A. P. Moreira, and J. Boaventura-Cunha, “Robotic grasping: from wrench space heuristics to deep learning policies,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 71, p. 102176, 2021. [Citado na página 18]

- [23] J. P. C. de Souza, C. M. Costa, L. F. Rocha, R. Arrais, A. P. Moreira, E. S. Pires, and J. Boaventura-Cunha, “Reconfigurable grasp planning pipeline with grasp synthesis and selection applied to picking operations in aerospace factories,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 67, p. 102032, 2021. [Citado na página 18]
- [24] R. Honjo and S. Katsura, “Calculation of grasping force to adapt mass variation of object considering human motion,” in *IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 004923–004928, IEEE, 2015. [Citado na página 19]
- [25] M. Neta, “Forças de atrito.” <https://www.fq.pt/forcas/forcas-de-atrito>, 2023. Consultado em: 11/06/2024. [Citado nas páginas ix e 20]
- [26] Z. Su, K. Hausman, Y. Chebotar, A. Molchanov, G. E. Loeb, G. S. Sukhatme, and S. Schaal, “Force estimation and slip detection/classification for grip control using a biomimetic tactile sensor,” in *2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 297–303, 2015. [Citado na página 20]
- [27] A. Le Bot, E. Bou-Chakra, and G. Michon, “Dissipation of vibration in rough contact,” *Tribology letters*, vol. 41, pp. 47–53, 2011. [Citado na página 21]
- [28] Z. Wang, L. Wang, S. Morikawa, S. Hirai, *et al.*, “A 3-d nonhomogeneous fe model of human fingertip based on mri measurements,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, no. 12, pp. 3147–3157, 2012. [Citado na página 21]
- [29] M. I. Ribeiro, “Sensores em robótica: Como é que os robots sentem o ambiente envolvente?,” *Institute For Systems and Robotics*, 2024. [Citado nas páginas 22 e 27]
- [30] A. R. Almusawi, L. C. Dulger, and S. Kapucu, “Online teaching of robotic arm by human–robot interaction: end effector force/torque sensing,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 40, no. 9, p. 437, 2018. [Citado na página 23]
- [31] F. von Drigalski, K. Hayashi, Y. Huang, R. Yonetani, M. Hamaya, K. Tanaka, and Y. Ijiri, “Precise multi-modal in-hand pose estimation using low-precision sensors for robotic assembly,” in *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 968–974, IEEE, 2021. [Citado nas páginas 23 e 46]

- [32] F. Xie, Z. Chong, X.-J. Liu, H. Zhao, and J. Wang, “Precise and smooth contact force control for a hybrid mobile robot used in polishing,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 83, p. 102573, 2023. [Citado nas páginas 23 e 46]
- [33] D. Kubus, T. Kroger, and F. M. Wahl, “On-line rigid object recognition and pose estimation based on inertial parameters,” in *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1402–1408, IEEE, 2007. [Citado nas páginas 23, 28, 53 e 109]
- [34] D. Buchholz, D. Kubus, I. Weidauer, A. Scholz, and F. M. Wahl, “Combining visual and inertial features for efficient grasping and bin-picking,” in *2014 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, pp. 875–882, IEEE, 2014. [Citado nas páginas 23 e 53]
- [35] E. Moreira, L. F. Rocha, A. M. Pinto, A. P. Moreira, and G. Veiga, “Assessment of robotic picking operations using a 6 axis force/torque sensor,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 1, no. 2, pp. 768–775, 2016. [Citado nas páginas 23 e 28]
- [36] M. Y. Cao, S. Laws, and F. R. y Baena, “Six-axis force/torque sensors for robotics applications: A review,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 24, pp. 27238–27251, 2021. [Citado nas páginas 23, 25 e 26]
- [37] D. Chen, A. Song, and A. Li, “Design and calibration of a six-axis force/torque sensor with large measurement range used for the space manipulator,” *Procedia Engineering*, vol. 99, pp. 1164–1170, 2015. [Citado na página 24]
- [38] J. Yao, H. Zhang, X. Xiang, H. Bai, and Y. Zhao, “A 3-d printed redundant six-component force sensor with eight parallel limbs,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 247, pp. 90–97, 2016. [Citado na página 24]
- [39] J. O. Templeman, B. B. Sheil, and T. Sun, “Multi-axis force sensors: A state-of-the-art review,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 304, p. 111772, 2020. [Citado nas páginas 24, 25 e 26]
- [40] Y.-j. Li, X.-s. Xu, G.-c. Wang, S.-k. Cao, N.-j. Chen, and X. Sun, “Fault-tolerant measurement mechanism research on pre-tightened four-point supported piezoelectric six-dimensional force/torque sensor,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 135, p. 106420, 2020. [Citado na página 24]
- [41] U. Kim, D.-H. Lee, Y. B. Kim, D.-Y. Seok, and H. R. Choi, “A novel six-axis force/torque sensor for robotic applications,” *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, vol. 22, no. 3, pp. 1381–1391, 2016. [Citado nas páginas 24 e 25]

- [42] P. Puangmali, K. Althoefer, L. D. Seneviratne, D. Murphy, and P. Dasgupta, “State-of-the-art in force and tactile sensing for minimally invasive surgery,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 371–381, 2008. [Citado na página 25]
- [43] G. Palli, L. Moriello, U. Scarcia, and C. Melchiorri, “Development of an optoelectronic 6-axis force/torque sensor for robotic applications,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 220, pp. 333–346, 2014. [Citado nas páginas 25 e 26]
- [44] M. S. Müller, L. Hoffmann, T. Christopher Buck, and A. Walter Koch, “Fiber bragg grating-based force-torque sensor with six degrees of freedom,” *International Journal of Optomechatronics*, vol. 3, no. 3, pp. 201–214, 2009. [Citado na página 25]
- [45] Q. Liang, K. Zou, J. Long, J. Jin, D. Zhang, G. Coppola, W. Sun, Y. Wang, and Y. Ge, “Multi-component fbg-based force sensing systems by comparison with other sensing technologies: A review,” *IEEE sensors journal*, vol. 18, no. 18, pp. 7345–7357, 2018. [Citado na página 26]
- [46] Q. Liang, D. Zhang, G. Coppola, J. Mao, W. Sun, Y. Wang, and Y. Ge, “Design and analysis of a sensor system for cutting force measurement in machining processes,” *Sensors*, vol. 16, no. 1, p. 70, 2016. [Citado na página 26]
- [47] S. Weng, Z. Xia, H. Deng, Y. Gan, and J. Xiong, “Design of an overload protection device for six-axis force/torque sensors,” in *2016 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*, pp. 239–242, IEEE, 2016. [Citado na página 26]
- [48] R. Bekhti, V. Duchaine, and P. Cardou, “Structural optimisation of a force-torque sensor through its input-output relationship,” *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 199–212, 2014. [Citado na página 26]
- [49] J. Yao, H. Zhang, W. Zhang, Y. Xu, and Y. Zhao, “Fault-tolerant parallel six-component force sensor,” *Meccanica*, vol. 51, pp. 1639–1651, 2016. [Citado na página 26]
- [50] J. Yao, D. Cai, H. Zhang, H. Wang, D. Wu, and Y. Zhao, “Task-oriented design method and research on force compliant experiment of six-axis wrist force sensor,” *Mechatronics*, vol. 35, pp. 109–121, 2016. [Citado na página 26]
- [51] J. Yao, H. Zhang, J. Zhu, Y. Xu, and Y. Zhao, “Isotropy analysis of redundant parallel six-axis force sensor,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 91, pp. 135–150, 2015. [Citado na página 26]

- [52] S. Somlor, A. Schmitz, H. Jinsun, T. P. Tomo, and S. Sugano, “Development of a capacitive-type 6-axis force-torque sensor,” in *2017 IEEE SENSORS*, pp. 1–3, IEEE, 2017. [Citado na página 26]
- [53] S. Hu, H. Wang, Y. Wang, and Z. Liu, “Design of a novel six-axis wrist force sensor,” *Sensors*, vol. 18, no. 9, p. 3120, 2018. [Citado na página 26]
- [54] Y. Noh, J. Bimbo, A. Stilli, H. Wurdemann, H. Liu, J. Housden, K. Rhode, and K. Althoefer, “A new miniaturised multi-axis force/torque sensors based on optoelectronic technology and simply-supported beam,” in *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 202–207, IEEE, 2016. [Citado na página 26]
- [55] ATI Industrial Automation, “Engineered products for robotic productivity.” <https://www.ati-ia.com/>, 2024. Consultado em: 24/06/2024. [Citado nas páginas 26, 37 e 42]
- [56] HBM, “Hbm: The measurement technology leader.” <https://www.hbm.com>, 2024. Consultado em: 25/06/2024. [Citado na página 26]
- [57] Robotiq, “Force torque sensor.” <https://robotiq.com>, 2024. Consultado em: 25/06/2024. [Citado na página 26]
- [58] Interface Force, “Interface force: Force measurement solutions.” <https://www.interfaceforce.com>, 2024. Consultado em: 25/06/2024. [Citado na página 26]
- [59] JR3, “Jr3: Force and torque sensors.” <https://jr3.com>, 2024. Consultado em: 25/06/2024. [Citado na página 26]
- [60] Kistler, “Kistler: Measure. analyze. innovate..” <https://www.kistler.com>, 2024. Consultado em: 25/06/2025. [Citado na página 26]
- [61] OnRobot, “Onrobot: End-of-arm tooling for collaborative applications.” <https://onrobot.com>, 2024. Consultado em: 25/06/2024. [Citado na página 26]
- [62] Wittenstein, “Wittenstein: High-precision motion control.” <https://www.wittenstein.de>, 2024. Consultado em: 25/06/2024. [Citado na página 26]
- [63] N. Correll, “5.2: Proprioception of robot kinematics and internal forces.” <https://eng.libretexts.org/>, 2021. Consultado em: 25/06/2024. [Citado na página 27]
- [64] S. Kucuk and Z. Bingul, *Robot kinematics: Forward and inverse kinematics*. INTECH Open Access Publisher London, UK, 2006. [Citado na página 27]

- [65] Shadow Robot Company, “Shadow dexterous hand series.” <https://www.shadowrobot.com/dexterous-hand-series/>, 2024. Consultado em: 25/06/2024. [Citado na página 27]
- [66] Barrett Technology, “Barretthand.” <https://advanced.barrett.com/barretthand>, 2024. Consultado em: 25/06/2024. [Citado na página 27]
- [67] D. M. Siegel, “Finding the pose of an object in a hand,” in *Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 406–407, IEEE Computer Society, 1991. [Citado na página 27]
- [68] M. Pfanne and M. Chalon, “EKF-based in-hand object localization from joint position and torque measurements,” in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2464–2470, IEEE, 2017. [Citado nas páginas 27 e 28]
- [69] “The somatosensory system: Receptors and central pathways.” <https://neupsykey.com/the-somatosensory-system-receptors-and-central-pathways/>, 2017. Consultado em: 19/06/2024. [Citado nas páginas ix e 29]
- [70] A. B. Vallbo, R. S. Johansson, *et al.*, “Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation,” *Hum neurobiol*, vol. 3, no. 1, pp. 3–14, 1984. [Citado na página 29]
- [71] B. Siciliano, O. Khatib, and T. Kröger, *Springer handbook of robotics*, vol. 200. Springer, 2008. [Citado na página 30]
- [72] R. S. Dahiya, G. Metta, M. Valle, and G. Sandini, “Tactile sensing—from humans to humanoids,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 1, pp. 1–20, 2010. [Citado na página 30]
- [73] J. Jin, S. Wang, Z. Zhang, D. Mei, and Y. Wang, “Progress on flexible tactile sensors in robotic applications on objects properties recognition, manipulation and human-machine interactions,” *Soft Sci*, vol. 3, p. 8, 2023. [Citado na página 30]
- [74] H. Liu, X. Song, J. Bimbo, L. Seneviratne, and K. Althoefer, “Surface material recognition through haptic exploration using an intelligent contact sensing finger,” in *2012 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*, pp. 52–57, IEEE, 2012. [Citado na página 30]
- [75] K. Chathuranga, S. Hirai, *et al.*, “A bio-mimetic fingertip that detects force and vibration modalities and its application to surface identification,” in *2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 575–581, IEEE, 2012. [Citado na página 30]

- [76] M. R. Cutkosky and J. M. Hyde, “Manipulation control with dynamic tactile sensing,” in *6th international symposium on robotics research, Hidden Valley, Pennsylvania*, 1993. [Citado na página 30]
- [77] J. S. Son, E. A. Monteverde, and R. D. Howe, “A tactile sensor for localizing transient events in manipulation,” in *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 471–476, IEEE, 1994. [Citado na página 30]
- [78] C. Wang, L. Dong, D. Peng, and C. Pan, “Tactile sensors for advanced intelligent systems,” *Advanced Intelligent Systems*, vol. 1, no. 8, p. 1900090, 2019. [Citado nas páginas 30, 33, 36 e 37]
- [79] T. Li, Y. Yan, C. Yu, J. An, Y. Wang, and G. Chen, “A comprehensive review of robot intelligent grasping based on tactile perception,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 90, p. 102792, 2024. [Citado na página 30]
- [80] W. Mandil, V. Rajendran, K. Nazari, and A. Ghalamzan-Esfahani, “Tactile-sensing technologies: Trends, challenges and outlook in agri-food manipulation,” *Sensors*, vol. 23, no. 17, p. 7362, 2023. [Citado nas páginas 30 e 37]
- [81] Y.-L. Park, B.-R. Chen, and R. J. Wood, “Design and fabrication of soft artificial skin using embedded microchannels and liquid conductors,” *IEEE Sensors journal*, vol. 12, no. 8, pp. 2711–2718, 2012. [Citado na página 30]
- [82] T. Li, X. Sun, X. Shu, C. Wang, Y. Wang, G. Chen, and N. Xue, “Robot grasping system and grasp stability prediction based on flexible tactile sensor array,” *Machines*, vol. 9, no. 6, p. 119, 2021. [Citado nas páginas 30, 31 e 38]
- [83] S. Yong, J. Chapman, and K. Aw, “Soft and flexible large-strain piezoresistive sensors: On implementing proprioception, object classification and curvature estimation systems in adaptive, human-like robot hands,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 341, p. 113609, 2022. [Citado nas páginas 30 e 31]
- [84] Z. Lu, X. Gao, and H. Yu, “Gtac: A biomimetic tactile sensor with skin-like heterogeneous force feedback for robots,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 14, pp. 14491–14500, 2022. [Citado nas páginas 31 e 38]
- [85] S. Chun, I. Y. Choi, W. Son, G. Y. Bae, E. J. Lee, H. Kwon, J. Jung, H. S. Kim, J. K. Kim, and W. Park, “A highly sensitive force sensor with fast response based on interlocked arrays of indium tin oxide nanosprings toward human tactile perception,” *Advanced Functional Materials*, vol. 28, no. 42, p. 1804132, 2018. [Citado na página 31]

- [86] S. Timsit, “Electrical contact resistance: properties of stationary interfaces,” in *Electrical contacts-1998. Proceedings of the forty-fourth IEEE holm conference on electrical contacts (Cat. No. 98CB36238)*, pp. 1–19, IEEE, 1998. [Citado na página 31]
- [87] N. Phukan, N. M. Kakoty, and M. Sharma, “Real-time slip detection using tactile information,” in *2021 IEEE 9th Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*, pp. 01–05, IEEE, 2021. [Citado nas páginas 31, 32 e 38]
- [88] Z. Si, T. C. Yu, K. Morozov, J. McCann, and W. Yuan, “Robotsweater: scalable, generalizable, and customizable machine-knitted tactile skins for robots,” in *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 10352–10358, IEEE, 2023. [Citado nas páginas 32 e 38]
- [89] C. Pang, G.-Y. Lee, T.-i. Kim, S. M. Kim, H. N. Kim, S.-H. Ahn, and K.-Y. Suh, “A flexible and highly sensitive strain-gauge sensor using reversible interlocking of nanofibres,” *Nature materials*, vol. 11, no. 9, pp. 795–801, 2012. [Citado nas páginas 32 e 38]
- [90] D. Kwon, T.-I. Lee, J. Shim, S. Ryu, M. S. Kim, S. Kim, T.-S. Kim, and I. Park, “Highly sensitive, flexible, and wearable pressure sensor based on a giant piezocapacitive effect of three-dimensional microporous elastomeric dielectric layer,” *ACS applied materials & interfaces*, vol. 8, no. 26, pp. 16922–16931, 2016. [Citado na página 32]
- [91] A. Yamaguchi and C. G. Atkeson, “Recent progress in tactile sensing and sensors for robotic manipulation: can we turn tactile sensing into vision?,” *Advanced Robotics*, vol. 33, no. 14, pp. 661–673, 2019. [Citado na página 32]
- [92] C. Ge, B. Yang, L. Wu, Z. Duan, Y. Li, X. Ren, L. Jiang, and J. Zhang, “Capacitive sensor combining proximity and pressure sensing for accurate grasping of a prosthetic hand,” *ACS Applied Electronic Materials*, vol. 4, no. 2, pp. 869–877, 2022. [Citado nas páginas 33 e 38]
- [93] T. Yao, X. Guo, C. Li, H. Qi, H. Lin, L. Liu, Y. Dai, L. Qu, Z. Huang, P. Liu, *et al.*, “Highly sensitive capacitive flexible 3d-force tactile sensors for robotic grasping and manipulation,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 53, no. 44, p. 445109, 2020. [Citado na página 33]
- [94] T. Matsuno, R. Miyagoshi, K. Shimizu, M. Ishihara, S. Watanabe, J. Shintake, K. Althoefer, and S. Hirai, “Grasping state and object estimation of a flat shell gripper by strain and proximity measurement using a single capacitance-based sensor,” in *2022 IEEE 5th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, pp. 903–910, IEEE, 2022. [Citado nas páginas 33 e 38]

- [95] D. Goger, N. Gorges, and H. Worn, “Tactile sensing for an anthropomorphic robotic hand: Hardware and signal processing,” in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 895–901, IEEE, 2009. [Citado nas páginas 34 e 38]
- [96] Z. Yi, Y. Zhang, and J. Peters, “Bioinspired tactile sensor for surface roughness discrimination,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 255, pp. 46–53, 2017. [Citado nas páginas 34 e 38]
- [97] Z. Gao, B. Ren, Z. Fang, H. Kang, J. Han, and J. Li, “Accurate recognition of object contour based on flexible piezoelectric and piezoresistive dual mode strain sensors,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 332, p. 113121, 2021. [Citado nas páginas 34 e 38]
- [98] A. Schulz, C. Pylatiuk, A. Kargov, R. Oberle, and G. Bretthauer, “Progress in the development of anthropomorphic fluidic hands and their applications,” in *Mechatronics & Robotics*, pp. 936–941, 2004. [Citado na página 34]
- [99] G. Yao, L. Xu, X. Cheng, Y. Li, X. Huang, W. Guo, S. Liu, Z. L. Wang, and H. Wu, “Bioinspired triboelectric nanogenerators as self-powered electronic skin for robotic tactile sensing,” *Advanced Functional Materials*, vol. 30, no. 6, p. 1907312, 2020. [Citado nas páginas 35, 37 e 38]
- [100] T. Jin, Z. Sun, L. Li, Q. Zhang, M. Zhu, Z. Zhang, G. Yuan, T. Chen, Y. Tian, X. Hou, *et al.*, “Triboelectric nanogenerator sensors for soft robotics aiming at digital twin applications,” *Nature communications*, vol. 11, no. 1, p. 5381, 2020. [Citado nas páginas 35 e 38]
- [101] Z. Ren, J. Nie, J. Shao, Q. Lai, L. Wang, J. Chen, X. Chen, and Z. L. Wang, “Fully elastic and metal-free tactile sensors for detecting both normal and tangential forces based on triboelectric nanogenerators,” *Advanced Functional Materials*, vol. 28, no. 31, p. 1802989, 2018. [Citado nas páginas 35 e 38]
- [102] I. H. Taylor, S. Dong, and A. Rodriguez, “Gelslim 3.0: High-resolution measurement of shape, force and slip in a compact tactile-sensing finger,” in *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 10781–10787, IEEE, 2022. [Citado nas páginas 36 e 39]
- [103] M. Lambeta, P.-W. Chou, S. Tian, B. Yang, B. Maloon, V. R. Most, D. Stroud, R. Santos, A. Byagowi, G. Kammerer, *et al.*, “Digit: A novel design for a low-cost compact high-resolution tactile sensor with application to in-hand manipulation,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 3, pp. 3838–3845, 2020. [Citado na página 36]

-
- [104] M. I. Tiwana, S. J. Redmond, and N. H. Lovell, “A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering,” *Sensors and Actuators A: physical*, vol. 179, pp. 17–31, 2012. [Citado na página 37]
- [105] J. Luo and Z. L. Wang, “Recent progress of triboelectric nanogenerators: From fundamental theory to practical applications,” *EcoMat*, vol. 2, no. 4, p. e12059, 2020. [Citado na página 37]
- [106] J. A. Bonifácio, *Transdutores Eletromagnéticos na Recolha da Energia Cinética das Vibrações*. PhD thesis, Universidade da Beira Interior (Portugal), 2018. [Citado na página 37]
- [107] GelSight, “Gelsight.” <https://www.gelsight.com/>, 2024. Consultado em: 17/06/2024. [Citado nas páginas 37 e 44]
- [108] Tacterion GmbH, “Sensor technology: Features, applications examples.” <https://www.tacterion.com/technology>, 2024. Consultado em: 24/06/2024. [Citado na página 37]
- [109] Seed Robotics, “Fts and singlex tactile pressure sensors.” <https://www.seedrobotics.com/>, 2024. Consultado em: 24/06/2024. [Citado na página 37]
- [110] XELA Robotics, “Tactile sensors.” <https://www.xelarobotics.com/tactile-sensors>, 2024. Consultado em: 24/06/2024. [Citado na página 37]
- [111] Contactile Pty, “Tactile sensors.” https://contactile.com/products/#tactile_sensors, 2024. Consultado em: 24/06/2024. [Citado na página 37]
- [112] M. K. Johnson, F. Cole, A. Raj, and E. H. Adelson, “Microgeometry capture using an elastomeric sensor,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 30, no. 4, pp. 1–8, 2011. [Citado nas páginas x, 38, 39 e 41]
- [113] J. Ham, T. M. Huh, J. Kim, J.-O. Kim, S. Park, M. R. Cutkosky, and Z. Bao, “Porous dielectric elastomer based flexible multiaxial tactile sensor for dexterous robotic or prosthetic hands,” *Advanced Materials Technologies*, vol. 8, no. 3, p. 2200903, 2023. [Citado na página 38]
- [114] W. Yuan, S. Dong, and E. H. Adelson, “Gelsight: High-resolution robot tactile sensors for estimating geometry and force,” *Sensors*, vol. 17, no. 12, p. 2762, 2017. [Citado nas páginas x, 38, 39, 42 e 43]
- [115] J. Ji, Y. Liu, and H. Ma, “Model-based 3d contact geometry perception for visual tactile sensor,” *Sensors*, vol. 22, no. 17, p. 6470, 2022. [Citado na página 38]

- [116] S. Dong, D. Ma, E. Donlon, and A. Rodriguez, “Maintaining grasps within slipping bounds by monitoring incipient slip,” in *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3818–3824, IEEE, 2019. [Citado nas páginas x, 38, 39, 41 e 42]
- [117] A. Narendiran and B. George, “Capacitive tactile sensor with slip detection capabilities for robotic applications,” in *2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, pp. 464–469, IEEE, 2015. [Citado na página 38]
- [118] W. Yuan, R. Li, M. A. Srinivasan, and E. H. Adelson, “Measurement of shear and slip with a gelsight tactile sensor,” in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 304–311, IEEE, 2015. [Citado na página 38]
- [119] C. Lv, C. Tian, J. Jiang, Y. Dang, Y. Liu, X. Duan, Q. Li, X. Chen, and M. Xie, “Ultrasensitive linear capacitive pressure sensor with wrinkled microstructures for tactile perception,” *Advanced Science*, vol. 10, no. 14, p. 2206807, 2023. [Citado na página 38]
- [120] W. Yuan, C. Zhu, A. Owens, M. A. Srinivasan, and E. H. Adelson, “Shape-independent hardness estimation using deep learning and a gelsight tactile sensor,” in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 951–958, IEEE, 2017. [Citado nas páginas 38 e 44]
- [121] R. Li and E. H. Adelson, “Sensing and recognizing surface textures using a gelsight sensor,” in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1241–1247, 2013. [Citado nas páginas 38 e 44]
- [122] T. Okatani, H. Takahashi, K. Noda, T. Takahata, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, “A tactile sensor using piezoresistive beams for detection of the coefficient of static friction,” *Sensors*, vol. 16, no. 5, p. 718, 2016. [Citado na página 38]
- [123] L. Zhang, Y. Wang, and Y. Jiang, “Tac3d: A novel vision-based tactile sensor for measuring forces distribution and estimating friction coefficient distribution,” *arXiv preprint arXiv:2202.06211*, 2022. [Citado nas páginas 38 e 44]
- [124] Y. Liu, X. Xu, W. Chen, H. Yuan, H. Wang, J. Xu, R. Chen, and L. Yi, “Enhancing generalizable 6d pose tracking of an in-hand object with tactile sensing,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023. [Citado nas páginas x, 38, 39, 43 e 44]

-
- [125] Intel, “Intel® realsensetm depth and tracking cameras.” <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d415/>, 2023. Consultado em: 17/06/2024. [Citado na página 39]
- [126] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, “Deep residual learning for image recognition,” in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 770–778, 2016. [Citado nas páginas 39 e 43]
- [127] Y. Weng, H. Wang, Q. Zhou, Y. Qin, Y. Duan, Q. Fan, B. Chen, H. Su, and L. J. Guibas, “Captra: Category-level pose tracking for rigid and articulated objects from point clouds,” in *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, pp. 13209–13218, 2021. [Citado nas páginas x, 39, 43 e 44]
- [128] B. Wen and K. Bekris, “Bundletrack: 6d pose tracking for novel objects without instance or category-level 3d models,” in *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 8067–8074, IEEE, 2021. [Citado nas páginas 39 e 43]
- [129] E. Donlon, S. Dong, M. Liu, J. Li, E. Adelson, and A. Rodriguez, “Gelslim: A high-resolution, compact, robust, and calibrated tactile-sensing finger,” in *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1927–1934, IEEE, 2018. [Citado nas páginas 39 e 41]
- [130] S. Barsky and M. Petrou, “The 4-source photometric stereo technique for three-dimensional surfaces in the presence of highlights and shadows,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 25, no. 10, pp. 1239–1252, 2003. [Citado na página 39]
- [131] R. Basri, D. Jacobs, and I. Kemelmacher, “Photometric stereo with general, unknown lighting,” *International Journal of computer vision*, vol. 72, pp. 239–257, 2007. [Citado na página 39]
- [132] R. Basri and D. W. Jacobs, “Lambertian reflectance and linear subspaces,” *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 25, no. 2, pp. 218–233, 2003. [Citado na página 39]
- [133] R. Ramamoorthi and P. Hanrahan, “An efficient representation for irradiance environment maps,” in *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 497–500, 2001. [Citado na página 39]
- [134] C. Wang, X. Zang, H. Zhang, H. Chen, Z. Lin, and J. Zhao, “Status identification and object in-hand reorientation using force/torque sensors,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 18, pp. 20694–20703, 2021. [Citado na página 40]

- [135] T. Wang and F. Kirchner, “Grasp stability prediction with time series data based on stft and lstm,” in *2023 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)*, pp. 587–593, IEEE, 2023. [Citado na página 40]
- [136] T. Wang, Z. Xie, Y. Li, Y. Zhang, H. Zhang, and F. Kirchner, “Dorahand: a novel dexterous hand with tactile sensing finger module,” *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, vol. 49, no. 4, pp. 658–666, 2022. [Citado na página 40]
- [137] E. Sejdić, I. Djurović, and J. Jiang, “Time–frequency feature representation using energy concentration: An overview of recent advances,” *Digital signal processing*, vol. 19, no. 1, pp. 153–183, 2009. [Citado na página 40]
- [138] C. Gentile, F. Cordella, C. R. Rodrigues, and L. Zollo, “Touch-and-slippage detection algorithm for prosthetic hands,” *Mechatronics*, vol. 70, p. 102402, 2020. [Citado na página 40]
- [139] Interlink Electronics, Inc., “Fsr 400.” <https://www.interlinkelectronics.com/fsr-400>, 2022. Consultado em: 01/09/2024. [Citado na página 40]
- [140] J. C. Butcher, *Numerical methods for ordinary differential equations*. John Wiley & Sons, 2016. [Citado na página 40]
- [141] Z. H. Hoo, J. Candlish, and D. Teare, “What is an roc curve?,” *Emergency Medicine Journal*, vol. 34, no. 6, pp. 357–359, 2017. [Citado na página 40]
- [142] F. Cordella, C. Gentile, L. Zollo, R. Barone, R. Sacchetti, A. Davalli, B. Siciliano, and E. Guglielmelli, “A force-and-slippage control strategy for a poliarticulated prosthetic hand,” in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3524–3529, IEEE, 2016. [Citado na página 40]
- [143] M. K. Johnson and E. H. Adelson, “Retrographic sensing for the measurement of surface texture and shape,” in *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1070–1077, 2009. [Citado nas páginas x e 41]
- [144] K. Nozu and K. Shimonomura, “Robotic bolt insertion and tightening based on in-hand object localization and force sensing,” in *2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 310–315, IEEE, 2018. [Citado na página 44]
- [145] S. Baek and D. O. Kim, “Predictive process adjustment by detecting system status of vacuum gripper in real time during pick-up operations,” *Processes*, vol. 9, no. 4, p. 634, 2021. [Citado na página 46]

-
- [146] D. Roy, “Development of novel magnetic grippers for use in unstructured robotic workspace,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 35, pp. 16–41, 2015. [Citado na página 46]
- [147] Open Robotics, “Gazebo Simulation.” <https://gazebo.org/home>, 2024. Consultado em: 03/09/2024. [Citado nas páginas x, xi, 47, 75, 76, 105 e 108]
- [148] Universal Robots, “UR5e Robô Colaborativo.” <https://www.universal-robots.com/pt/produtos/ur5-robot/>, 2024. Consultado em: 03/09/2024. [Citado nas páginas x, xi, 47, 75, 76, 105 e 108]
- [149] Robotiq, “FT 300-S Force Torque Sensor.” <https://robotiq.com/products/ft-300-force-torque-sensor>, 2024. Consultado em: 03/09/2024. [Citado nas páginas x, xi, 47, 75, 76, 105 e 108]
- [150] Robotiq, “2F-85 and 2F-140 Adaptive Robot Gripper.” <https://robotiq.com/products/2f85-140-adaptive-robot-gripper>, 2024. Consultado em: 03/09/2024. [Citado nas páginas x, xi, 47, 75, 76, 105 e 108]
- [151] Y. Yu, R. Shi, and Y. Lou, “Bias estimation and gravity compensation for wrist-mounted force/torque sensor,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 18, pp. 17625–17634, 2021. [Citado nas páginas xi, 48, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 60, 63, 74, 81, 105, 107, 108 e 109]
- [152] S. Vougioukas, “Bias estimation and gravity compensation for force-torque sensors,” in *Proceedings of International Conference on Mathematical Methods and Computational Techniques in Electrical Engineering*, pp. 82–85, 2001. [Citado nas páginas 51 e 53]
- [153] D. A. P. Ferreira, *Análise e Processamento de Sinais*. Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2018. [Citado nas páginas 51 e 88]
- [154] C. Scoccia, B. Ubezio, G. Palmieri, M. Rathmair, and M. Hofbaur, “Experimental assessment of a vision-based obstacle avoidance strategy for robot manipulators: Off-line trajectory planning and on-line motion control,” *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 110, no. 3, pp. 1–21, 2024. [Citado na página 52]
- [155] J. Duan, Z. Liu, Y. Bin, K. Cui, and Z. Dai, “Payload identification and gravity/inertial compensation for six-dimensional force/torque sensor with a fast and robust trajectory design approach,” *Sensors*, vol. 22, no. 2, p. 439, 2022. [Citado nas páginas 53, 54 e 109]
- [156] D. Kubus, T. Kroger, and F. M. Wahl, “Improving force control performance by computational elimination of non-contact forces/torques,” in *2008 IEEE*

- international conference on robotics and automation*, pp. 2617–2622, IEEE, 2008. [Citado nas páginas 53 e 109]
- [157] A. H. de Ruiter and J. R. Forbes, “On the solution of wahba’s problem on so (n),” *The Journal of the Astronautical Sciences*, vol. 60, pp. 1–31, 2013. [Citado na página 60]
- [158] L. Kang, J.-T. Seo, S.-H. Kim, W.-J. Kim, and B.-J. Yi, “Design and implementation of a multi-function gripper for grasping general objects,” *Applied Sciences*, vol. 9, no. 24, p. 5266, 2019. [Citado nas páginas xi e 66]
- [159] J. L. Meriam and L. G. Kraige, *Engineering Mechanics: Dynamics*. Wiley, 7th ed., 2012. [Citado na página 74]
- [160] MoveIt!, “MoveIt Motion Planning Framework.” <http://moveit.ros.org/>, 2024. Consultado em: 03/09/2024. [Citado na página 75]
- [161] Zhang, “Example of a ur5 robotic manipulator simulation.” <https://blog.csdn.net/zhangarmy/article/details/133357000?spm=1001.2014.3001.5501>, 2023. Consultado em: 03/09/2024. [Citado na página 76]
- [162] G. Hoorn, “Change ur_gazebo to effortjointinterface [discussion].” https://github.com/ros-industrial/universal_robot/issues/521, 2020. Consultado em: 03/09/2024. [Citado na página 76]
- [163] ROS Answers, “Anyone who’s succeeded with grasping using ROS and Gazebo, what advice do you have to offer?.” <https://answers.ros.org/question/302358/>, 2018. Consultado em: 03/09/2024. [Citado nas páginas 76 e 90]
- [164] Open Robotics, “GazeboRosFTSensor.” https://docs.ros.org/en/jade/api/gazebo_plugins/html/group__GazeboRosFTSensor.html, 2017. Consultado em: 03/09/2024. [Citado nas páginas 76 e 108]
- [165] CSDN, “How to add a force sensor to a simulated robotic manipulator in gazebo?.” https://blog.csdn.net/qq_42823342/article/details/123034744, 2022. Consultado em: 03/05/2024. [Citado na página 76]
- [166] GNU Project, “Gnu octave.” <https://octave.org/>, 2024. Consultado em: 04/09/2024. [Citado na página 77]
- [167] GNU Octave, “Gnu octave packages.” <https://octave.sourceforge.io/octave/overview.html>, 2024. Consultado em: 04/09/2024. [Citado na página 79]
- [168] ROS Wiki Contributors, “tf2_ros - ros wiki.” https://wiki.ros.org/tf2_ros, 2017. Consultado em: 04/09/2024. [Citado nas páginas 79 e 80]

-
- [169] G. Guennebaud, B. Jacob, *et al.*, “Eigen: C++ template library for linear algebra.” <https://eigen.tuxfamily.org>, 2024. Consultado em: 04/09/2024. [Citado na página 79]
- [170] J. Hsu, “Linkstates.h file reference.” https://docs.ros.org/en/groovy/api/gazebo_msgs/html/LinkStates_8h.html, 2014. Consultado em: 05/09/2024. [Citado na página 85]
- [171] ROS Wiki Contributors, “hector_gazebo_plugins.” https://wiki.ros.org/hector_gazebo_plugins, 2016. Consultado em: 05/09/2024. [Citado na página 85]
- [172] GNU Octave community, “Signal package - gnu octave.” <https://octave.sourceforge.io/signal/>, 2023. Consultado em: 04/09/2024. [Citado na página 88]
- [173] Open Robotics, “Gazebo model editor tutorial.” https://classic.gazebosim.org/tutorials?tut=model_editor&cat=model_editor_top, 2014. Consultado em: 05/09/2024. [Citado na página 90]
- [174] ROS Documentation Contributors, “GetModelState - ROS API Gazebo.” https://docs.ros.org/en/jade/api/gazebo_msgs/html/srv/GetModelState.html, 2017. Consultado em: 04/09/2024. [Citado na página 91]
- [175] C. Olah, “Understanding lstm networks.” <https://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/>, 2015. Consultado em: 10/09/2024. [Citado na página 105]
- [176] D. Kubus, T. Kroger, and F. M. Wahl, “On-line estimation of inertial parameters using a recursive total least-squares approach,” in *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3845–3852, IEEE, 2008. [Citado na página 109]

Anexo A

Algoritmos

O presente anexo apresenta os algoritmos utilizados em Octave e *Robot Operating System* (ROS) na implementação deste trabalho.

A.1 Algoritmo para Estimar as Componentes da Ferramenta e os Desvios

Algoritmo 1: Método de calibração para estimar as componentes da ferramenta e os desvios (Octave)

Data: Arquivo CSV com observações de força e binário (sf , st) e respectivas matrizes de orientação (eRb)

Result: Estimativa de $bffer$, sRe , $sfdsv$, $spfer$, $stdsv$, bRg e m

Definir número de observações, n_obs ;

Carregar o arquivo CSV com as n_obs observações de sf , st , eRb ;

Selecionar metodo: 1 para SRO, 2 para LRO;

if $metodo == 1$ **then**

 Executar a função SRO para estimar $bffer$;

$bffer \leftarrow SRO(sf)$;

else

if $metodo == 2$ **then**

 Definir valor de $alpha$ e $eixo_x$;

 Executar a função LRO para estimar $bffer$;

$bffer \leftarrow LRO(n_obs, sf, eRb, alpha, eixo_x)$;

else

 Exibir mensagem de erro para método inválido;

end

end

Executar a função `estim_calib` para estimar sRe , $sfdsv$, $spfer$, $stdsv$, bRg e m ;

$(sRe, sfdsv, spfer, stdsv, bRg, m) = estim_calib(n_obs, sf, eRb, st, bffer)$

Apresentar os parâmetros estimados;

A.2 Algoritmo para Estimar as Componentes de F/B do Objeto

Algoritmo 2: Método de compensação para estimar as componentes de força e binário do objeto (ROS)

Data: Mensagens `WrenchStamped` (*msg*) subscritas no tópico `/sw`

Result: Mensagens `WrenchStamped` (*swobj_msg*) publicadas no tópico `/swobj`

Definir as variáveis estimadas: *bffer*, *sfdsv*, *stdsv*, *spfer* e *sRe*;

Inicializar variáveis de força, binário e timestamp: *sf*, *st* e *timestamp*;

Definir as referências da base e do punho do robô: *referencia* e *em_relacao*;

Calcular a matriz antissimétrica *spferA* do vetor *spfer*;

Inicializar `tfBuffer` e `tfListener`;

Criar publisher *swobj_pub* para o tópico `/swobj`;

Subscrever o tópico `/sw` com a função de callback `swCallback`;

Esperar 2 segundos para acumulação de transformações;

Inicializar `tfListener`;

Chamar `ros::spin()` para processar callbacks;

Function `swCallback(msg, swobj_pub)`:

swobj_msg $\leftarrow$ *msg*;

 Atualizar as variáveis *sf*, *st* e *timestamp* através de *msg*;

 Verificar disponibilidade transformação: `tfBuffer.canTransform(em_relacao, referencia, timestamp, 0.02)`;

if transformação disponível **then**

 Obter transformação *eTb* através de `tfBuffer.lookupTransform`;

 Obter a matriz rotação *eRb* através de *eTb*;

sRb $\leftarrow$ *sRe* $\cdot$ *eRb*;

sffer $\leftarrow$ *sRb* $\cdot$ *bffer*;

stfer $\leftarrow$ *spferA* $\cdot$ *sffer*;

sfobj $\leftarrow$ *sf* - *sffer* - *stdsv*;

stobj $\leftarrow$ *st* - *stfer* - *stdsv*;

 Atualizar *swobj_msg* com *sfobj* e *stobj*;

 Publicar *swobj_msg* no tópico `/swobj`;

end

end

A.3 Algoritmo para Filtragem das Componentes de F/B do Objeto

Algoritmo 3: Filtragem das componentes de força e binário do objeto (ROS)

Data: Mensagens `WrenchStamped` (*msg*) subscritas no tópico `/swobj`

Result: Mensagens `WrenchStamped` (*swobj_filtered_msg*) publicadas no tópico `/swobj_filtered`

Definir coeficientes do filtro *a*, *b*;

Inicializar matrizes para guardar amostras da entrada e saída do filtro: *sfobj_xn*, *stobj_xn* e *sfobj_yn*, *stobj_yn*;

Inicializar vetores de saída atuais: *sfobj_y0*, *stobj_y0*;

Criar publisher *swobj_filtered_pub* para o tópico `/swobj_filtered`;

Subscrever o tópico `/swobj` com a função de callback `swobjCallback`;

Chamar `ros::spin()` para processar callbacks;

Function `swobjCallback(msg, swobj_filtered_pub)`:

swobj_filtered_msg $\leftarrow$ *msg*;

 Atualizar as matrizes de entrada *sfobj_xn* e *stobj_xn* através de *msg*;

 Calcular a saída do filtro *sfobj_y0*, *stobj_y0*;

 Atualizar as matrizes de saída *sfobj_yn*, *stobj_yn*;

 Atualizar *swobj_filtered_msg* com *sfobj_y0* e *stobj_y0*;

 Publicar *swobj_filtered_msg* no tópico `/swobj_filtered`;

end

A.4 Algoritmo para Transformação das Componentes de F/B do Objeto Para Uma Nova Referência

Algoritmo 4: Transformação das componentes de força e binário para uma nova referência (ROS)

Data: Mensagens `WrenchStamped` (msg) subscritas no tópico `/swobj_filtered`

Result: Mensagens `WrenchStamped` ($pwobj_msg$) publicadas no tópico `/pwobj`

Definir o ponto para transformação e a matriz de rotação: $sppreen$ e pRs ;

Inicializar vetores de força e binário do objeto: $sfobj$, $stobj$, $pfobj$ e $ptobj$;

Criar publisher $pwobj_pub$ para o tópico `/pwobj`;

Subscrever o tópico `/swobj_filtered` com a função de callback

`swobj_filteredCallback`;

Chamar `ros::spin()` para processar callbacks;

Function `swobj_filteredCallback(msg, pwobj_pub)`:

$pwobj_msg \leftarrow msg$;

Atualizar $sfobj$, $stobj$ através de msg ;

$pfobj \leftarrow pRs \cdot sfobj$;

$pppreen \leftarrow pRs \cdot sppreen$;

Calcular matriz antissimétrica $pppreenA$ do vetor $pppreen$;

$ptobj \leftarrow pRs \cdot stobj - pppreenA \cdot pfobj$;

Atualizar $pwobj_msg$ com $pfobj$ e $ptobj$;

Publicar $pwobj_msg$ no tópico `/pwobj`;

end

A.5 Algoritmo para Obtenção das Informações Sobre o Contacto e o Objeto

Algoritmo 5: Obter as informações sobre o contacto e o objeto (ROS)

Data: Mensagens `WrenchStamped` (*msg*) subscritas no tópico `/swobj_filtered`
Result: Mensagens `ObjectStamped` (*obj_msg*) publicadas no tópico `/obj`
 Inicializar variáveis globais: *sobj*, *stobj*, e *timestamp*;
 Subscrever o tópico `/swobj_filtered` com a função de callback `swobjFilteredCallback`;
Function `swobj_filteredCallback(msg)`:
 | Atualizar variáveis *sobj*, *stobj* e *timestamp* através de *msg*;
end
while `ros::ok()` **do**
 Estimar a massa e a deteção do objeto: *mobj* e *obj_detect*;
 Limpar e atualizar *obj_msg* com *mobj*, *obj_detect* e *timestamp*;
 if *obj_detect* **then**
 Inicializar *min_diff* como o valor máximo;
 foreach *objeto_i* na *Lista_obj* **do**
 Guardar em *diff* o módulo da diferença entre *mobj* e a massa do *objeto_i*;
 if *diff* < *min_diff* **then**
 Guardar o nome e o ID do *objeto_i* em *obj_name* e *obj_index*;
 min_diff = *diff*;
 end
 end
 if *min_diff* < *limiar_identif* **then**
 Atualizar *obj_msg* com *obj_name* e *obj_index*;
 end
 Calcular a matriz antissimétrica *sobjA* do vetor *sobj*;
 Adicionar $-sobjA$ e *stobj* aos buffers *A* e *b*;
 if *buffer_full* **then**
 Calcular *spobj* através da técnica SVD, utilizando *A* e *b*;
 Atualizar *obj_msg* com *spobj*;
 end
 sample_count_slip++;
 if *sample_count_slip* == *Fs_slip_num_sample* **then**
 sample_count_slip = 0;
 Guardar em *spobj_desloc_norm* a norma do vetor de deslocamento de duas amostras *spobj*;
 Verificar presença de escorregamento total e guardar o resultado em *slip_detect*;
 end
 Atualizar *obj_msg* com *spobj_desloc_norm* e *slip_detect*;
 else
 Limpar buffers e reiniciar variáveis;
 end
 Publicar *obj_msg* no tópico `/obj`;
 Processar callback com `ros::spinOnce()`;
 Aguardar próximo ciclo com `loop_rate.sleep()`;
end

A.6 Algoritmo para Estimar a Pose do Objeto

Algoritmo 6: Estimar a pose do objeto (ROS)

Data: Mensagens `ObjectStamped` (*msg*) subscritas no tópico `/obj`

Result: Mensagens `PoseStamped` (*pose_msg*) publicadas no tópico `/obj_pose`

Inicializar variáveis globais: *spobj* e *timestamp*;

Subscrever o tópico `/obj` com a função de callback `objectPositionCallback`;

Function `objectPositionCallback(msg):`

 | Atualizar variáveis *spobj* e *timestamp* através de *msg*;

end

while *ros::ok()* **do**

 | Processar callback pendente com `ros::spinOnce()`;

 | Aguardar próximo ciclo;

 | Calcular o ângulo de rotação *alpha* através de estruturas condicionais **if**, e
 | instruções de controlo de fluxo **continue**;

 | *alpha_total* += *alpha*;

 | Atualizar *pose_msg* com *spobj*, *alpha_total* e *timestamp*;

 | Publicar *pose_msg* no tópico `/obj_pose`;

end

Anexo B

Matrizes de Orientação Utilizadas no Método de Calibração LRO

O presente anexo apresenta as matrizes de orientação ${}^E\mathbf{R}_B$ utilizadas para orientar o punho do manipulador robótico, com o objetivo de obter observações de Força e Binário (F/B) para o método de calibração *Limited Robot Orientation* (LRO).

B.1 Matrizes B

$$\begin{aligned}
{}^E\mathbf{R}_{B1} &= \begin{bmatrix} 0.436 & -0.616 & -0.656 \\ -0.560 & -0.756 & 0.339 \\ -0.705 & 0.220 & -0.675 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B2} &= \begin{bmatrix} -0.910 & 0.220 & 0.351 \\ -0.042 & 0.794 & -0.607 \\ -0.412 & -0.567 & -0.713 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B3} &= \begin{bmatrix} 0.312 & -0.887 & 0.342 \\ 0.123 & 0.394 & 0.911 \\ -0.942 & -0.242 & 0.232 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B4} &= \begin{bmatrix} 0.127 & -0.179 & 0.976 \\ -0.288 & 0.935 & 0.209 \\ -0.949 & -0.307 & 0.067 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B5} &= \begin{bmatrix} 0.373 & -0.915 & 0.155 \\ -0.738 & -0.191 & 0.647 \\ -0.562 & -0.356 & -0.747 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B6} &= \begin{bmatrix} -0.140 & -0.990 & 0.026 \\ 0.294 & -0.016 & 0.956 \\ -0.946 & 0.142 & 0.293 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B7} &= \begin{bmatrix} 0.901 & 0.314 & -0.299 \\ -0.262 & 0.944 & 0.203 \\ 0.346 & -0.104 & 0.932 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B8} &= \begin{bmatrix} 0.263 & 0.587 & -0.765 \\ -0.965 & 0.161 & -0.208 \\ 0.001 & 0.793 & 0.609 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B9} &= \begin{bmatrix} -0.459 & 0.859 & 0.227 \\ 0.749 & 0.237 & 0.619 \\ 0.478 & 0.454 & -0.752 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B10} &= \begin{bmatrix} 0.226 & 0.956 & 0.187 \\ 0.668 & -0.292 & 0.685 \\ 0.709 & -0.030 & -0.704 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B11} &= \begin{bmatrix} 0.641 & 0.098 & -0.761 \\ -0.624 & 0.643 & -0.443 \\ 0.446 & 0.759 & 0.474 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B12} &= \begin{bmatrix} -0.004 & 0.999 & 0.014 \\ -0.984 & -0.007 & 0.180 \\ 0.181 & -0.013 & 0.983 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B13} &= \begin{bmatrix} -0.706 & 0.205 & 0.678 \\ 0.121 & 0.978 & -0.169 \\ -0.697 & -0.037 & -0.716 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B14} &= \begin{bmatrix} 0.795 & -0.433 & 0.424 \\ -0.012 & -0.711 & -0.703 \\ 0.606 & 0.554 & -0.571 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B15} &= \begin{bmatrix} -0.249 & 0.150 & -0.957 \\ -0.037 & -0.989 & -0.145 \\ -0.968 & -0.001 & 0.252 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B16} &= \begin{bmatrix} 0.584 & -0.037 & 0.811 \\ 0.771 & -0.286 & -0.569 \\ 0.253 & 0.957 & -0.138 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B17} &= \begin{bmatrix} -0.622 & 0.705 & 0.342 \\ 0.008 & 0.442 & -0.897 \\ -0.783 & -0.555 & -0.280 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B18} &= \begin{bmatrix} 0.844 & -0.075 & 0.531 \\ -0.449 & -0.639 & 0.624 \\ 0.292 & -0.766 & -0.573 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B19} &= \begin{bmatrix} 0.947 & 0.321 & -0.024 \\ 0.160 & -0.534 & -0.830 \\ -0.279 & 0.782 & -0.557 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B20} &= \begin{bmatrix} 0.509 & 0.858 & 0.067 \\ -0.758 & 0.410 & 0.507 \\ 0.408 & -0.309 & 0.859 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B21} &= \begin{bmatrix} -0.142 & 0.417 & -0.898 \\ -0.464 & 0.773 & 0.432 \\ 0.874 & 0.478 & 0.084 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B22} &= \begin{bmatrix} 0.766 & -0.642 & 0.014 \\ -0.283 & -0.357 & -0.891 \\ 0.577 & 0.679 & -0.455 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B23} &= \begin{bmatrix} 0.391 & -0.050 & -0.919 \\ 0.123 & -0.987 & 0.106 \\ -0.912 & -0.154 & -0.379 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B24} &= \begin{bmatrix} -0.007 & 0.583 & -0.812 \\ 0.416 & 0.740 & 0.528 \\ 0.909 & -0.334 & -0.248 \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{B.1}$$

B.2 Matrices E

$$\begin{aligned}
{}^E\mathbf{R}_{B1} &= \begin{bmatrix} 0.624 & -0.574 & -0.53 \\ -0.078 & 0.629 & -0.773 \\ 0.778 & 0.524 & 0.348 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B2} &= \begin{bmatrix} 0.36 & 0.755 & -0.548 \\ -0.073 & -0.563 & -0.823 \\ -0.93 & 0.336 & -0.148 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B3} &= \begin{bmatrix} -0.995 & 0.026 & -0.101 \\ -0.018 & 0.912 & 0.411 \\ 0.103 & 0.41 & -0.906 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B4} &= \begin{bmatrix} -0.121 & -0.093 & 0.988 \\ -0.55 & 0.835 & 0.011 \\ -0.826 & -0.543 & -0.152 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B5} &= \begin{bmatrix} -0.309 & 0.928 & -0.208 \\ 0.79 & 0.372 & 0.487 \\ 0.53 & -0.014 & -0.848 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B6} &= \begin{bmatrix} 0.884 & 0.412 & 0.223 \\ 0.184 & 0.134 & -0.974 \\ -0.431 & 0.902 & 0.043 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B7} &= \begin{bmatrix} -0.298 & -0.641 & -0.708 \\ 0.068 & 0.725 & -0.685 \\ 0.952 & -0.253 & -0.172 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B8} &= \begin{bmatrix} -0.289 & 0.308 & -0.906 \\ 0.425 & 0.89 & 0.167 \\ 0.858 & -0.337 & -0.388 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B9} &= \begin{bmatrix} -0.681 & -0.599 & -0.422 \\ -0.431 & 0.793 & -0.431 \\ 0.592 & -0.112 & -0.798 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B10} &= \begin{bmatrix} 0.691 & 0.721 & 0.050 \\ -0.177 & 0.102 & 0.979 \\ 0.701 & -0.686 & 0.198 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B11} &= \begin{bmatrix} 0.226 & 0.967 & 0.113 \\ -0.550 & 0.031 & 0.835 \\ 0.804 & -0.251 & 0.539 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B12} &= \begin{bmatrix} 0.337 & 0.835 & -0.436 \\ -0.605 & -0.163 & -0.78 \\ -0.722 & 0.526 & 0.450 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B13} &= \begin{bmatrix} 0.505 & 0.491 & -0.710 \\ -0.858 & 0.198 & -0.474 \\ -0.092 & 0.849 & 0.521 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B14} &= \begin{bmatrix} 0.405 & -0.806 & -0.431 \\ 0.614 & -0.109 & 0.782 \\ -0.677 & -0.582 & 0.451 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B15} &= \begin{bmatrix} 0.037 & 0.017 & 0.999 \\ -0.306 & 0.952 & -0.005 \\ -0.951 & -0.306 & 0.040 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B16} &= \begin{bmatrix} 0.249 & -0.026 & 0.968 \\ -0.260 & 0.961 & 0.093 \\ -0.933 & -0.274 & 0.233 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B17} &= \begin{bmatrix} 0.006 & 0.581 & 0.814 \\ 0.168 & 0.802 & -0.573 \\ -0.986 & 0.140 & -0.092 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B18} &= \begin{bmatrix} 0.052 & 0.672 & -0.739 \\ -0.001 & 0.740 & 0.673 \\ 0.999 & -0.034 & 0.039 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B19} &= \begin{bmatrix} 0.379 & -0.839 & -0.391 \\ -0.684 & 0.030 & -0.728 \\ 0.623 & 0.544 & -0.563 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B20} &= \begin{bmatrix} 0.331 & 0.874 & -0.355 \\ 0.481 & 0.167 & 0.861 \\ 0.812 & -0.456 & -0.365 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B21} &= \begin{bmatrix} -0.080 & -0.554 & -0.829 \\ 0.039 & -0.833 & 0.552 \\ -0.996 & 0.012 & 0.088 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B22} &= \begin{bmatrix} 0.266 & -0.710 & 0.653 \\ -0.708 & -0.603 & -0.367 \\ 0.654 & -0.365 & -0.663 \end{bmatrix}, \\
{}^E\mathbf{R}_{B23} &= \begin{bmatrix} -0.792 & 0.505 & -0.344 \\ -0.601 & -0.544 & 0.585 \\ 0.109 & 0.670 & 0.734 \end{bmatrix}, & {}^E\mathbf{R}_{B24} &= \begin{bmatrix} 0.412 & -0.726 & 0.550 \\ 0.132 & -0.550 & -0.825 \\ 0.901 & 0.413 & -0.131 \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{B.2}$$