

Integração de Dados Visuais e Inerciais Para o Equilíbrio de Um Robô Humanóide

João Carlos Pimentel Fidalgo Peixoto

Orientador: Professor Vítor Santos
Coorientador: Professor Filipe Silva

60140

Universidade de Aveiro,
Departamento de Engenharia Mecânica
joao.peixoto@ua.pt



1 Problema e Objetivos

2 *Setup* Experimental

3 Obtenção dos Dados Inerciais

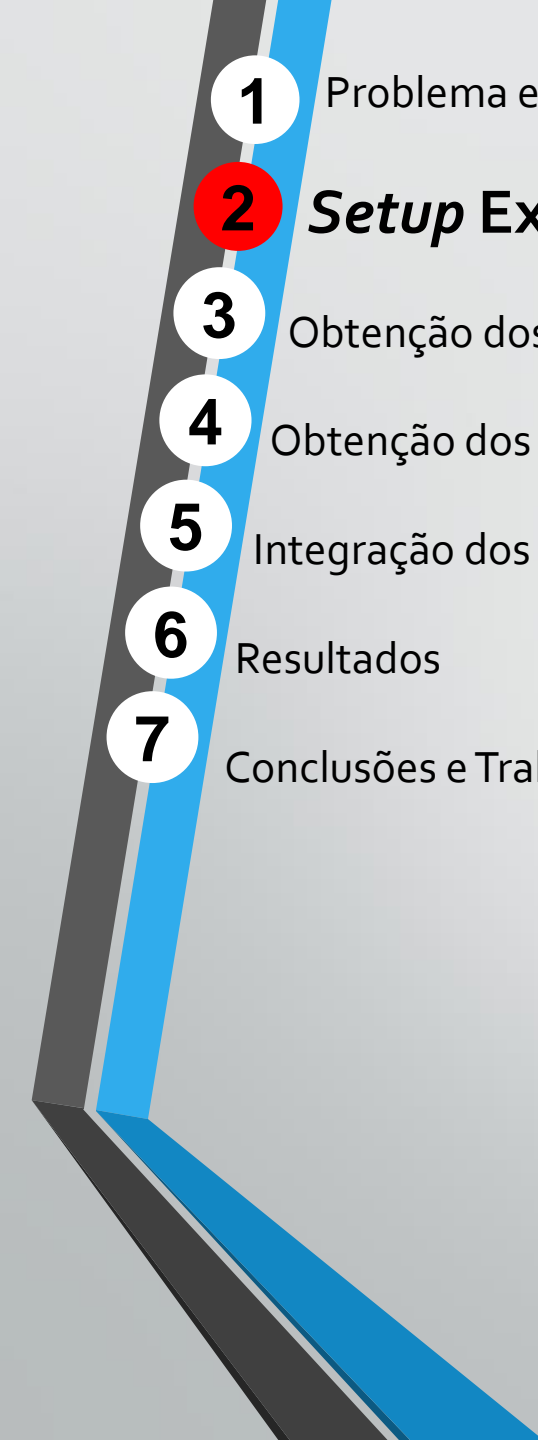
4 Obtenção dos Dados Visuais

5 Integração dos Dados no Filtro de Kalman

6 Resultados

7 Conclusões e Trabalho Futuro

Estrutura



1 Problema e Objetivos

2 ***Setup Experimental***

3 Obtenção dos Dados Inerciais

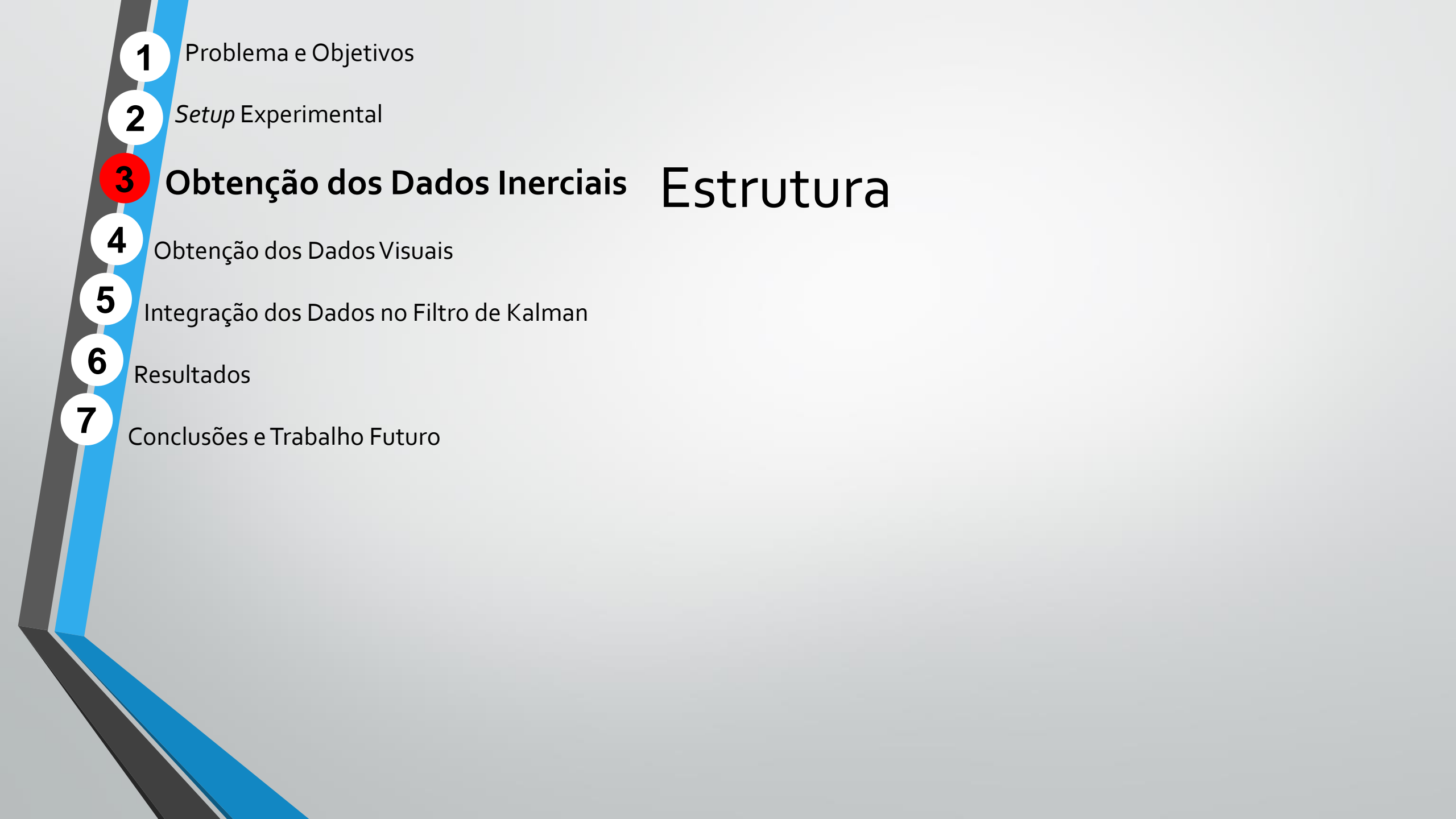
4 Obtenção dos Dados Visuais

5 Integração dos Dados no Filtro de Kalman

6 Resultados

7 Conclusões e Trabalho Futuro

Estrutura



1 Problema e Objetivos

2 *Setup* Experimental

3 Obtenção dos Dados Inerciais Estrutura

4 Obtenção dos Dados Visuais

5 Integração dos Dados no Filtro de Kalman

6 Resultados

7 Conclusões e Trabalho Futuro

Estrutura

1 Problema e Objetivos

2 *Setup* Experimental

3 Obtenção dos Dados Inerciais

4 Obtenção dos Dados Visuais

5 Integração dos Dados no Filtro de Kalman

6 Resultados

7 Conclusões e Trabalho Futuro

Estrutura

- 1 Problema e Objetivos
- 2 *Setup* Experimental
- 3 Obtenção dos Dados Inerciais
- 4 Obtenção dos Dados Visuais
- 5 Integração dos Dados no Filtro de Kalman**
- 6 Resultados
- 7 Conclusões e Trabalho Futuro

Estrutura

- 1 Problema e Objetivos
- 2 *Setup* Experimental
- 3 Obtenção dos Dados Inerciais
- 4 Obtenção dos Dados Visuais
- 5 Integração dos Dados no Filtro de Kalman
- 6 Resultados**
- 7 Conclusões e Trabalho Futuro

Estrutura

- 1 Problema e Objetivos
- 2 *Setup* Experimental
- 3 Obtenção dos Dados Inerciais
- 4 Obtenção dos Dados Visuais
- 5 Integração dos Dados no Filtro de Kalman
- 6 Resultados
- 7 Conclusões e Trabalho Futuro**



1

2

3

4

5

6

7

Enquadramento

- PHUA (Projeto Humanoide da Universidade de Aveiro)
- Humanoide
 - 6 Kg; 667 mm; 27 GDL
- Perceção
 - 8 sensores de força nos pés
 - Camera fire-wire
 - 9 IMUs (unidades de medição inercial)



1

2

3

4

5

6

7

Problema

- **Desenvolver um algoritmo de equilíbrio baseado no movimento da cabeça de um robô humanóide;**
- Medir o movimento da cabeça do humanóide;



1

2

3

4

5

6

7

Problema

- Desenvolver um algoritmo de equilíbrio baseado no movimento da cabeça de um robô humanóide;
- **Medir o movimento da cabeça do humanóide;**



1

2

3

4

5

6

7

Objetivo

- Melhorar a precisão das medidas, fundindo duas fontes de dados distintas.



1

2

3

4

5

6

7

Setup Experimental

- Sensores Inerciais;
- Sensores Visuais;
- Unidades de Processamento.

1

2

3

4

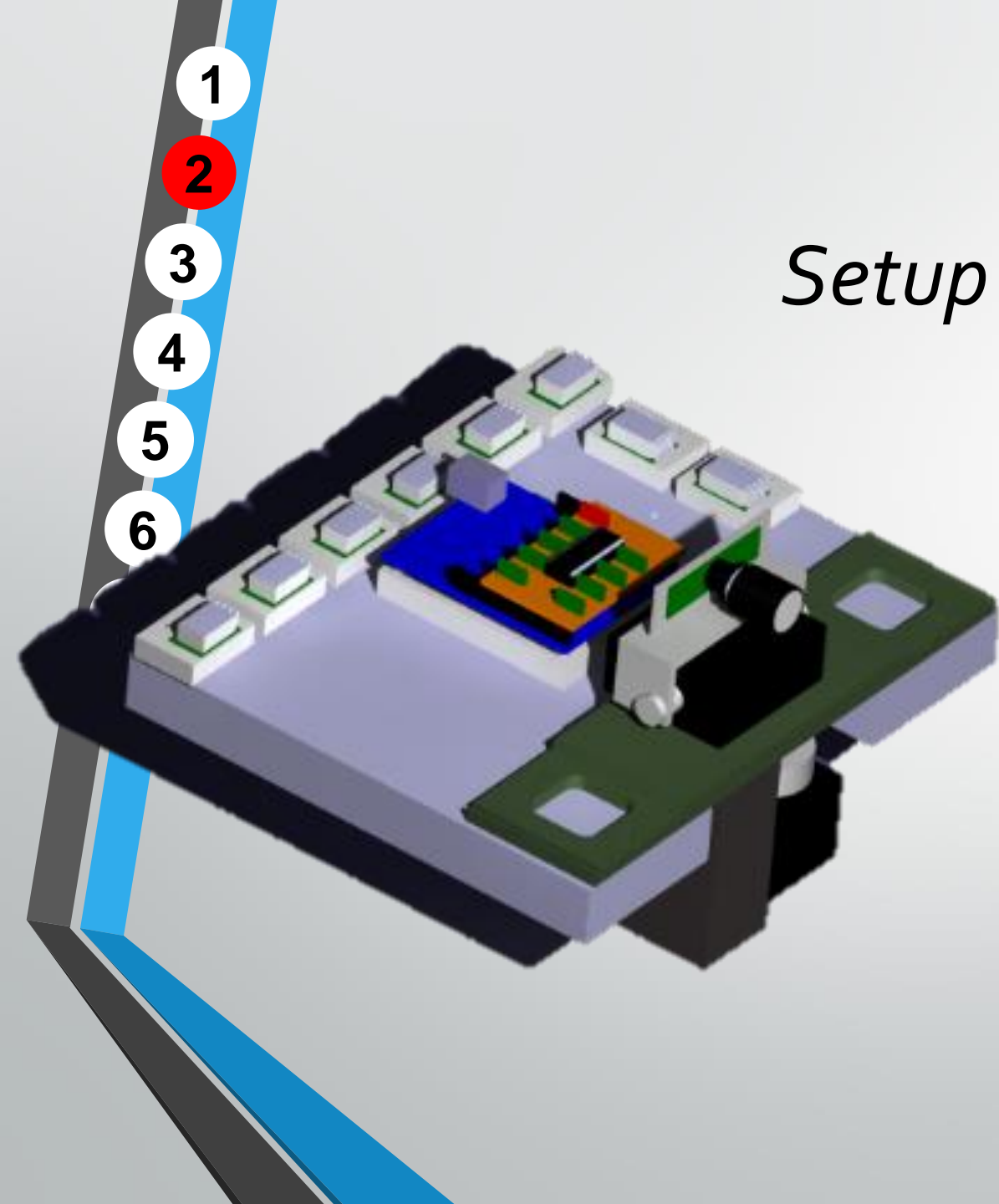
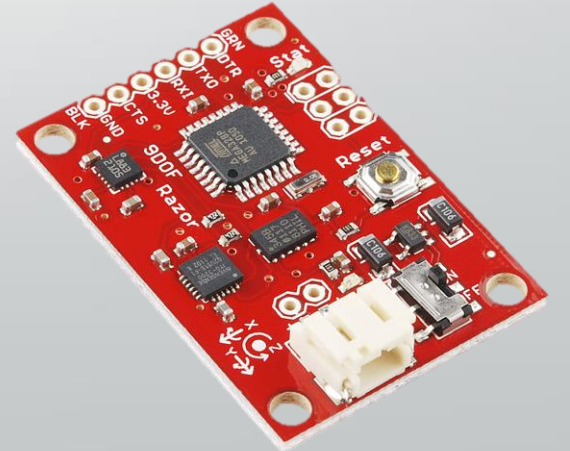
5

6

Setup Experimental

- Sensor A
- Sensor B
- Unidade de Processamento
- Camera fire-wire

RAZOR 9DOF - SEN 10736



1

2

3

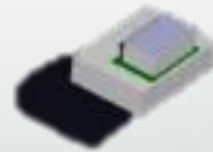
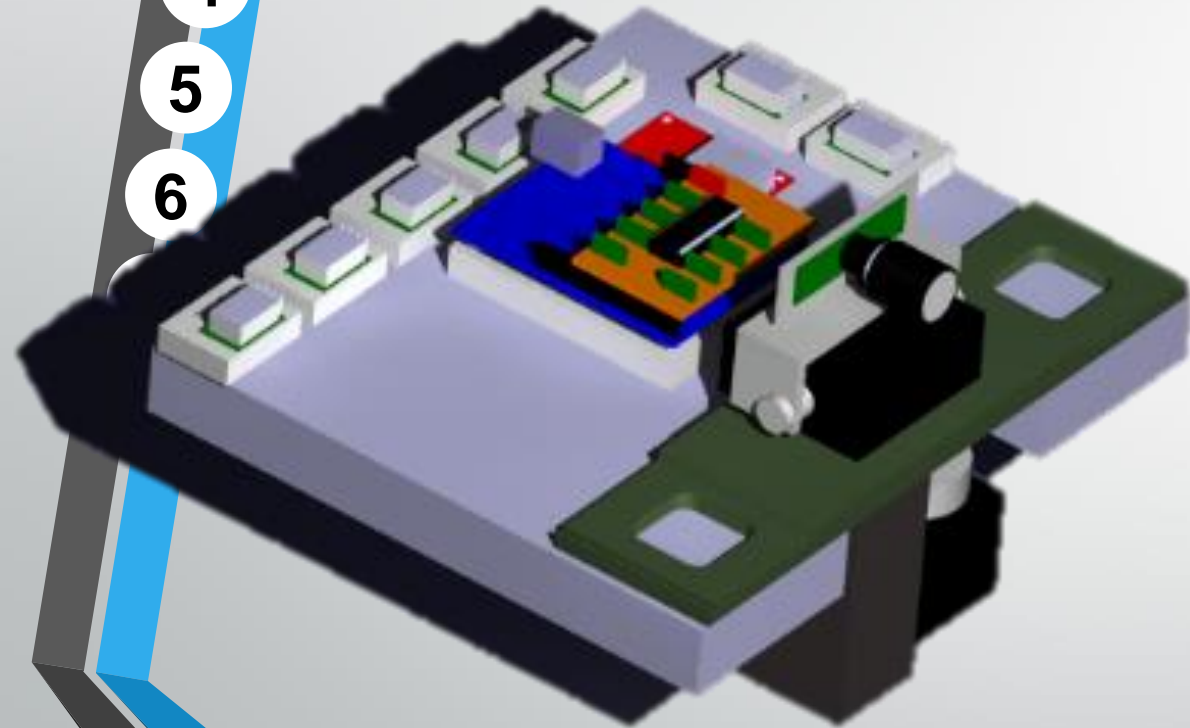
4

5

6

Setup Experimental

- Sensor A
- **Sensor B**
- Unidade de Processamento
- Camera fire-wire



POLOLU - MinIMU9DOF v2



1

2

3

4

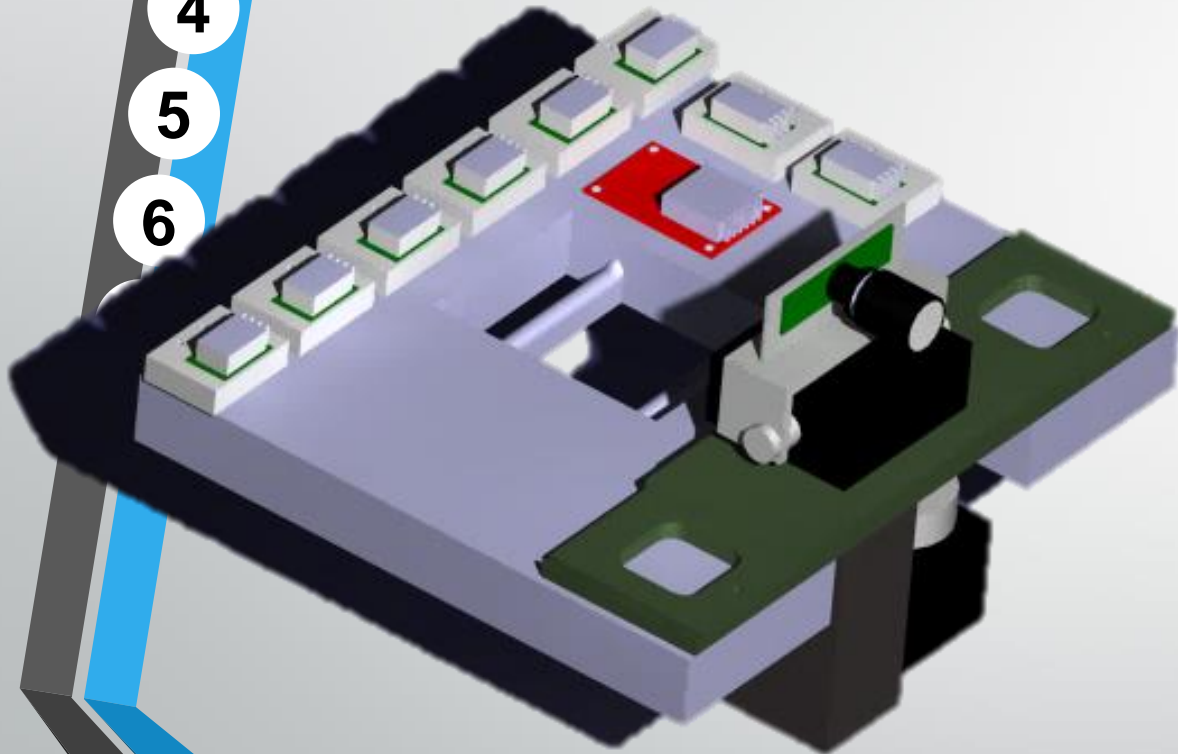
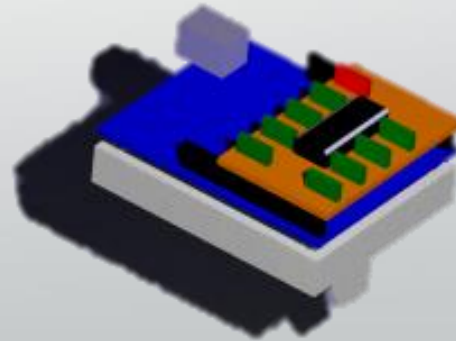
5

6

Setup Experimental

- Sensor A
- Sensor B
- Unidade de Processamento
- Camera fire-wire

Arduino UNO R3



1

2

3

4

5

6

Setup Experimental

- Sensor A
- Sensor B
- Unidade de Processamento
- Camera fire-wire

Firefly MV-03MTC - Pointgrey





1

2

3

4

5

6

7

Setup Experimental

- Dificuldade na criação de experiências;
- Falta de uma "*ground truth*" de confiança.

1

2

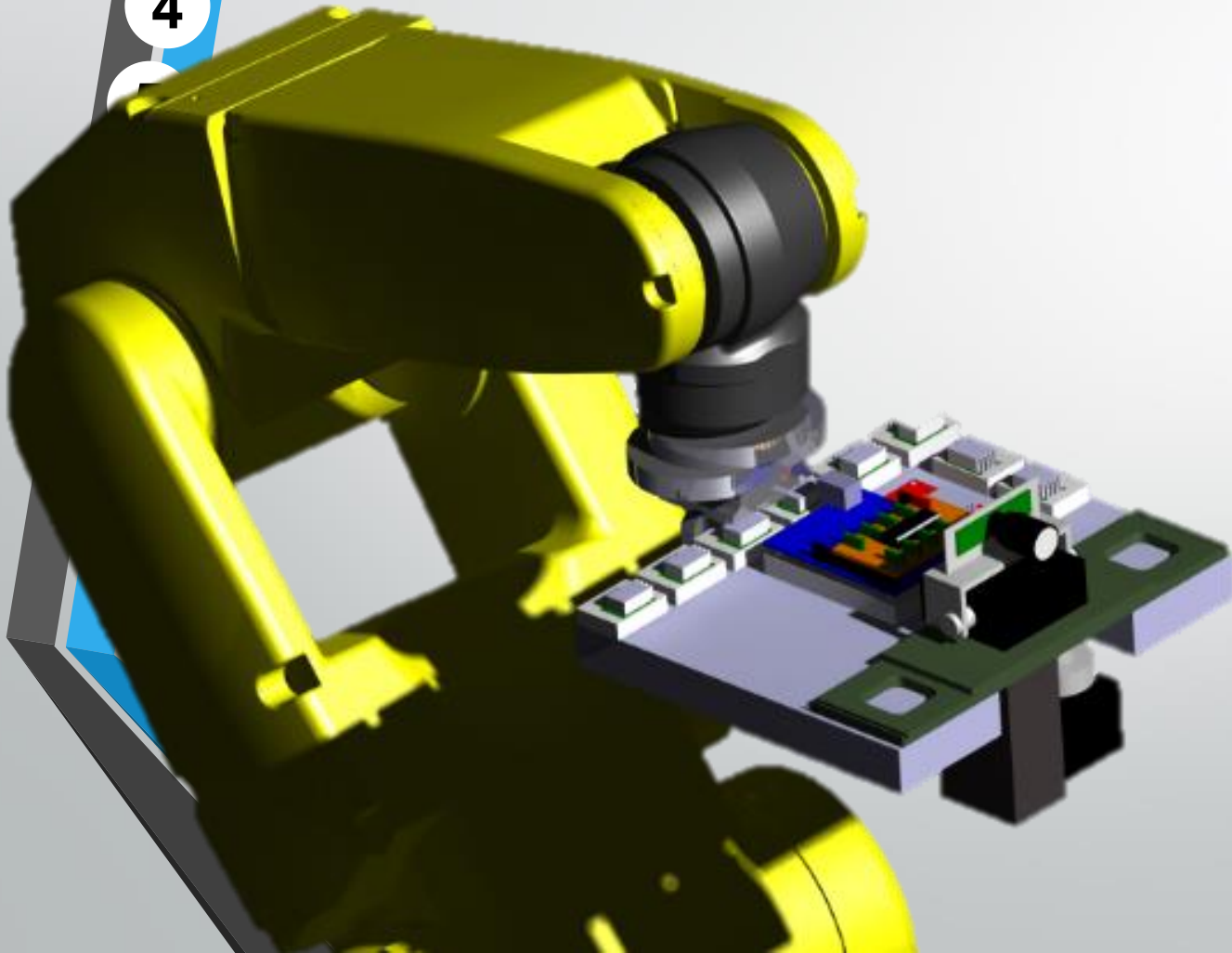
3

4

Setup Experimental

FANUC LR Mate 200iD

- Alta repetibilidade;
- "*ground truth*" de confiança;
- Facilidade na criação de experiências.



1

2

3

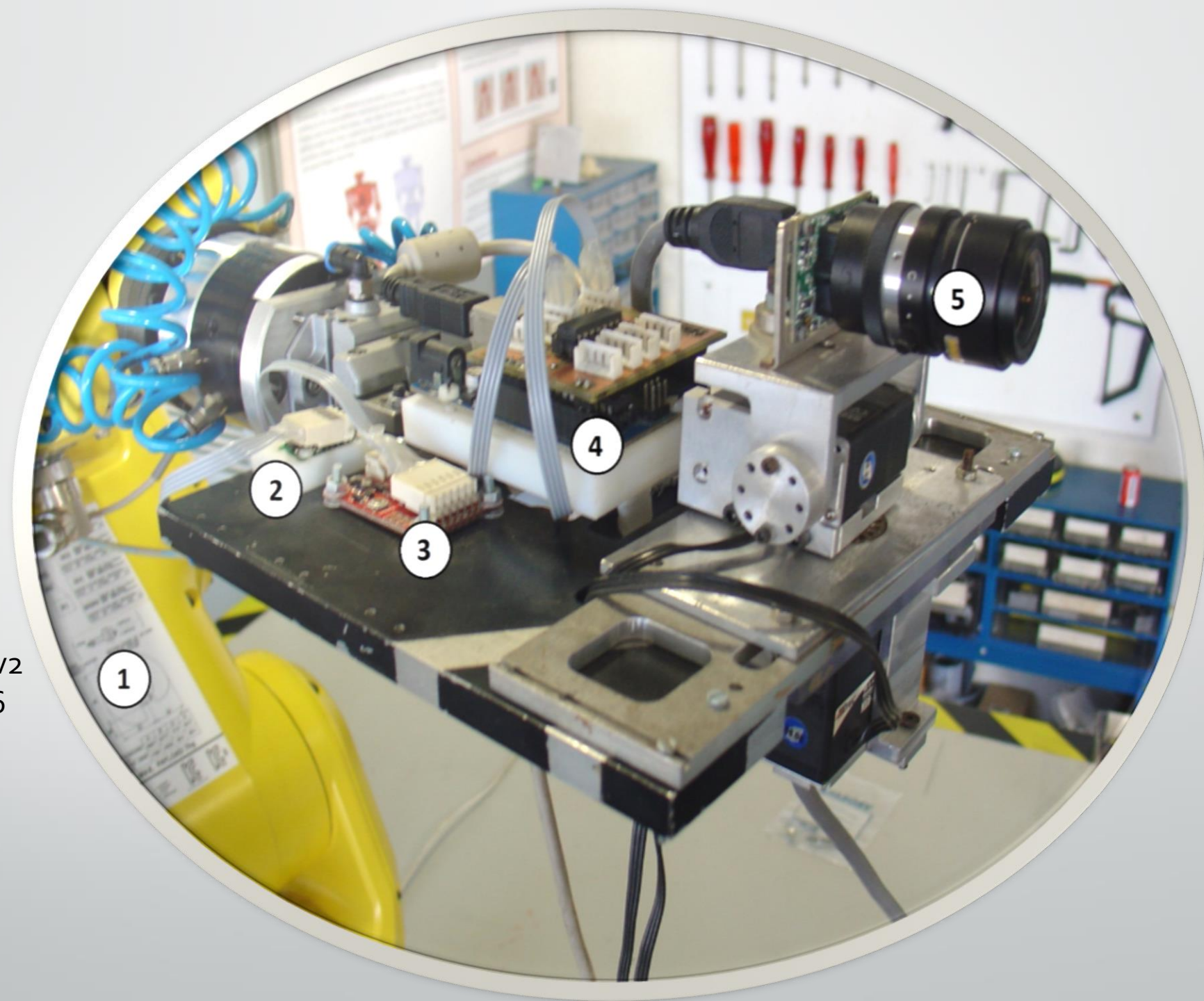
4

5

6

7

- 1) Fanuc 200iD
- 2) POLOLU - MinIMU9DOF v2
- 3) RAZOR 9DOF - SEN 10736
- 4) Arduino UNO R3
- 5) Fire-wire Camera





1

2

3

4

5

6

7

Setup Experimental

- Como comunicar com o manipulador industrial?
 - fanuc_control
 - TCP/IP
 - ROBCOMM

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

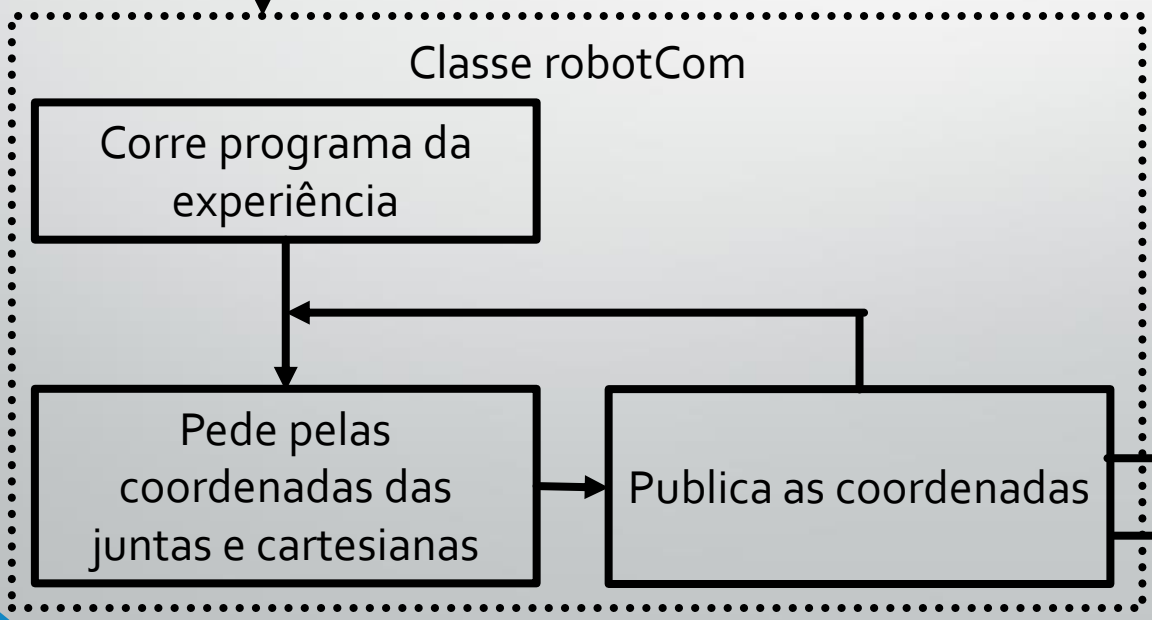
Verifica Inputs

Inicializa:

- ROS
- Publishers
- Classe dataReceiver

fanuc_control

Comunicação TCP/IP
entre PC e
manipulador



1

2

3

4

5

6

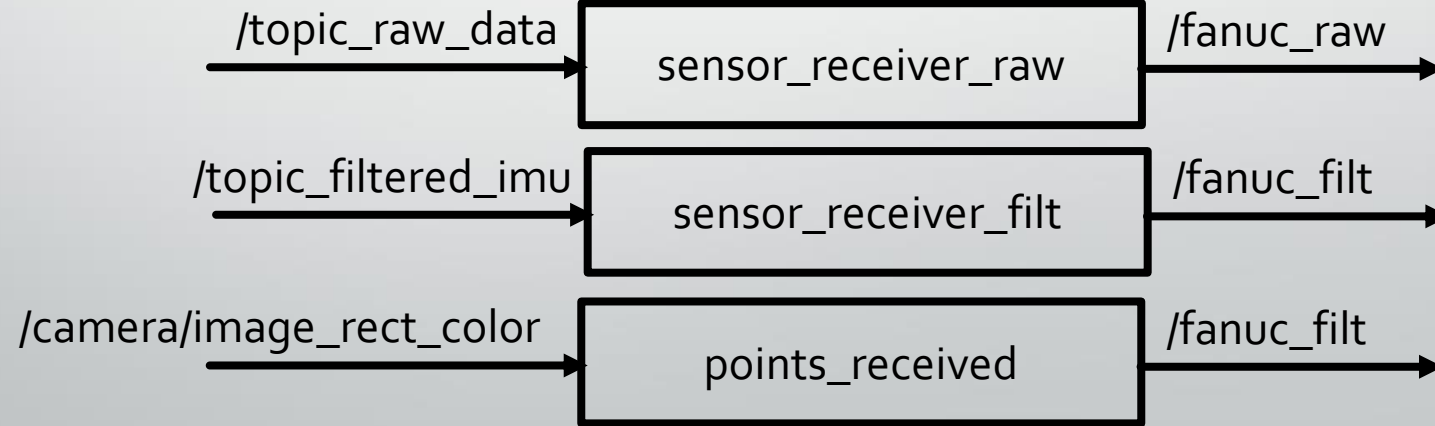
7

fanuc_control

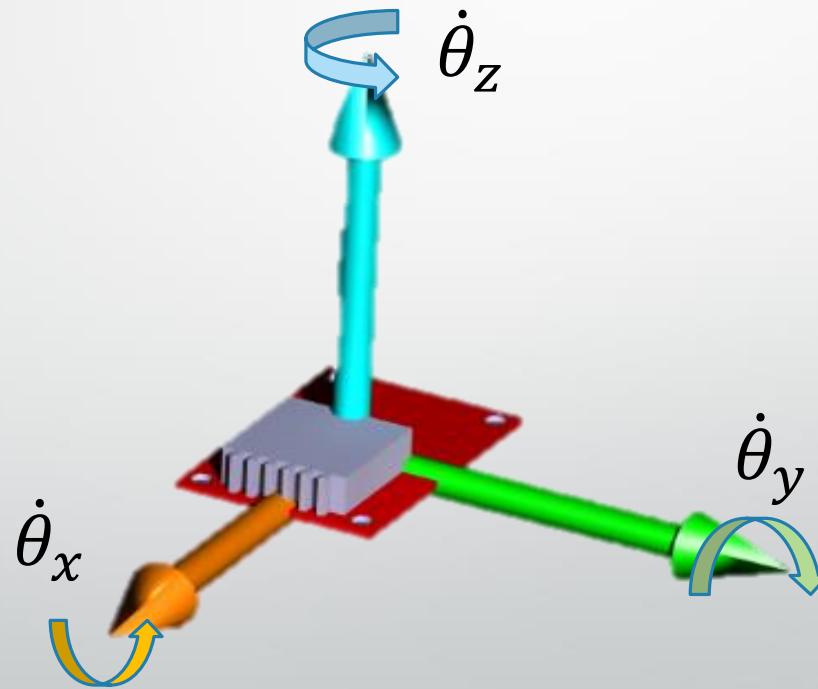
dataReceiver Class

Initializes subscribers:

- sensor_receiver_raw
- sensor_receiver_filt
- points_received



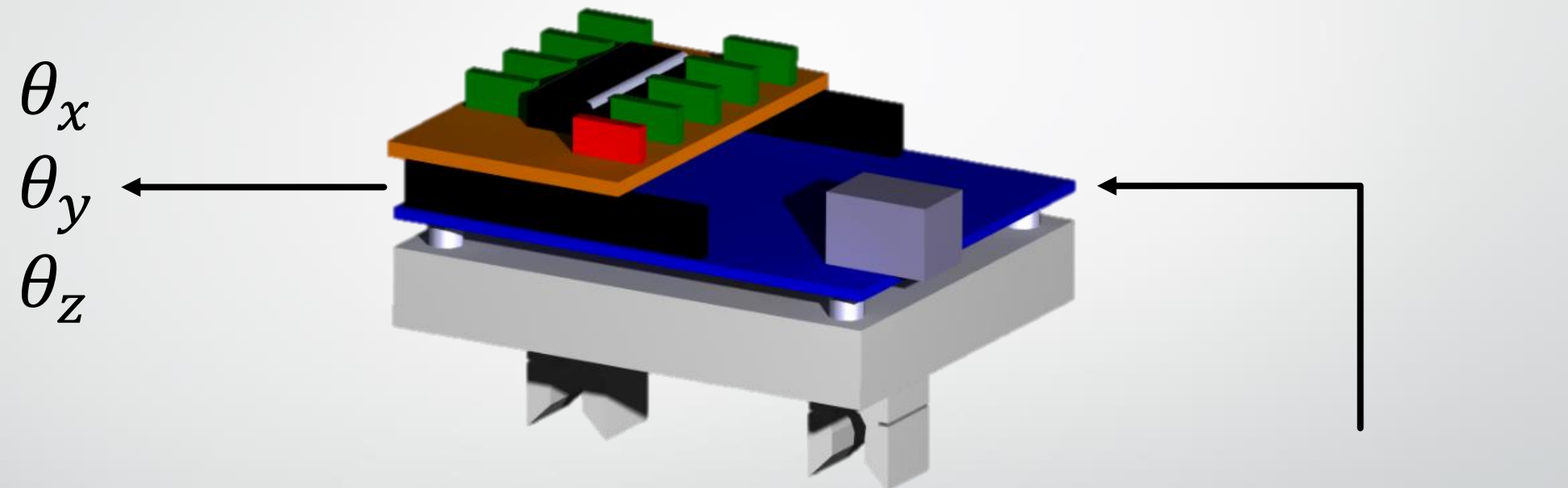
Obtenção dos Dados Inerciais



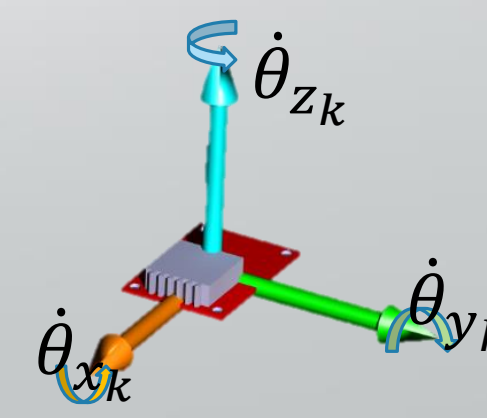
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

Obtenção dos Dados Inerciais



$$\begin{aligned}\theta_{x_{k+1}} &= \theta_{x_k} + \Delta t \cdot \dot{\theta}_{x_k} \\ \theta_{y_{k+1}} &= \theta_{y_k} + \Delta t \cdot \dot{\theta}_{y_k} \\ \theta_{z_{k+1}} &= \theta_{z_k} + \Delta t \cdot \dot{\theta}_{z_k}\end{aligned}$$





1

2

3

4

5

6

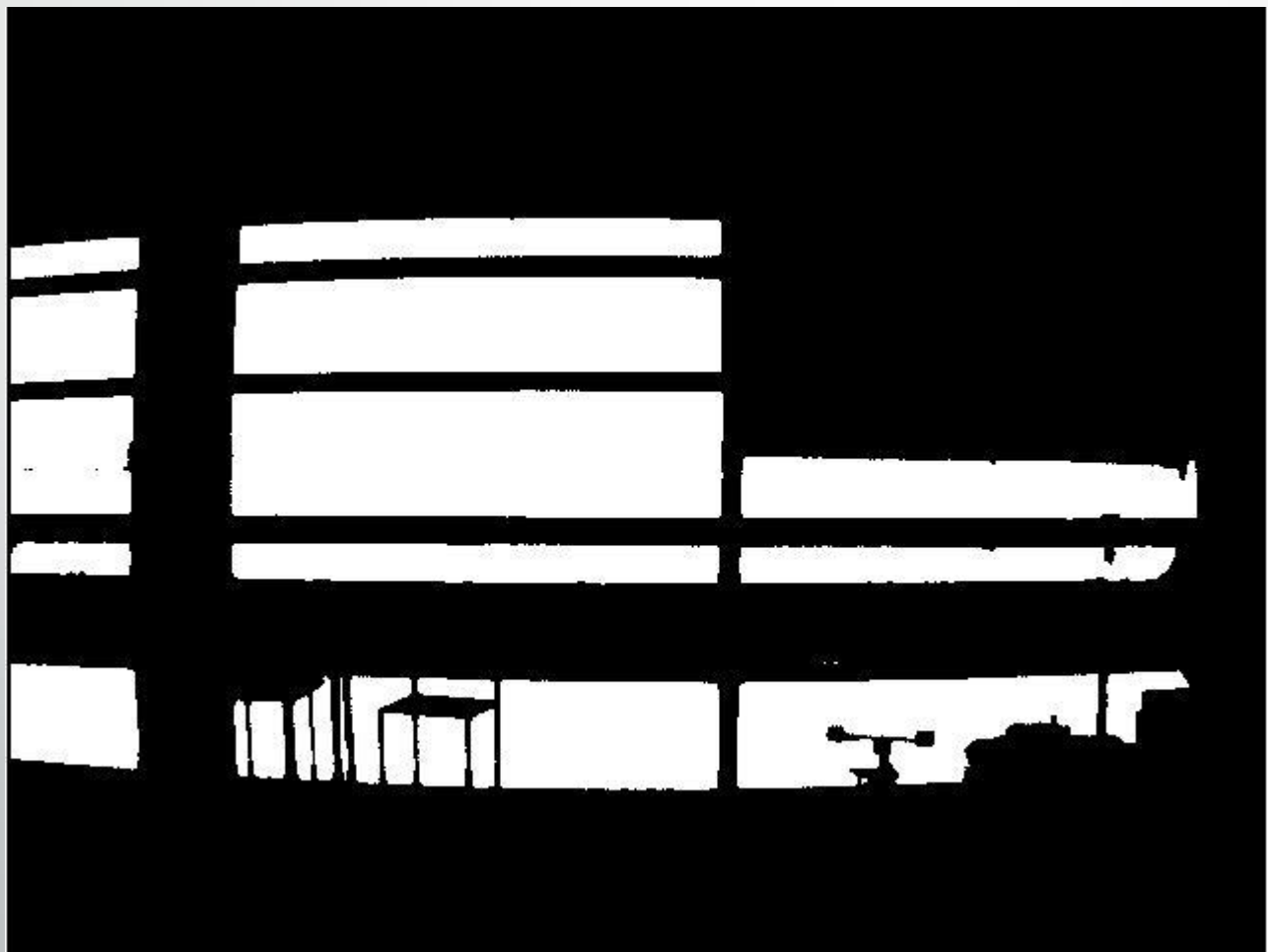
7

Obtenção dos Dados Visuais

- Método da Detecção de Blobs;
- Método da Detecção de Features.

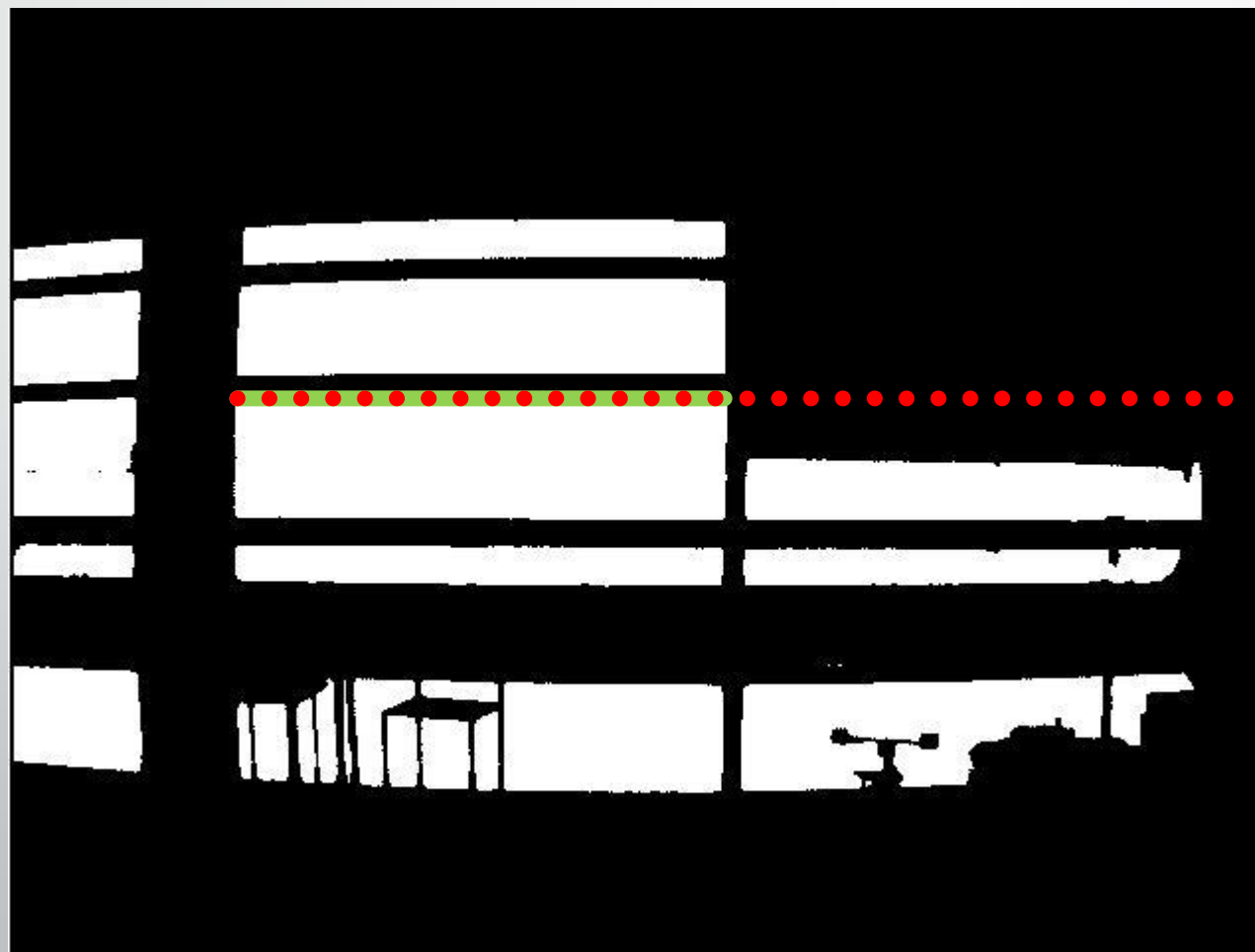
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

Deteção de Blobs



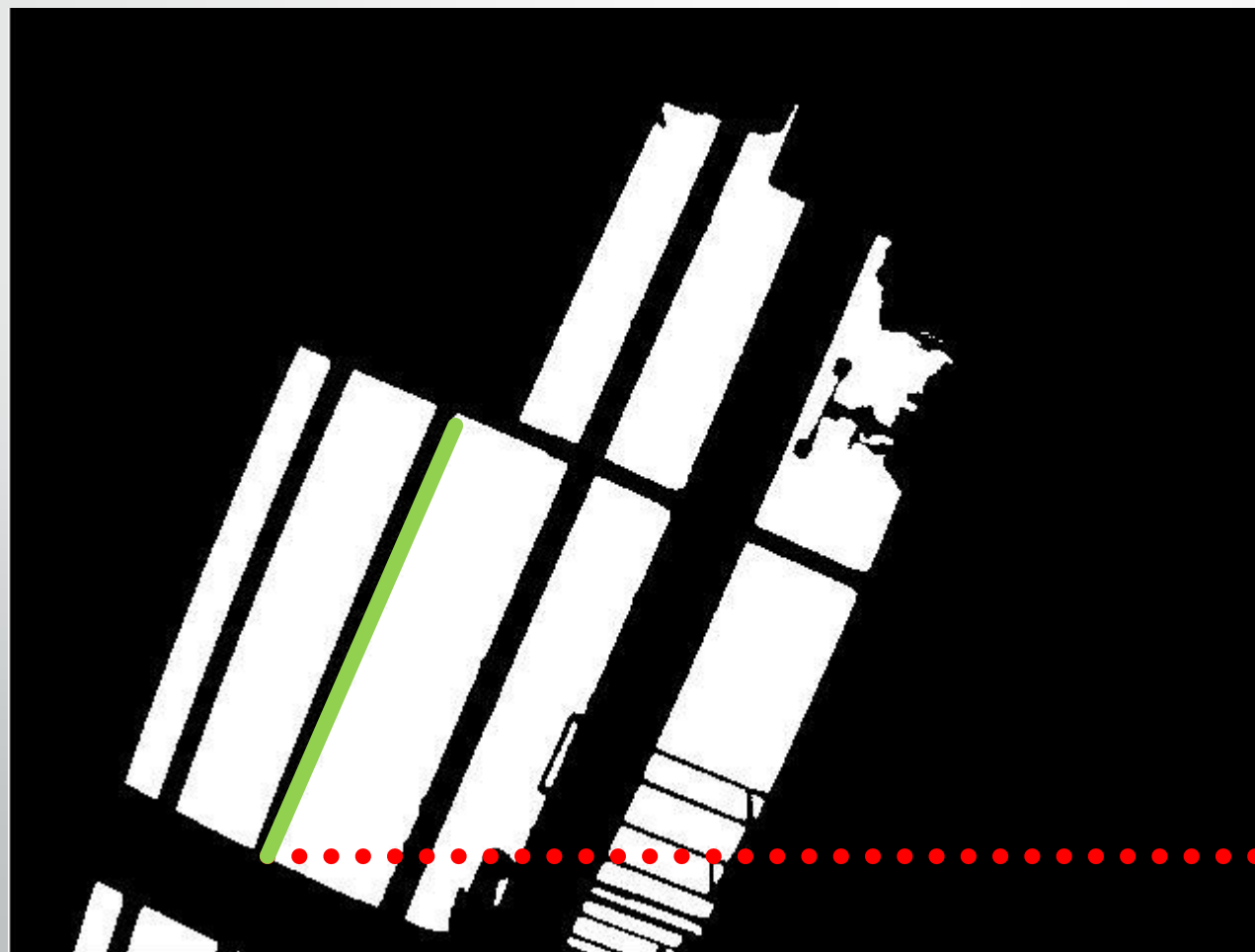
Deteção de Blobs

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 $\theta_y = 0$ (°)
- 6
- 7



Deteção de Blobs

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 $\theta_y = 55 (^\circ)$
- 6
- 7





1

2

3

4

5

6

7

Deteção de Blobs

Vantagens

- Medição direta da posição angular (orientação);
- Não depende de medidas previamente efetuadas.

Desvantagens

- Incapacidade de operar em certo ambientes.

1

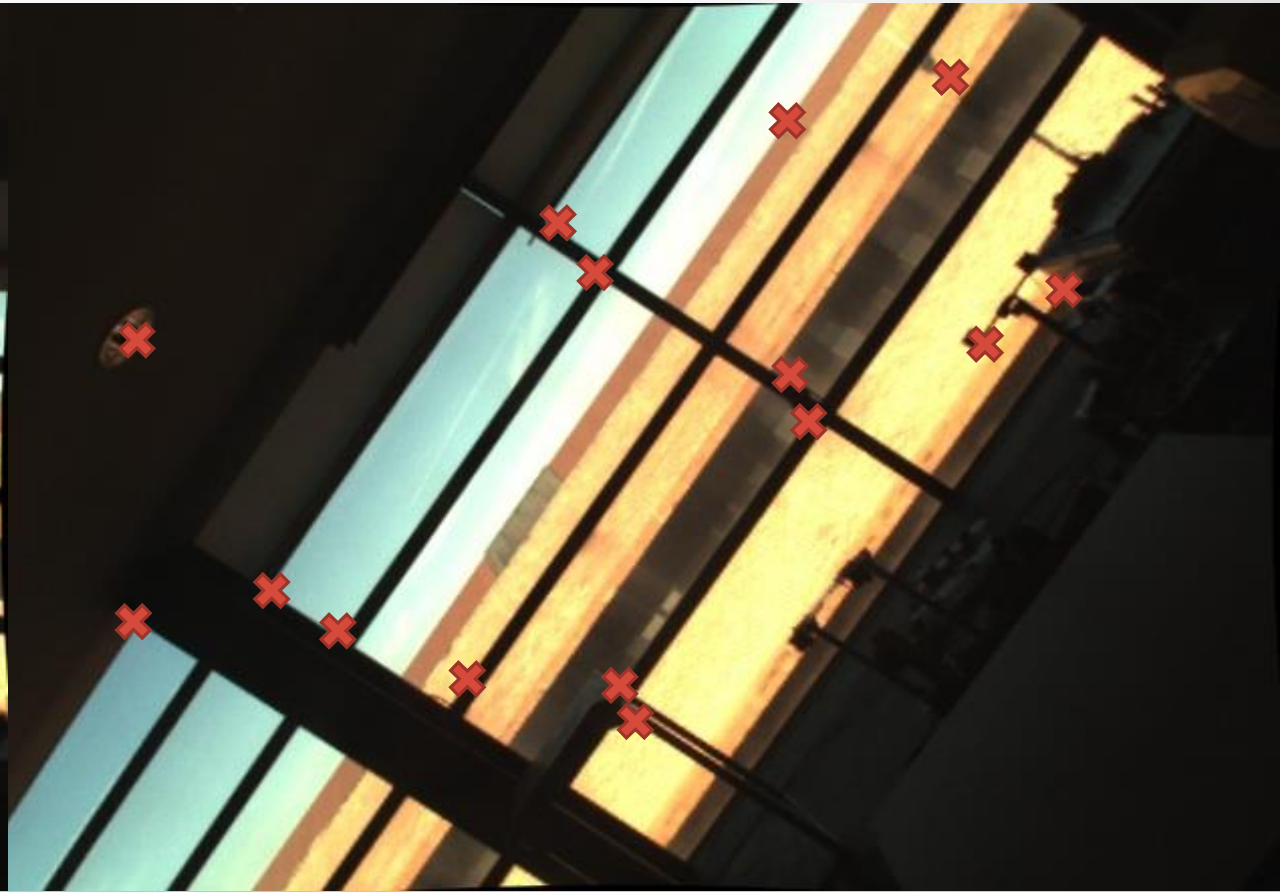
2

3

4

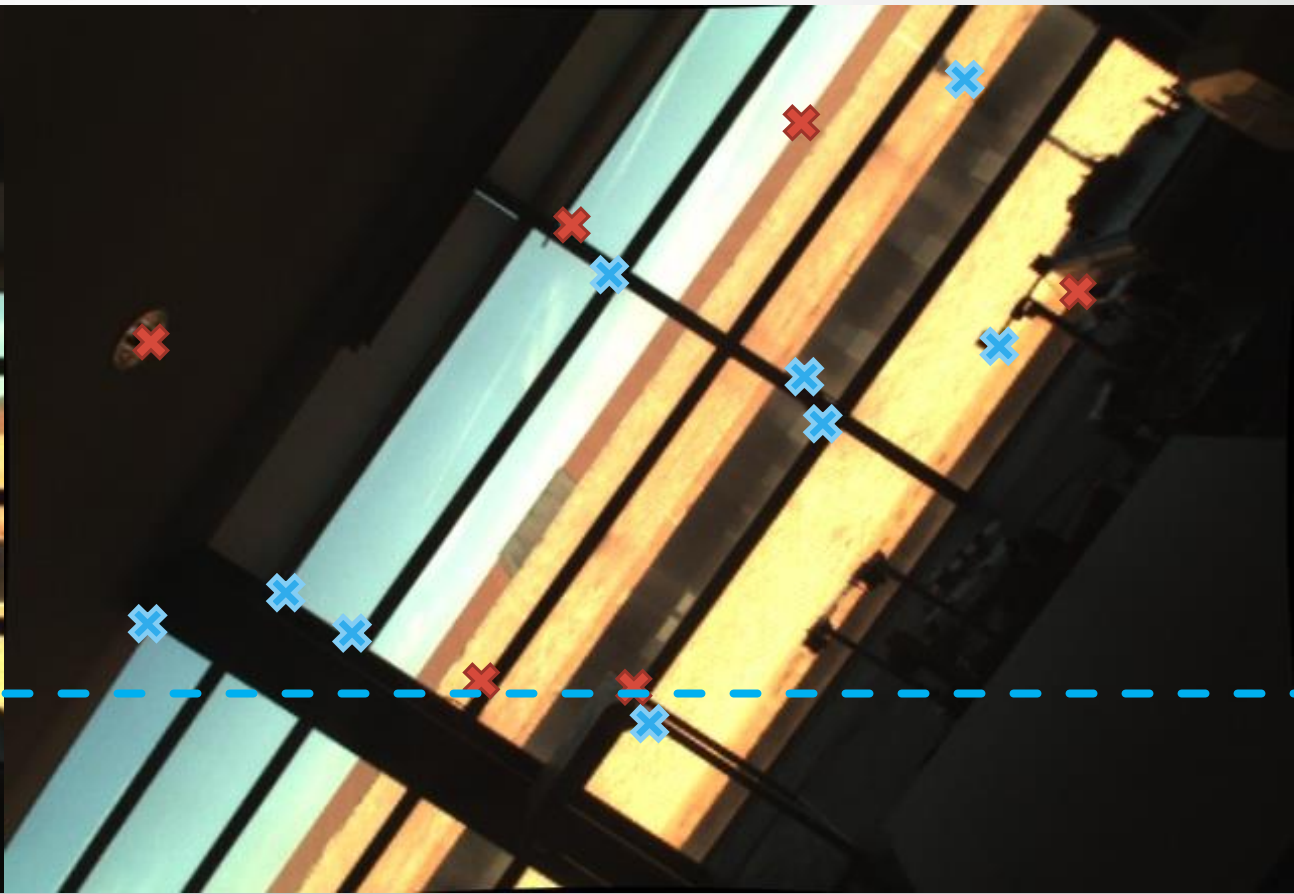
5

Deteção de Features



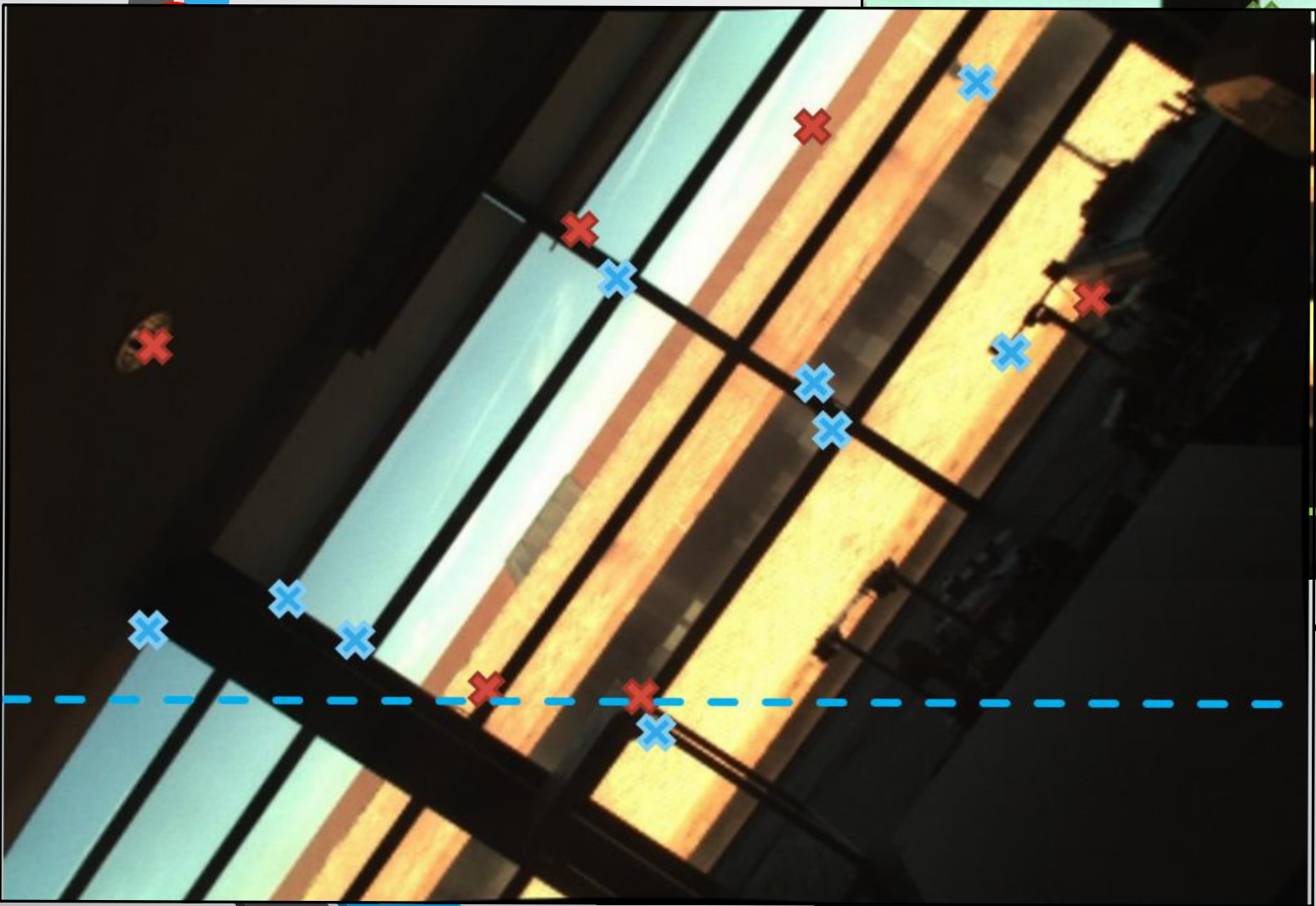
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

Deteção de Features




- 1
- 2
- 3

De



[T]

Deteção de Features


$$[T] = \begin{bmatrix} \cos\theta_T & -\sin\theta_T & d_z \\ \sin\theta_T & \cos\theta_T & d_x \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\Delta\theta_{T_k}$$

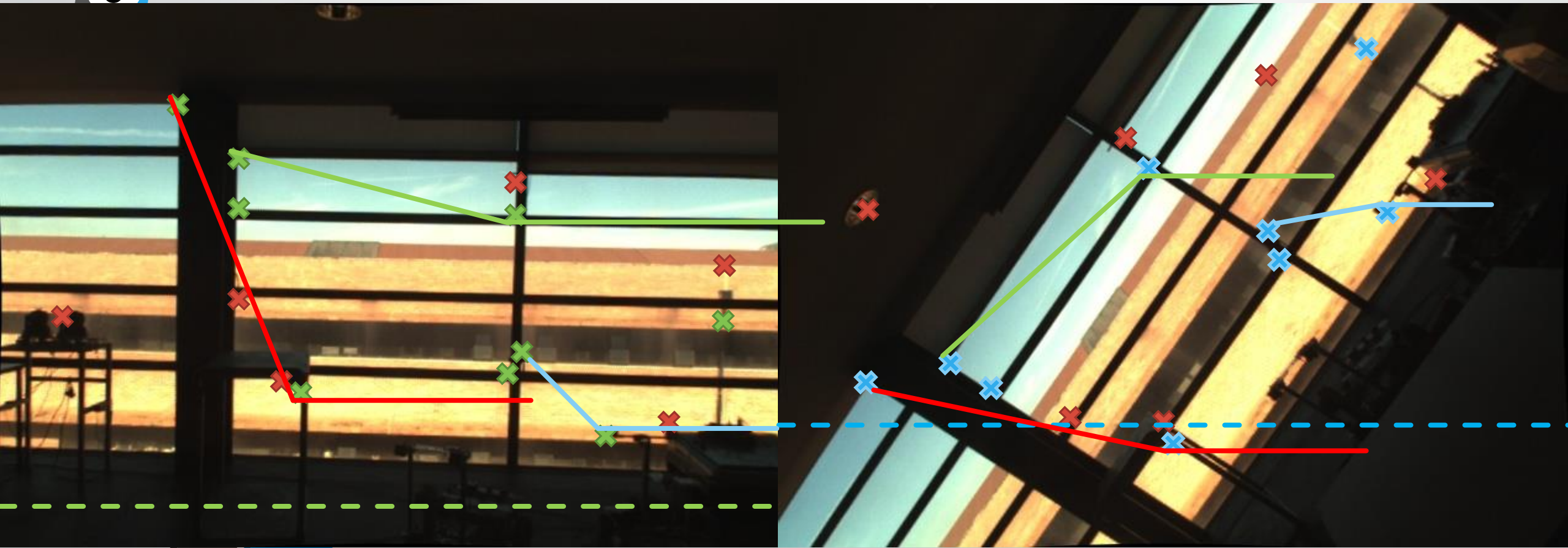
$$\theta_{y_k} = \Delta\theta_{T_k} + \theta_{y_{k-1}}$$

$$\dot{\theta}_{y_k} = \frac{\Delta\theta_{T_k}}{\Delta t_k} + \dot{\theta}_{y_{k-1}}$$

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

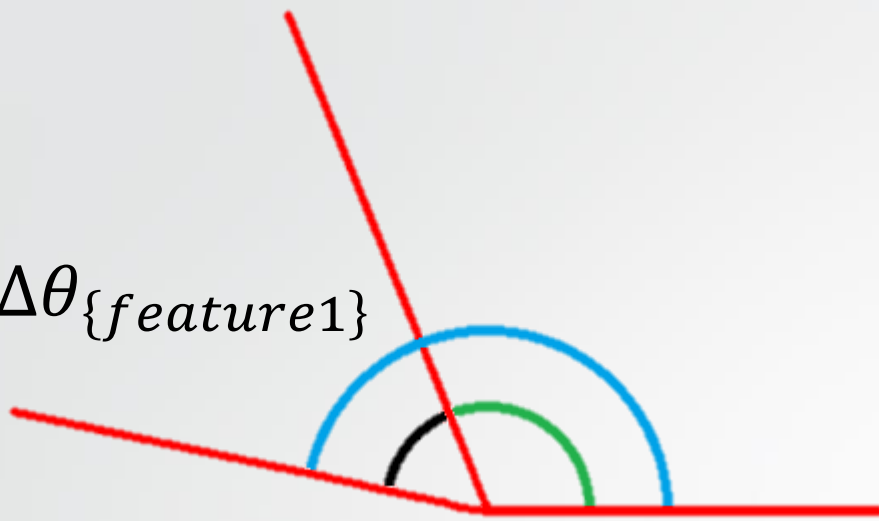
Deteção de Features

angle_tol



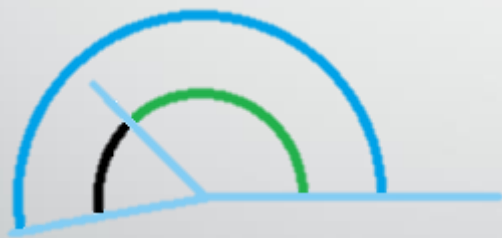
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

$\Delta\theta_{\{feature1\}}$

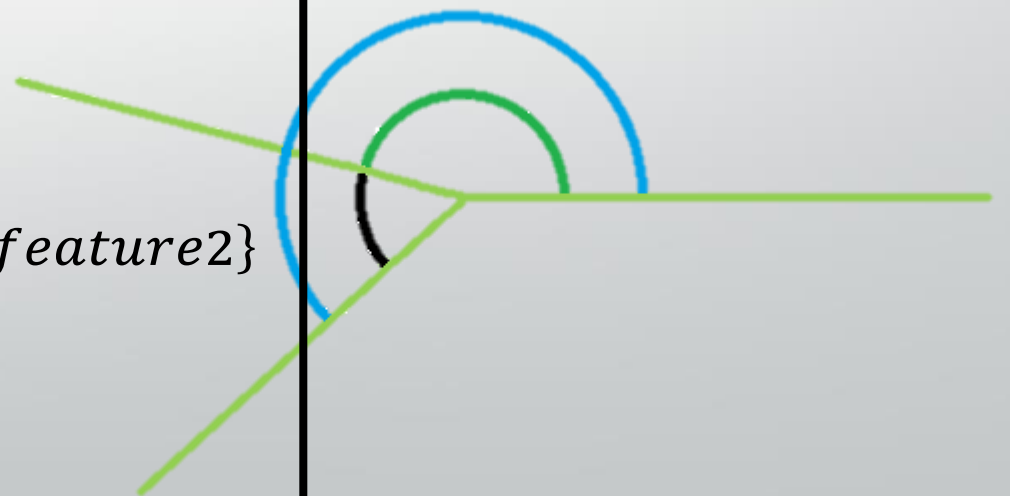


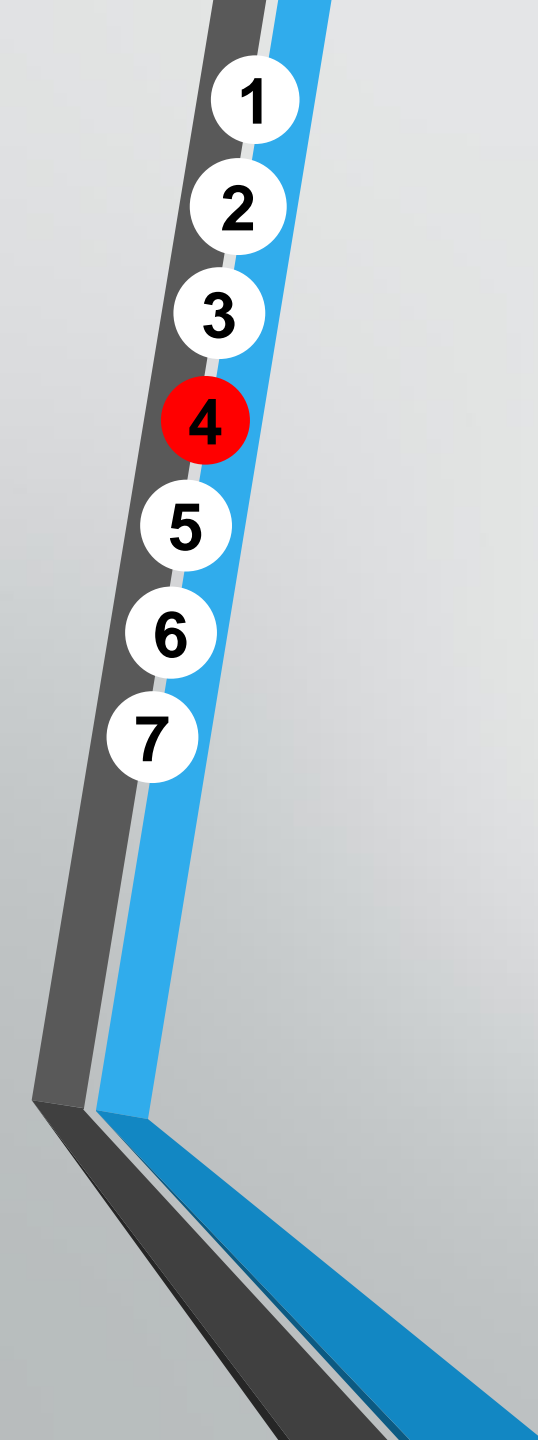
$\leq angle_tol$

$\Delta\theta_{\{feature3\}}$



$\Delta\theta_{\{feature2\}}$





1
2
3
4
5
6
7

Obtenção de Dados
Visuais (Frame)

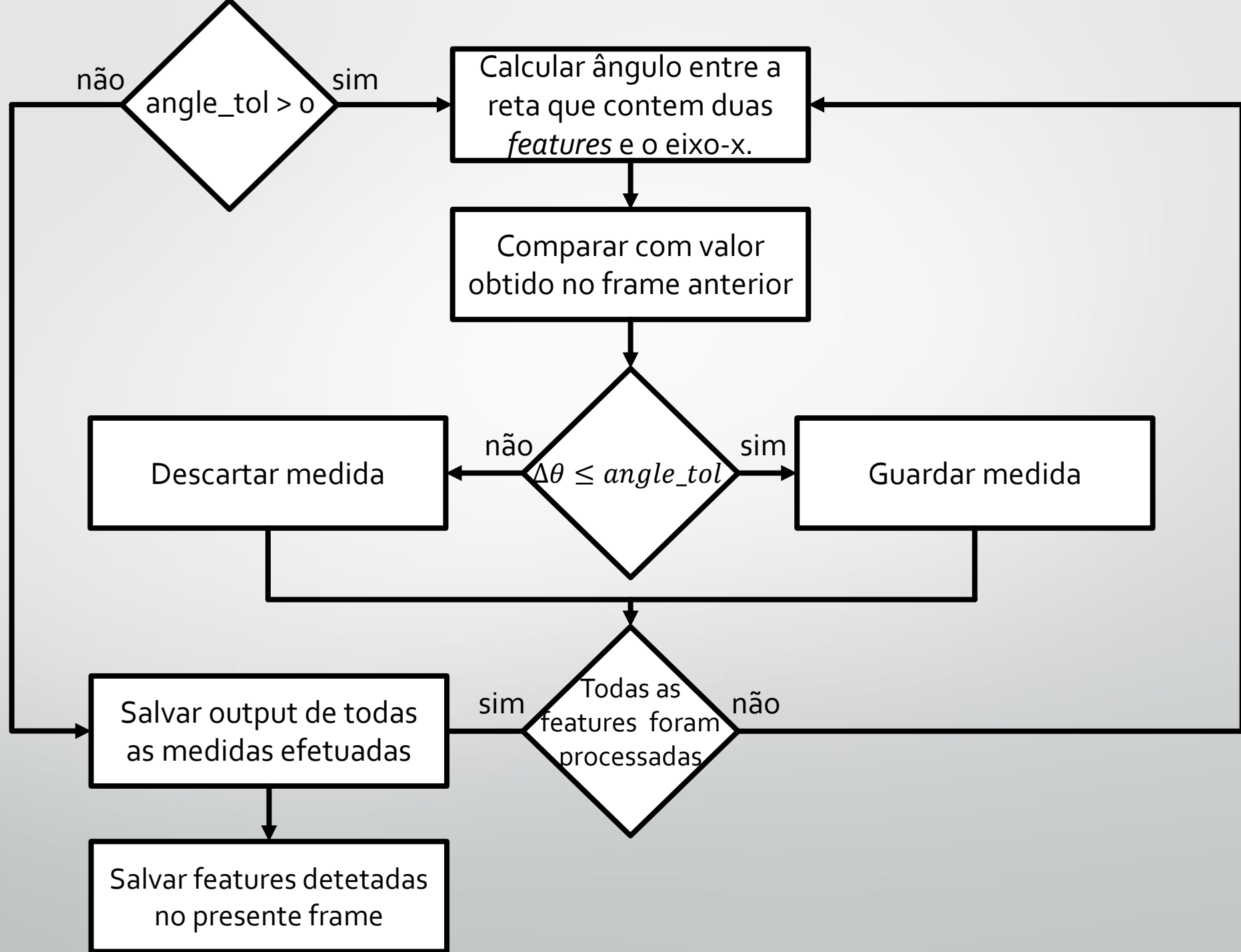
Deteção e Extração de
Features Locais

Matching das features
detetadas e das features
guardadas (anteriores)

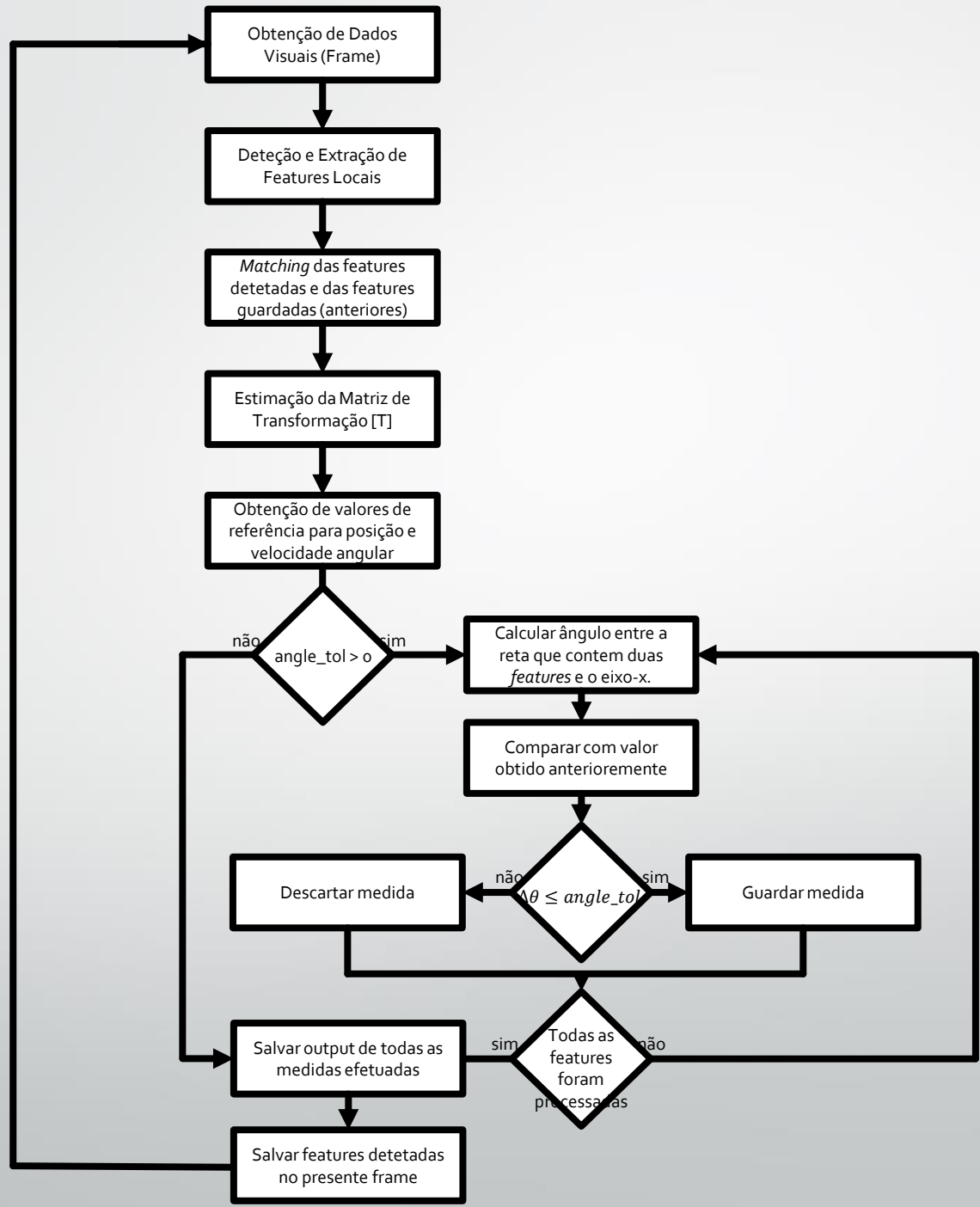
Estimação da Matriz de
Transformação [T]

Obtenção de valores de
referência para posição e
velocidade angular

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7



- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7





1

2

3

4

5

6

7

Deteção de Features

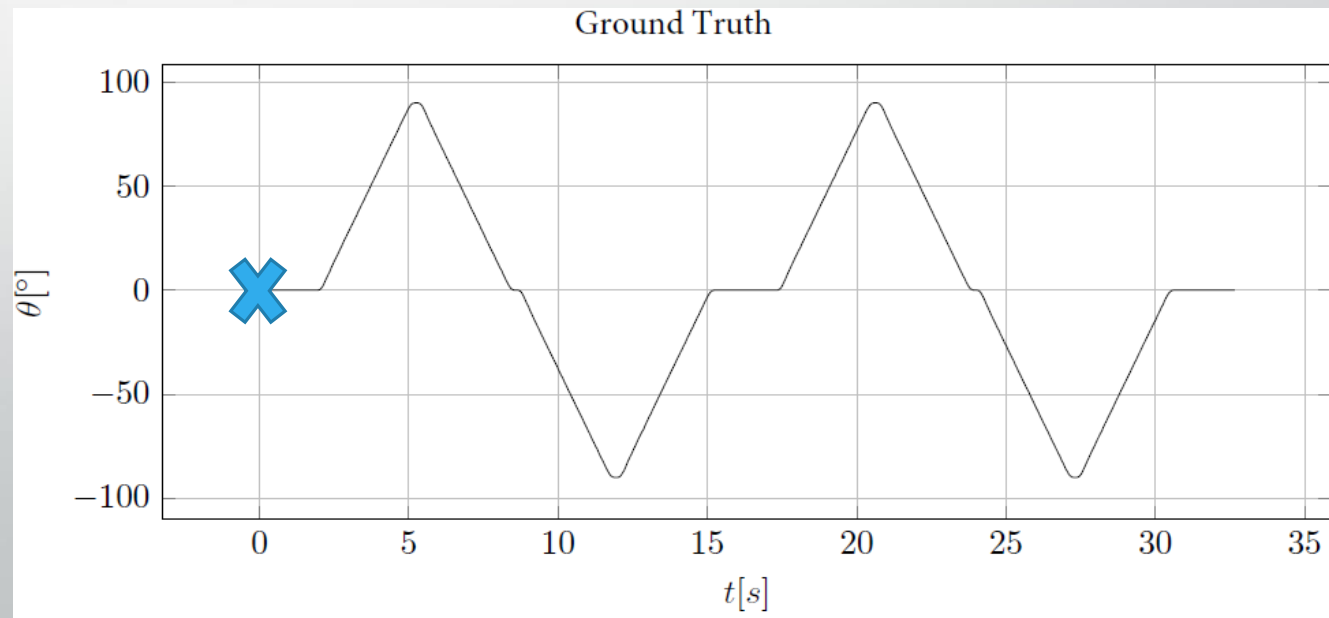
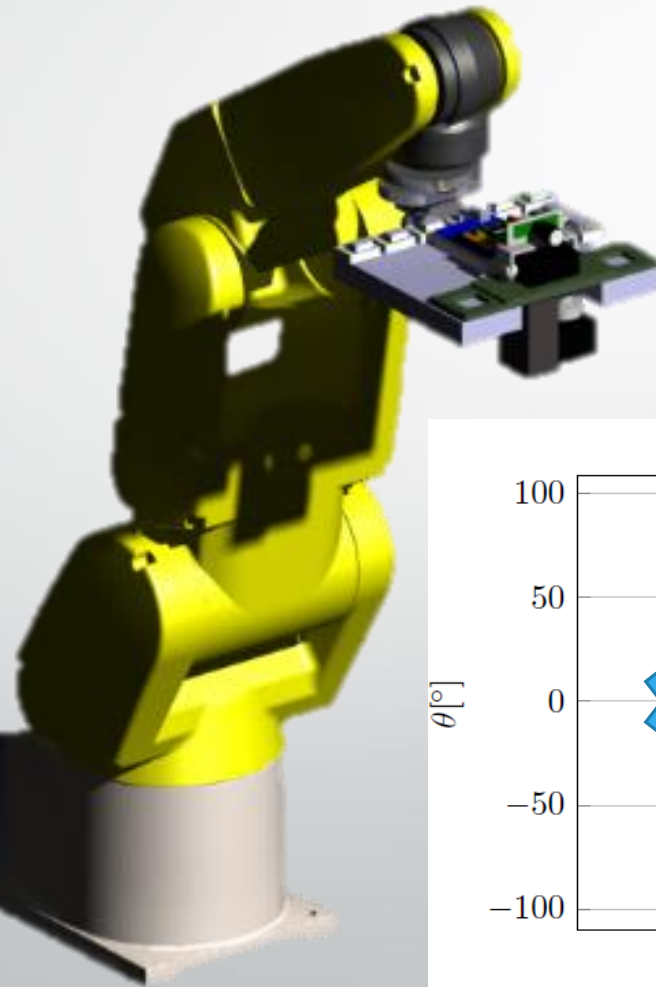
Vantagens

- Método robusto que pode operar em variadas circunstâncias;
- Pode ser usado em diferentes processos.

Desvantagens

- Depende de medidas prévias.

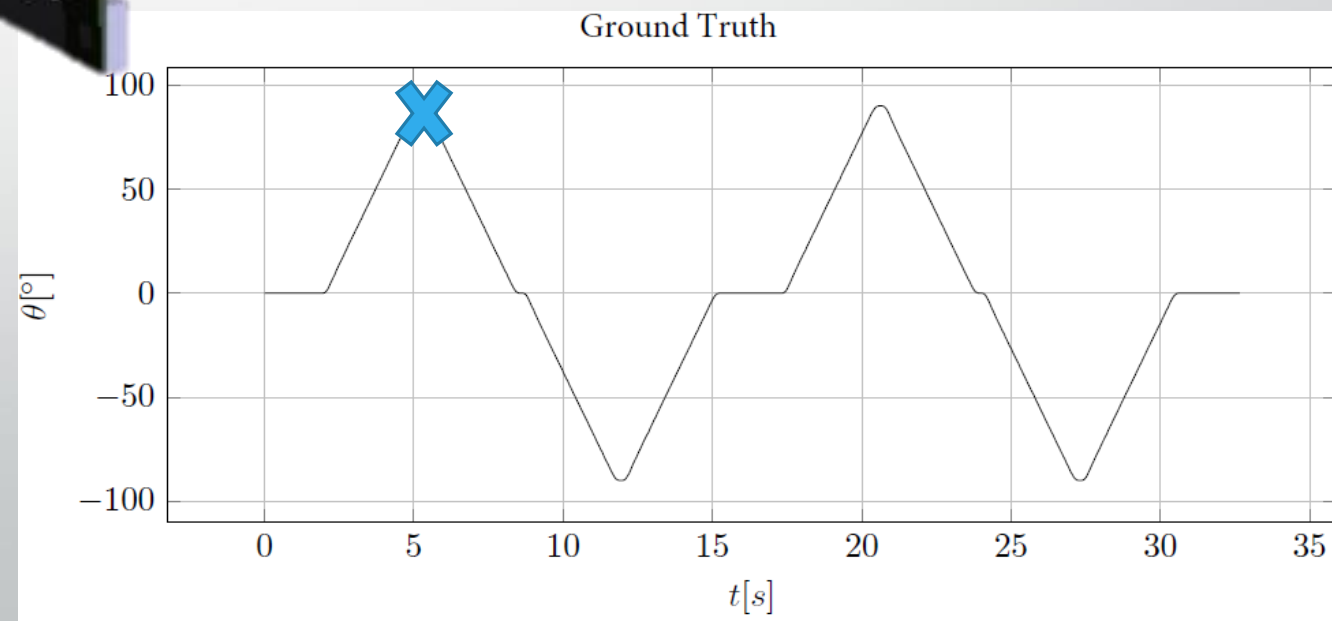
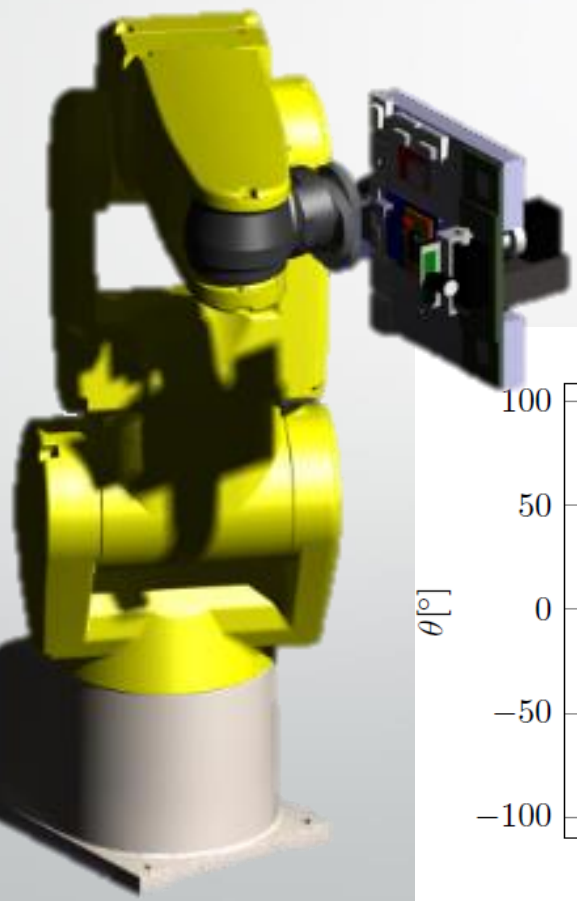
Percurso da Experiência



- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

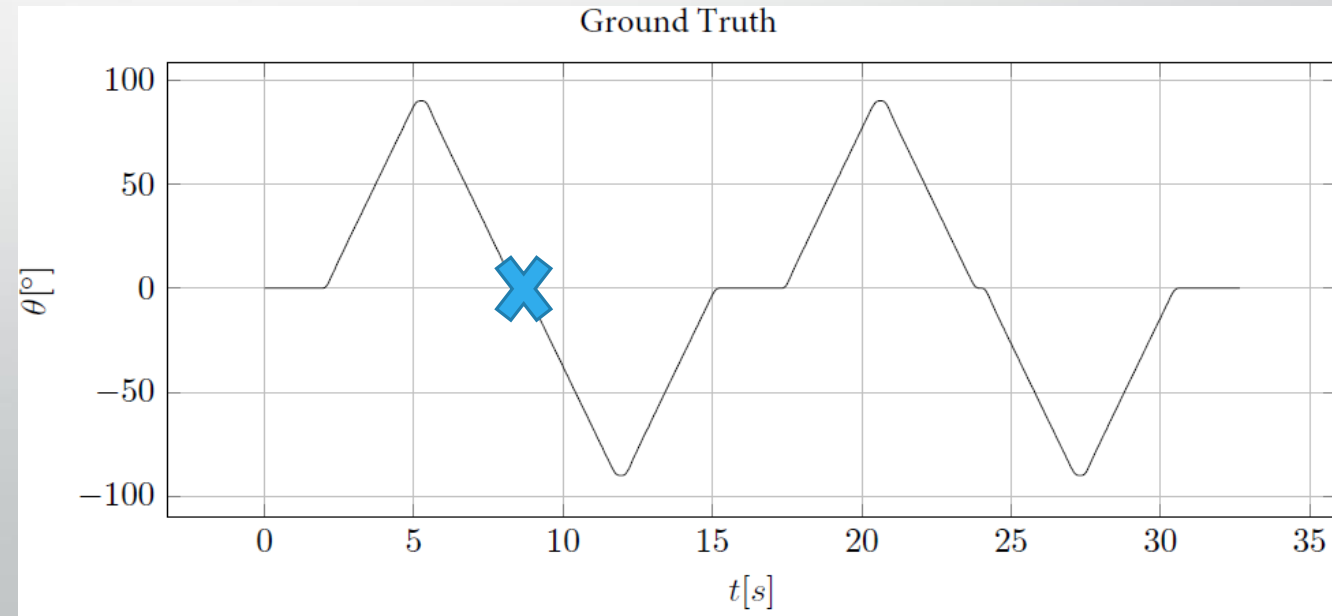
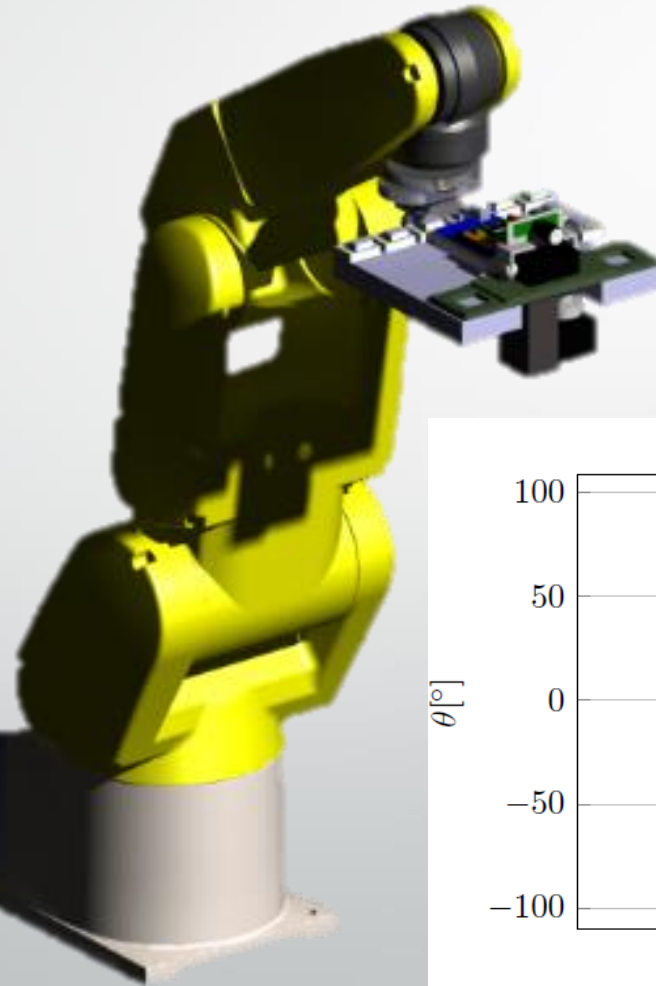
Percurso da Experiência

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7



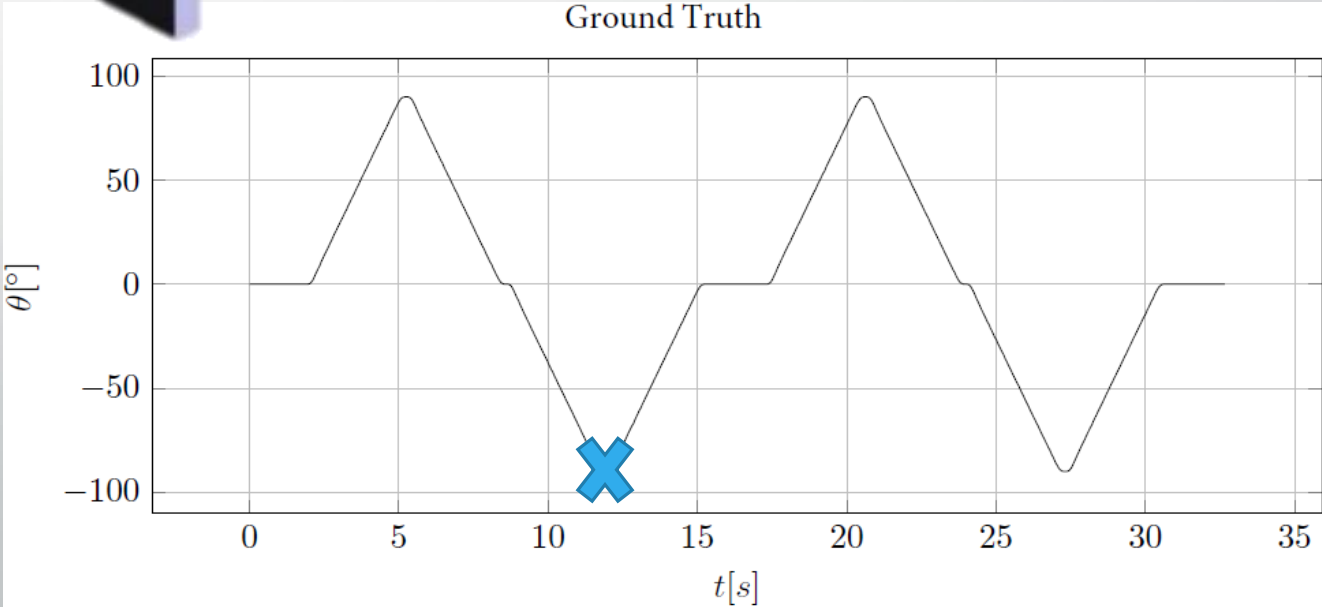
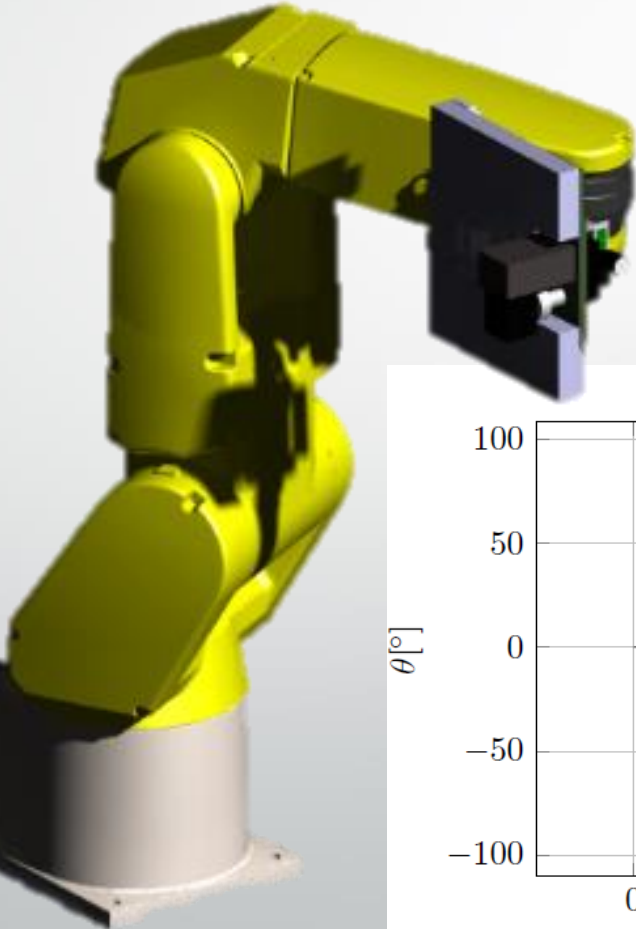
Percurso da Experiência

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7



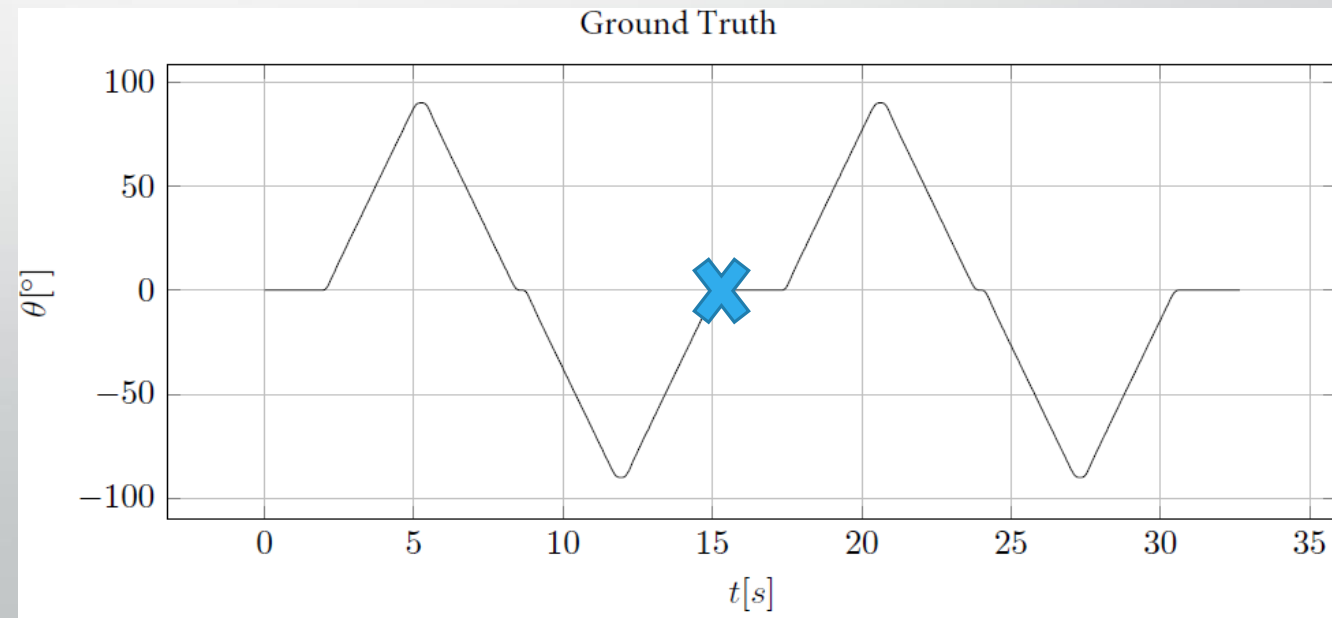
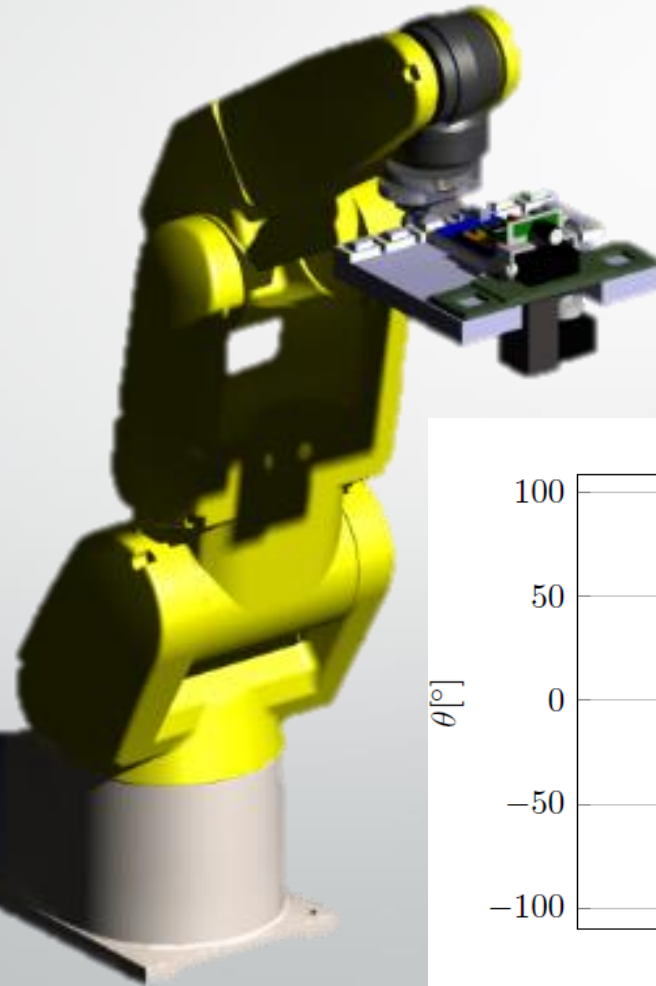
Percurso da Experiência

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7



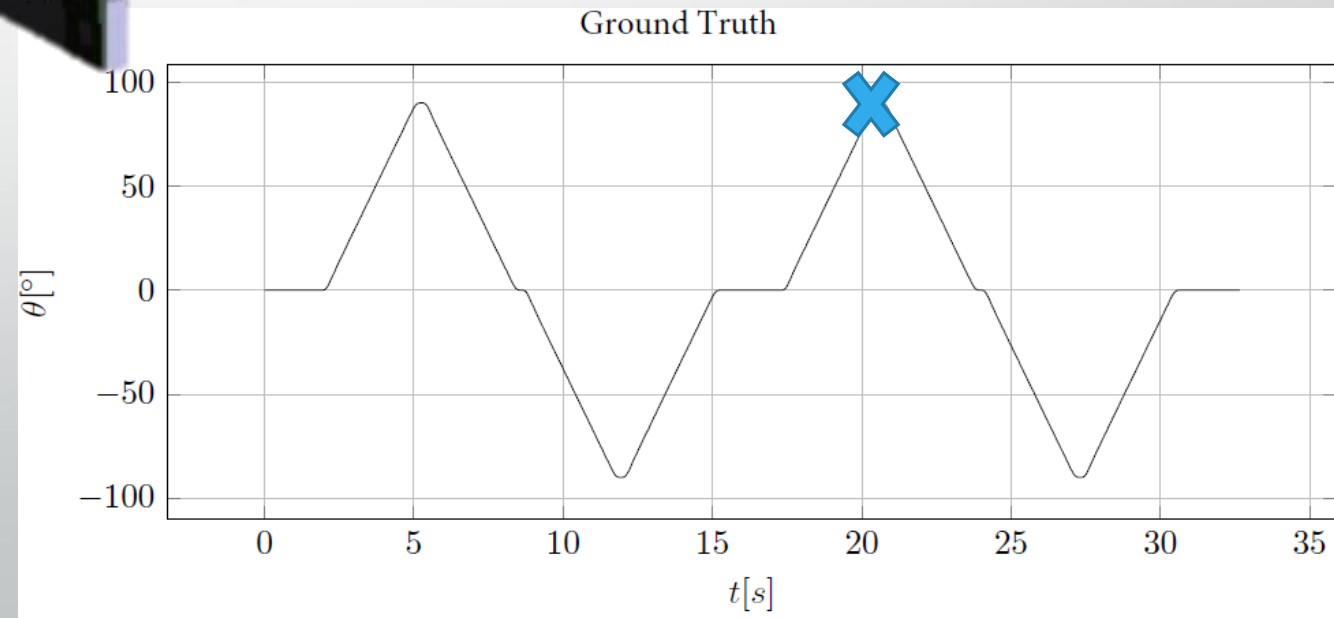
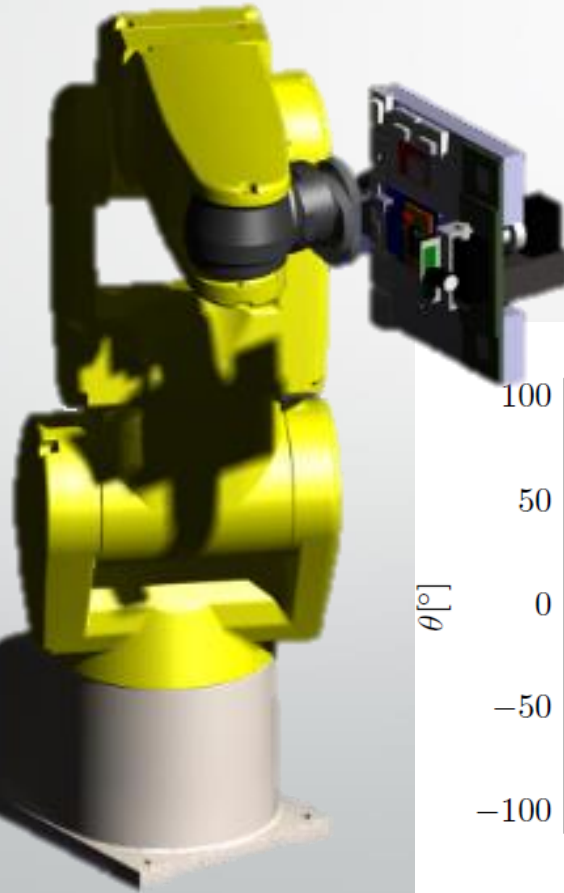
Percurso da Experiência

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

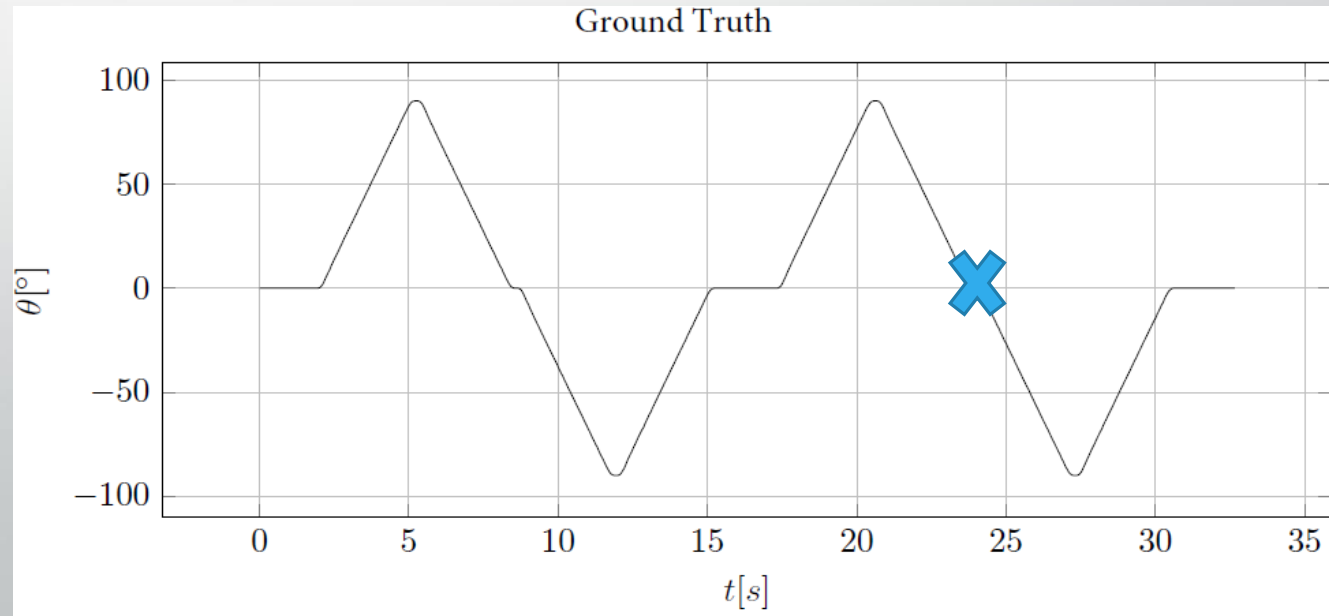
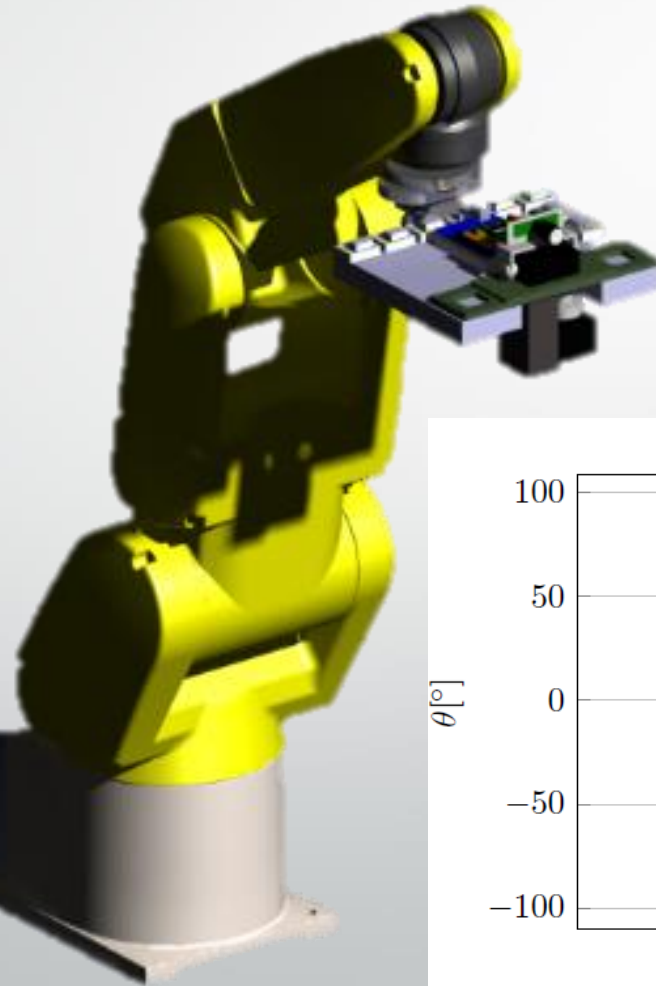


Percurso da Experiência

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7



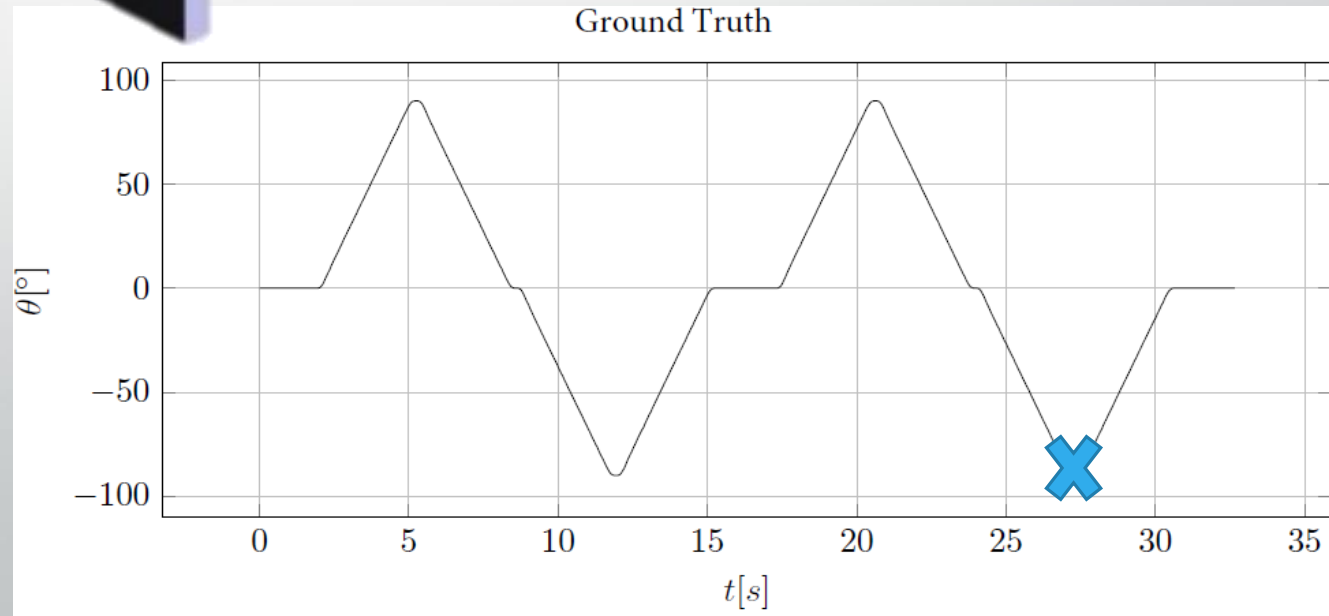
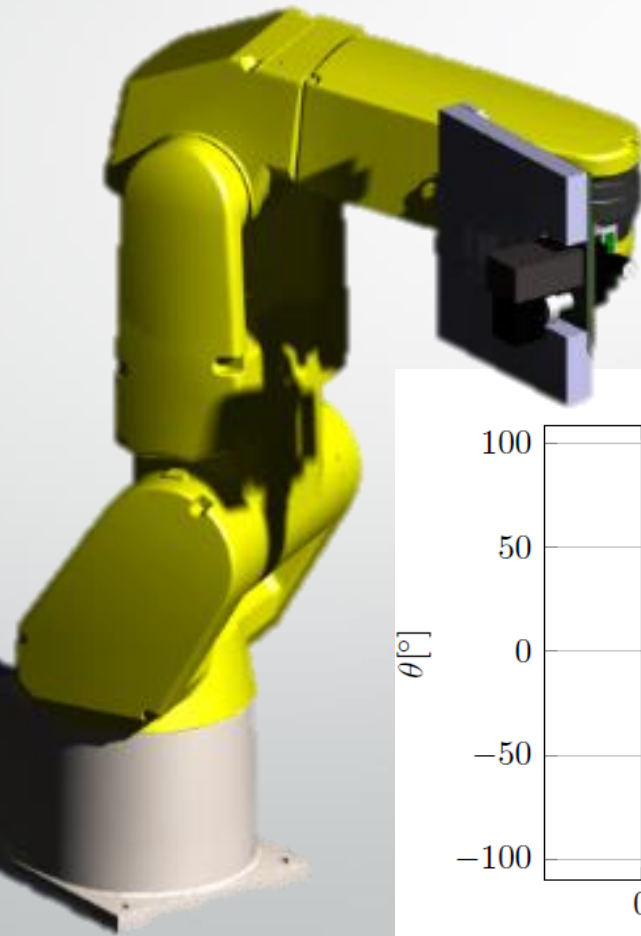
Percurso da Experiência



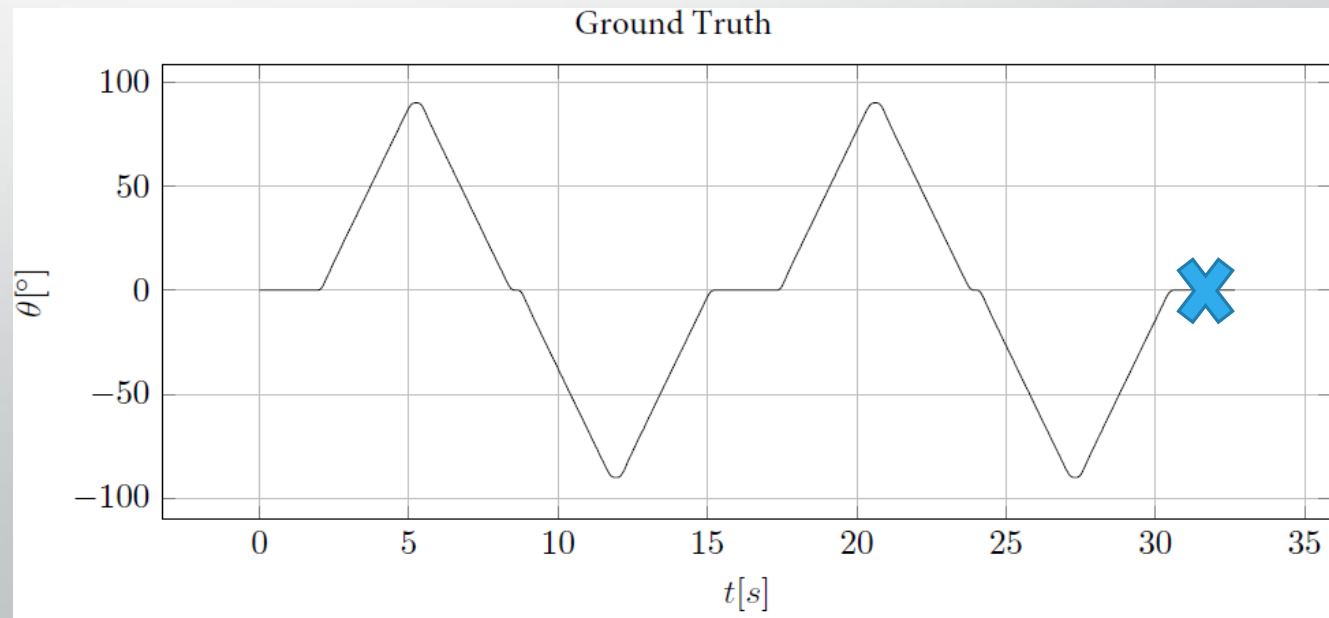
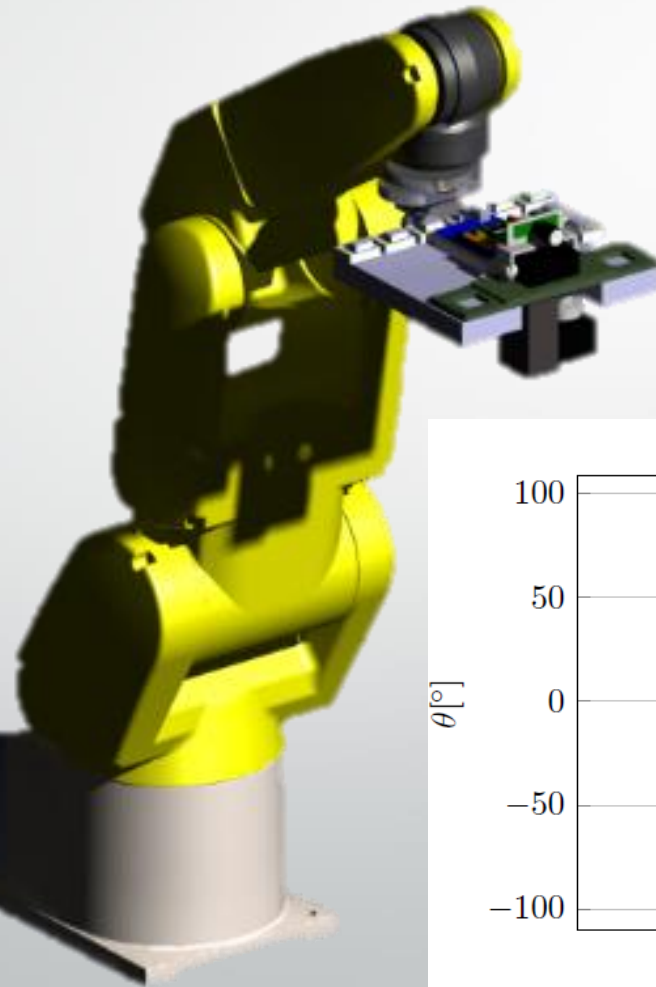
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

Percurso da Experiência

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7



Percurso da Experiência



- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7



1

2

3

4

5

6

7

Integração dos Dados no Filtro de Kalman

$$x_k = A \cdot x_{k-1} + B \cdot u_{k-1} + w_k$$

$$y_k = C \cdot x_k + v_k$$

Equação que define o modelo

Equação que define a relação entre as medidas efetuadas e as variáveis de estado



Integração dos Dados no Filtro de Kalman

$$\begin{aligned} \textcircled{x_k} &= A \cdot x_{k-1} + B \cdot u_{k-1} + w_k \\ y_k &= C \cdot x_k + v_k \end{aligned}$$

Variáveis de Estado

$$x_k = \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \\ \dot{\theta}_x \\ \dot{\theta}_y \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix}$$

1

2

3

4

5

6

7

Integração dos Dados no Filtro de Kalman

Definição do Modelo:

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \dot{\theta}_{k-1} \cdot \Delta t + 0,5 \cdot \ddot{\theta}_{k-1} \cdot \Delta t^2$$

$$\dot{\theta}_k = \dot{\theta}_{k-1} + \ddot{\theta}_{k-1} \cdot \Delta t$$

$$x_k = \textcircled{A} \cdot x_{k-1} + \textcircled{B} \cdot u_{k-1} + w_k$$
$$y_k = C \cdot x_k + v_k$$

$$\ddot{\theta}_{k-1} = u_k = \begin{cases} \mathbf{0} \\ (\dot{\theta}_{k-1} - \dot{\theta}_{k-2}) / \Delta t_k \end{cases}$$



Integração dos Dados no Filtro de Kalman

Definição do Modelo:

$$\begin{aligned}\theta_k &= \theta_{k-1} + \dot{\theta}_{k-1} \cdot \Delta t + 0,5 \cdot \ddot{\theta}_{k-1} \cdot \Delta t^2 \\ \dot{\theta}_k &= \dot{\theta}_{k-1} + \ddot{\theta}_{k-1} \cdot \Delta t\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x_k &= \mathbf{A} \cdot x_{k-1} + \mathbf{B} \cdot u_{k-1} + w_k \\ y_k &= \mathbf{C} \cdot x_k + v_k\end{aligned}$$

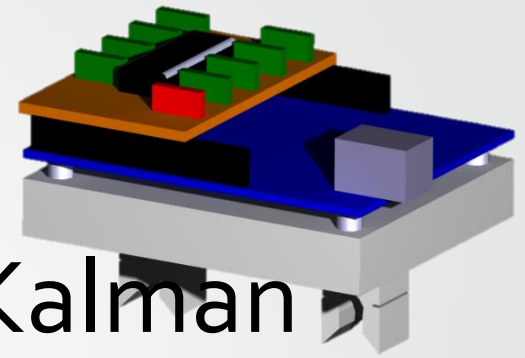
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0,5\Delta t^2 \\ 0,5\Delta t^2 \\ 0,5\Delta t^2 \end{bmatrix}$$



Integração dos Dados no Filtro de Kalman

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{w}_k \\ y_k &= \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}_k + v_k \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \theta_{x_i} \\ \theta_{y_i} \\ \theta_{z_i} \\ \dot{\theta}_{x_i} \\ \dot{\theta}_{y_i} \\ \dot{\theta}_{z_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_{x_{i-1}} \\ \theta_{y_{i-1}} \\ \theta_{z_{i-1}} \\ \dot{\theta}_{x_{i-1}} \\ \dot{\theta}_{y_{i-1}} \\ \dot{\theta}_{z_{i-1}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,5\Delta t^2 \\ 0,5\Delta t^2 \\ 0,5\Delta t^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{x_{i-1}} \\ \ddot{\theta}_{y_{i-1}} \\ \ddot{\theta}_{z_{i-1}} \end{bmatrix}$$

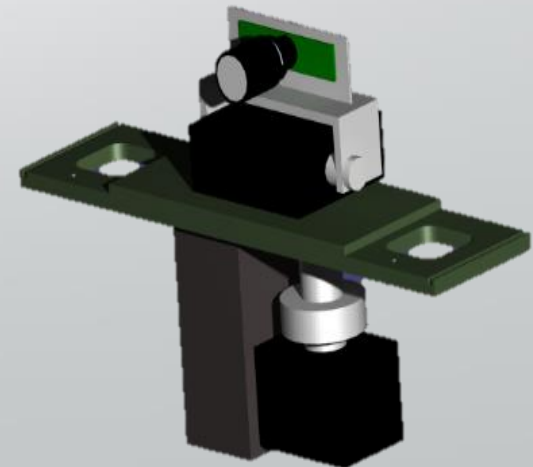
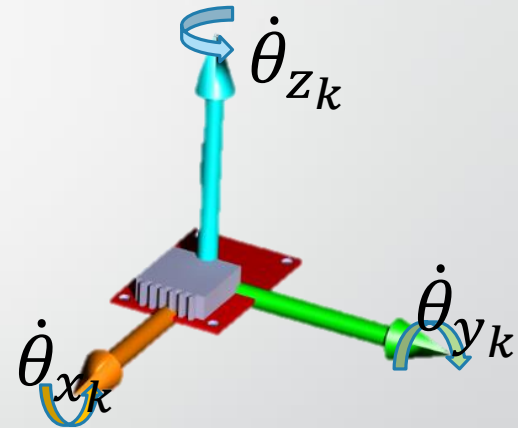


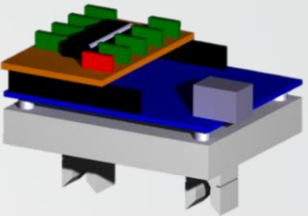
Integração dos Dados no Filtro de Kalman

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5**
- 6
- 7

$$x_k = A \cdot x_{k-1} + B \cdot u_{k-1} + w_k$$
$$\textcircled{y_k} = C \cdot x_k + v_k$$

$$y_k = \begin{bmatrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{bmatrix}$$



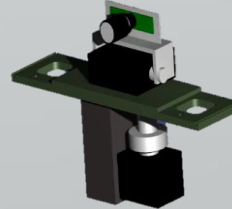
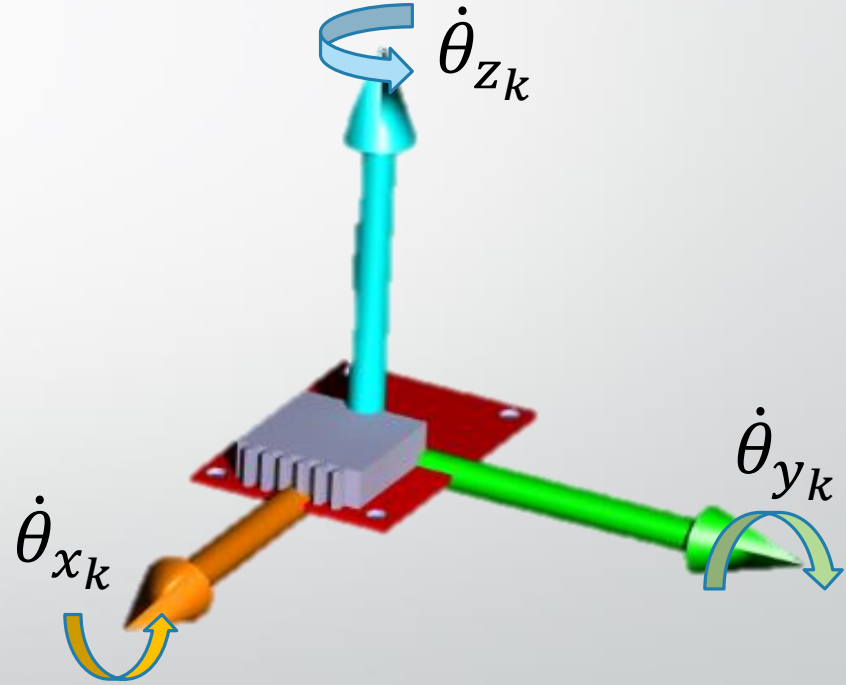


Integração dos Dados no Filtro de Kalman

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

$$x_k = A \cdot x_{k-1} + B \cdot u_{k-1} + w_k$$
$$\mathbf{y}_k = C \cdot x_k + v_k$$

$$y_k = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_x \\ \dot{\theta}_y \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix}$$

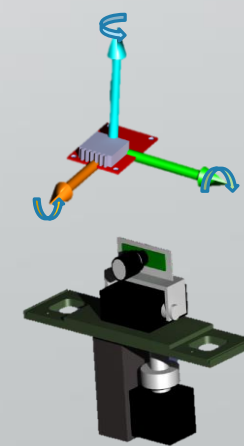
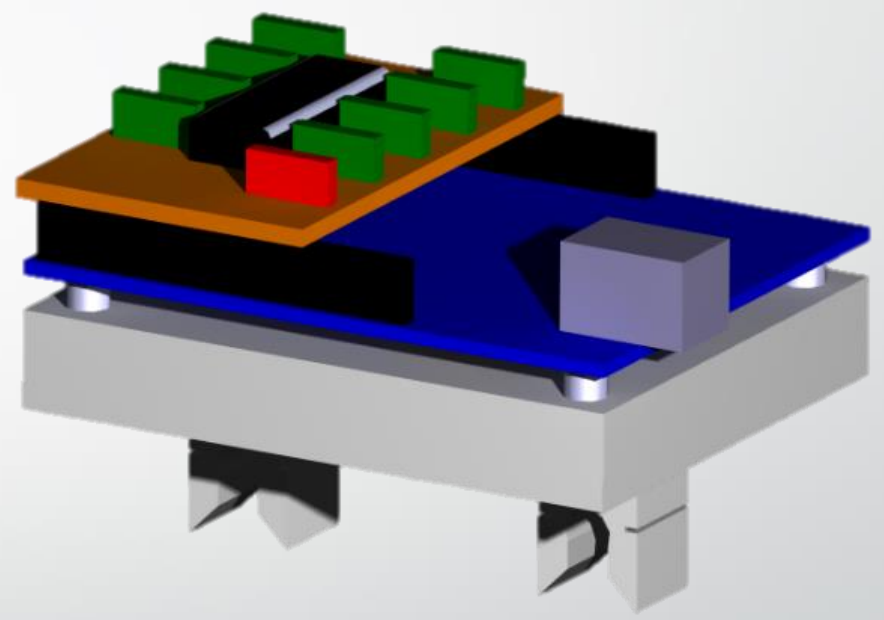


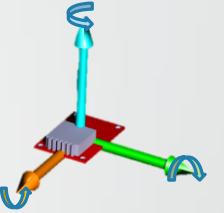
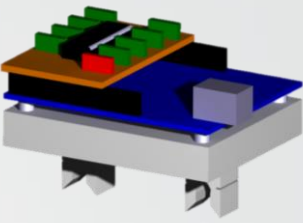
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

Integração dos Dados no Filtro de Kalman

$$x_k = A \cdot x_{k-1} + B \cdot u_{k-1} + w_k$$
$$\mathbf{y}_k = C \cdot x_k + v_k$$

$$y_k = \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \\ \dot{\theta}_x \\ \dot{\theta}_y \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix}$$





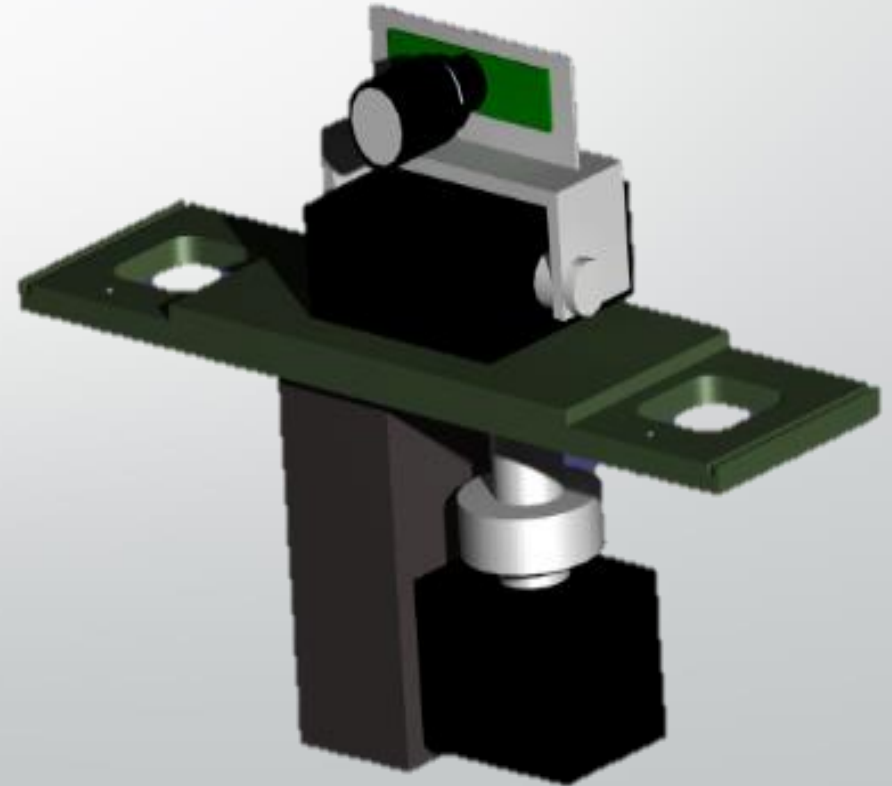
Integração dos Dados no Filtro de Kalman

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

$$x_k = A \cdot x_{k-1} + B \cdot u_{k-1} + w_k$$

$$\mathbf{y}_k = C \cdot x_k + v_k$$

$$y_k = \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \\ \dot{\theta}_x \\ \dot{\theta}_y \\ \dot{\theta}_z \\ \theta_{C_y} \\ \dot{\theta}_{C_y} \\ \dots \end{bmatrix}$$



Integração dos Dados no Filtro de Kalman

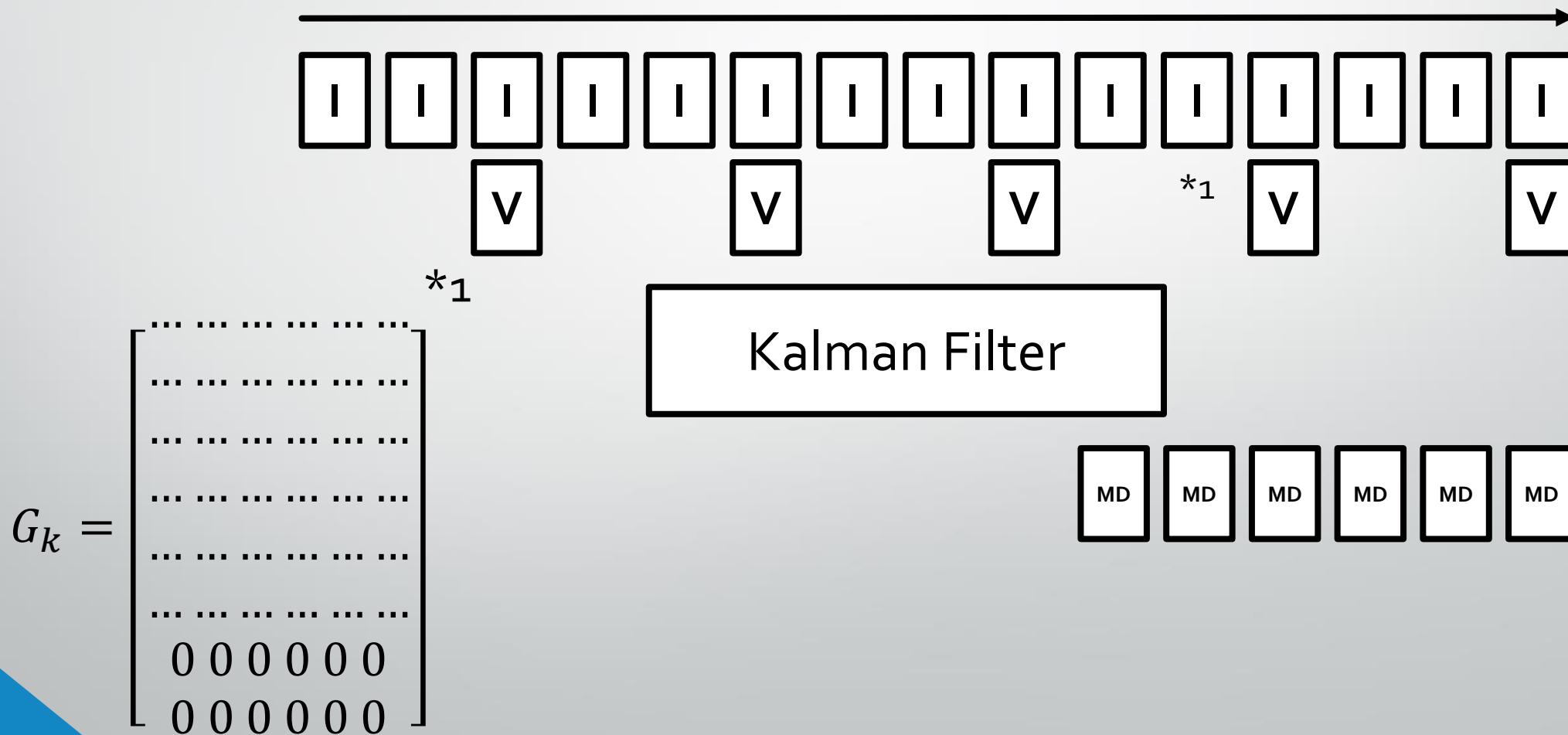
$$x_k = A \cdot x_{k-1} + B \cdot u_{k-1} + w_k$$

$$y_k = \mathbf{C} \cdot x_k + v_k$$

$$y_k = \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \\ \dot{\theta}_x \\ \dot{\theta}_y \\ \dot{\theta}_z \\ \theta_{C_y} \\ \dot{\theta}_{C_y} \\ \dots \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad x_k = \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \\ \dot{\theta}_x \\ \dot{\theta}_y \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix}$$

Integração dos Dados no Filtro de Kalman

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7



1

2

3

4

Resultados



- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

Resultados

Experiência 1 (sem erro)

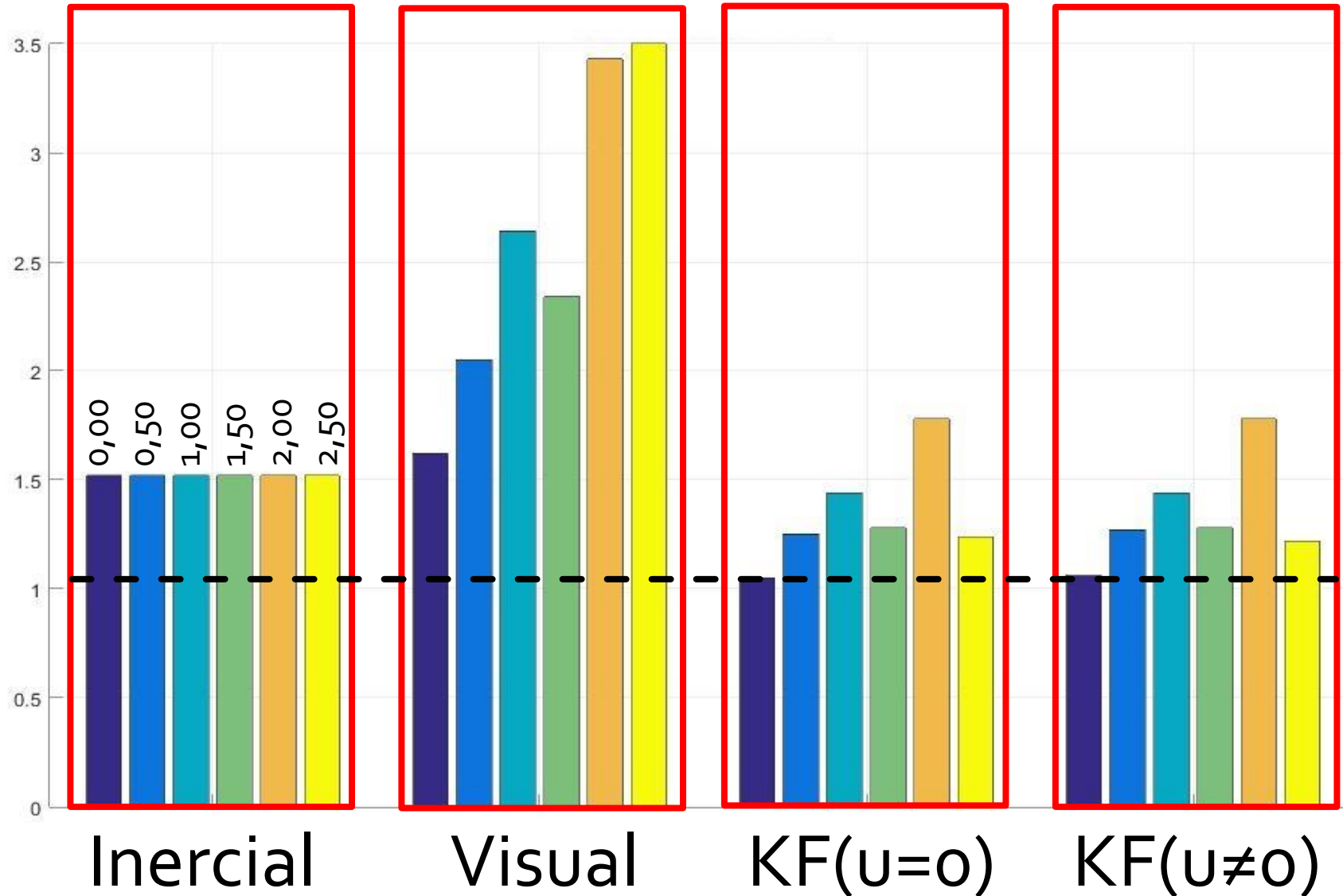
	angle_tol	0,00	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50
	Visual Measures Taken	2	5	14	22	30	35
	Inertial Data			1,52			
	Visual Data	1,62	2,05	2,64	2,34	3,43	3,50
Kalman Filter	Inertial Data			1,41			
Acceleration	Visual Data	1,40	1,90	2,14	1,58	2,71	1,17
Not Calculated	Both Data	1,05	1,25	1,44	1,28	1,78	1,24
Kalman Filter	Inertial Data			1,41			
Acceleration	Visual Data	3,46	2,74	2,46	1,76	2,72	1,18
Calculated	Both Data	1,06	1,27	1,44	1,28	1,78	1,22

$$Erro\ Médio = \sum \left| \theta_{y_{groundtruth}} - \theta_{y_{medido}} \right| / n_{medicoes} [^\circ]$$

Resultados

Experiência 1 (sem erro)

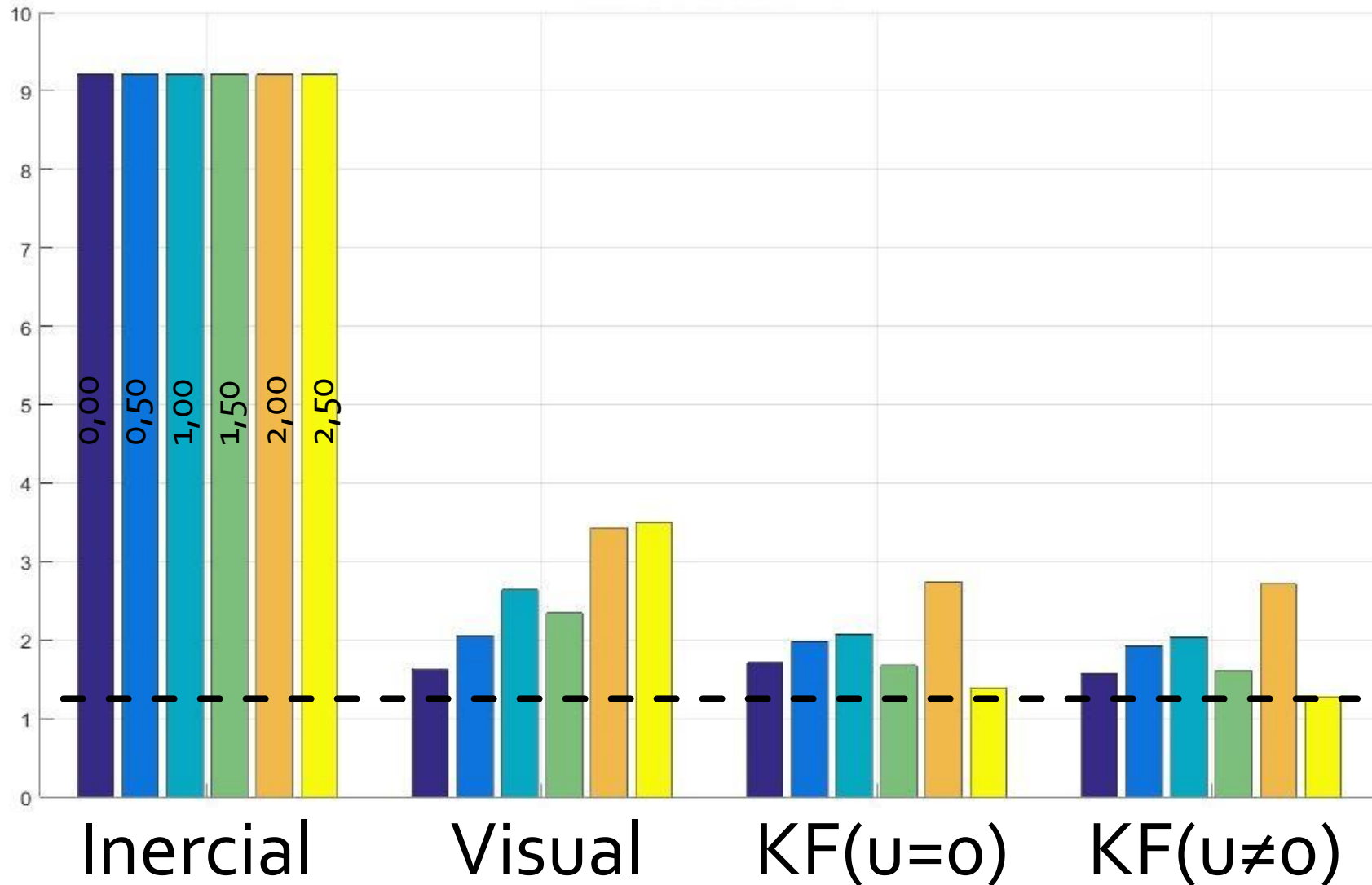
Erro Médio [°]



Resultados

Experiência 1 (com erro)

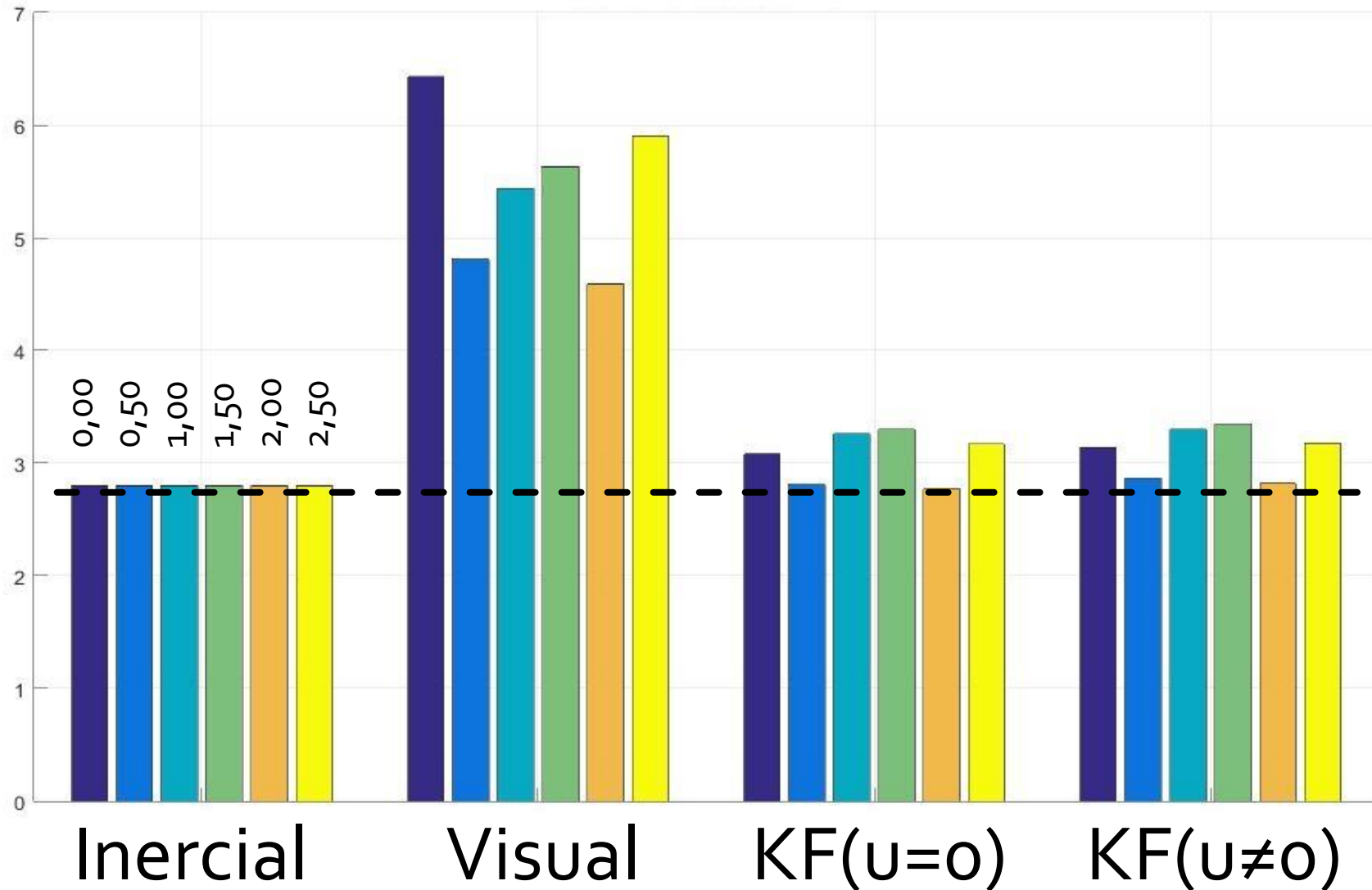
Erro Médio [°]



Resultados

Experiência 2 (sem erro)

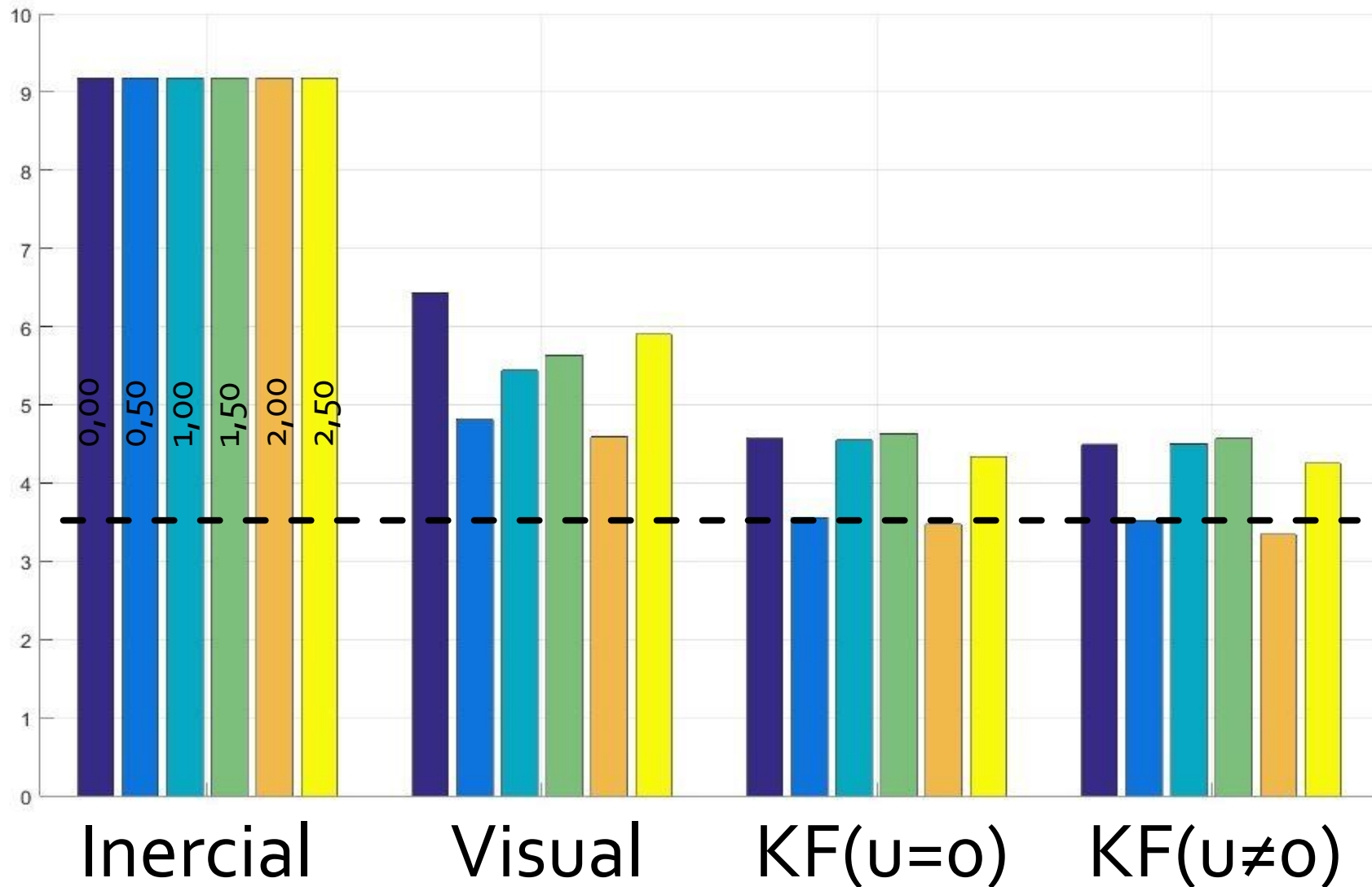
Erro Médio [°]



Resultados

Experiência 2 (com erro)

Erro Médio [°]



1

2

3

4

5

6

7

Conclusões

- FANUC 200iD fornece uma "*ground truth*" de alta confiança;
- Fundir dados inerciais e visuais vai resultar em dados com mais confiança do que usando os sensores individualmente;
- O filtro de Kalman tem a capacidade de eliminar ruído;
- As abordagens e métodos utilizados, são extensíveis a outros casos.

1

2

3

4

5

6

7

Trabalho Futuro

- Desenvolver um modelo do filtro para situações em tempo real;
- Aplicar método a diferentes conjuntos de informação;
- Desenvolver estado de variáveis que descrevam o humanoide;
- Completar programa *fanuc_control*.

1

2

3

4

5

Peixoto, J., Santos, V., & Silva, F. (2016)
Proprioceptive Visual Tracking of a Humanoid
Robot Head Motion
Proprioceptive visual tracking of a humanoid
robot head motion. *Lecture Notes in Computer
Science, 9730 LNCS*.¹

João Peixoto¹(✉), Vitor Santos^{1,2}, and Filipe Silva^{1,2}

¹ Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal
{joao.peixoto,vitor,fmsilva}@ua.pt

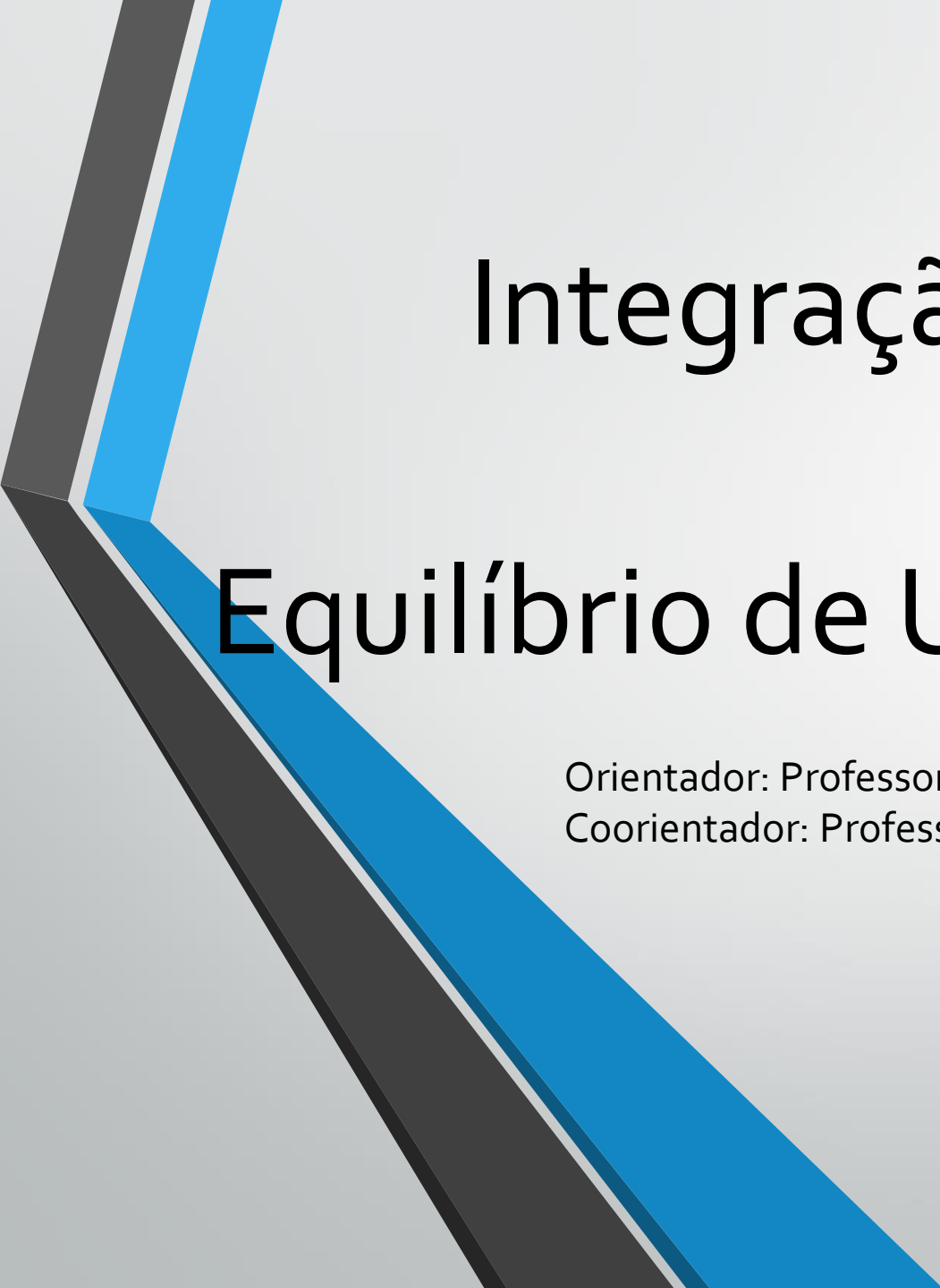
² Institute for Electronics Engineering and Informatics of Aveiro - IEETA,
Aveiro, Portugal

Abstract. This paper addresses the problem of measuring a humanoid robot head motion by fusing inertial and visual data. In this work, a model of a humanoid robot head, including a camera and inertial sensors, is moved on the tip of an industrial robot which is used as ground truth for angular position and velocity. Visual features are extracted from the camera images and used to calculate angular displacement and velocity of the camera, which is fused with angular velocities from a gyroscope and fed into a Kalman Filter. The results are quite interesting for two different scenarios and with very distinct illumination conditions. Additionally, errors are introduced artificially into the data to emulate situations of noisy sensors, and the system still performs very well.

Azeite-Campilho
Fakher Kamay (Eds.)

LNCS 9730
Image Analysis
and Recognition

19th International Conference, ICAR 2016
in Memory of Mohamed Kamal
El-Mechaieque, Portugal, July 13–15, 2016, Proceedings



Integração de Dados Visuais e Inerciais Para o Equilíbrio de Um Robô Humanóide

João Carlos Pimentel Fidalgo Peixoto

Orientador: Professor Vítor Santos
Coorientador: Professor Filipe Silva

60140

Universidade de Aveiro,
Departamento de Engenharia Mecânica
joao.peixoto@ua.pt