

Controle de um Manipulador Robótico 4-DOF com Software baseado em ROS e Qt

Luís Gustavo Oliveira Silva

Orientador: Fernando Cesar Lizarralde

Universidade Federal do Rio de Janeiro

16 de fevereiro de 2017

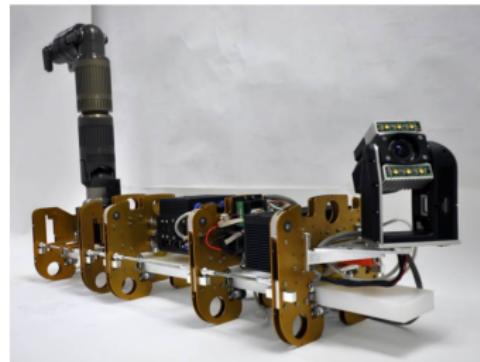
Introdução

Robótica em instalações offshore de óleo e gás.

- Substituir o uso de diversos sensores.
- Tarefas repetitivas.
- Tarefas onde a presença humana é difícil, ou arriscada.
- Tarefas que requerem interação complexa e precisa com o ambiente.



(a) MIMROex



(b) ARTIS

Motivação

- DORIS:
- Robô guiado por trilhos para monitorar e inspecionar área *topside* de instalações de óleo e gás.



Figura: DORIS em operação no CENPES

DORIS

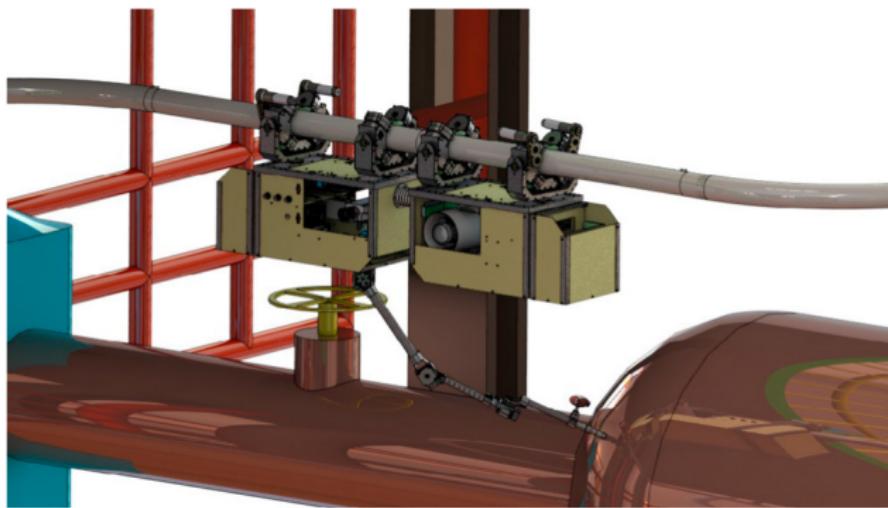


Figura: DORIS em operação no CENPES

- Monitorar perfis de temperatura.
- Supervisão de pessoal não autorizado.
- Inspeção de padrões de vibração.
- Interação com interfaces touchscreen na plataforma.

Manipulador TETIS

- Mover a câmera acoplada ao efetuador.
- Posicionar o sensor de vibração corretamente sobre superfície de um equipamento na plataforma.
- Interagir com touchscreens.

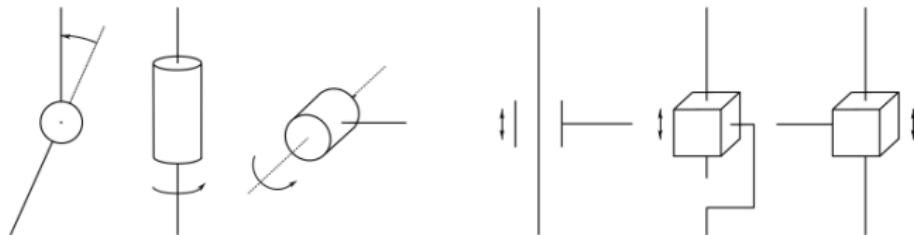


Objetivos

- Elaborar modelo cinemático e estratégias de controle.
- Controle por servo-visão na configuração *eye-in-hand* onde o objetivo é rastrear um objeto de interesse: máquina a ser inspecionada.
- Controle de força utilizando o sensor no efetuador.
- Desenvolver a partir do RobotGUI o software que implementa o controle do TETIS.

Cinemática Direta

- Manipulador: composto de Elos e Juntas
- Juntas podem ser prismáticas ou de revolução

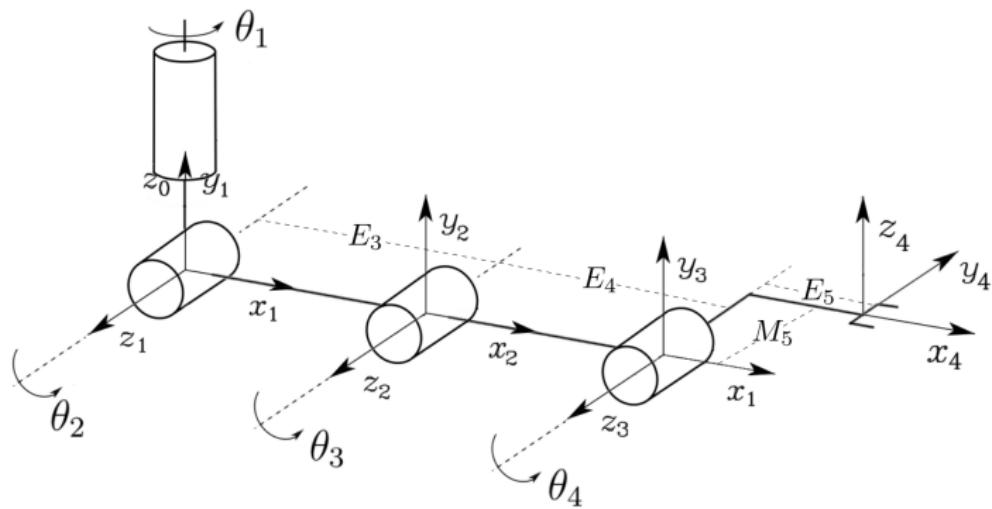


- Cadeia cinemática: Uma sequência de juntas conectadas por corpos rígidos (elos).

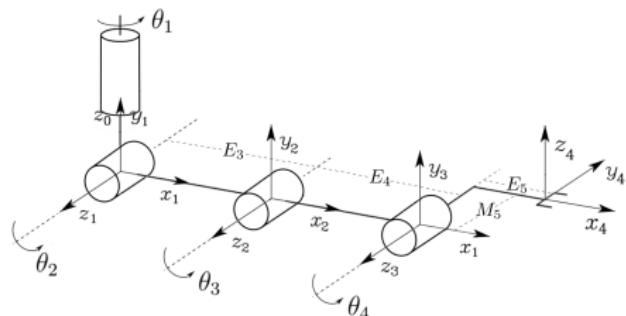
Cinemática Direta

$$T_{0n}(q) = T_{01}(q_1) T_{12}(q_2) \dots T_{n-1,n}(q_n) \quad (1)$$

Convenção Denavit-Hartenberg



Cinemática Direta - TETIS



Elo	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$\pi/2$	0	θ_1
2	E_3	0	0	θ_2
3	E_4	0	0	θ_3
4	E_5	$-\pi/2$	$-M_5$	θ_4

Tabela: Parâmetros Denavit-Hartenberg: Manipulador TETIS

Cinemática Direta

Para dois sistemas de coordenadas consecutivos:

$$R_{i-1,i} = R_z(\theta_i)R_x(\alpha_i) \quad (2)$$

$$\vec{p}_{i-1,i} = d_i \vec{z}_{i-1} + a_i \vec{x}_i \quad (3)$$

$$(\vec{p}_{i-1,i})_{i-1} = d_i (\vec{z}_{i-1})_{i-1} + a_i (\vec{x}_i)_{i-1} \quad (4)$$

$$(\vec{p}_{i-1,i})_{i-1} = d_i (\vec{z}_{i-1})_{i-1} + a_i R_{i-1,i} (\vec{x}_i)_i \quad (5)$$

$$T_{i-1,i} = \begin{bmatrix} R_{i-1,i} & (\vec{p}_{i-1,i})_{i-1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$T_{0n}(q) = T_{01}(q_1) T_{12}(q_2) \dots T_{n-1,n}(q_n) \quad (7)$$

Espaços de Controle

Definição dos espaços onde o controle será aplicado.

Espaço operacional

$$x_e = \begin{bmatrix} p_e \\ \phi_e \end{bmatrix} \quad (8)$$

onde $p_e \in \mathbb{R}^3$ é a posição cartesiana e ϕ_e é uma representação mínima da orientação.

Espaço das juntas

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

onde se junta é de revolução $q_i = \theta_i$, se é prismática $q_i = d_i$.

Espaços de Controle - TETIS

Espaço operacional

$$x_e = \begin{bmatrix} p_e \\ \phi_e \end{bmatrix} \quad (10)$$

onde $p_e \in \mathbb{R}^3$ é a posição cartesiana e ϕ_e dado por

$$\phi_e = -(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad (11)$$

Espaço das juntas

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

onde todas as juntas são de revolução $q_i = \theta_i$.

Jacobiano analítico de posição

$$\dot{p}_e = \frac{\partial p_e}{\partial q} q = J_{ap}(q)q \quad (13)$$

Jacobiano analítico de orientação

$$\dot{\phi}_e = \frac{\partial \phi_e}{\partial q} \dot{q} = J_{a\phi}(q)\dot{q} \quad (14)$$

Jacobiano analítico

$$\dot{x}_e = \begin{bmatrix} \dot{p}_e \\ \dot{\phi}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{ap}(q) \\ J_{a\phi}(q) \end{bmatrix} \dot{q} = J_a(q)\dot{q} \quad (15)$$

Assume-se que:

- Elevados fatores de redução nas juntas.
- Baixas velocidades na realização das tarefas.
- Existência uma malha de controle de velocidade de alto desempenho em cada junta.

As juntas devem ser capazes de reproduzir bem comandos de velocidade:

$$u \approx \dot{q}$$

Controle Cinemático

O problema de controle consiste em rastrear uma trajetória $x_d(t)$, de modo que x_e atinja $x_d(t)$ em $t \rightarrow \infty$.

$$\dot{e} = \dot{x}_d - \dot{x}_e \quad (16)$$

$$\dot{e} = \dot{x}_d - J_a(q)\dot{q} \quad (17)$$

Assumindo que $J_a(q)$ é quadrada e não singular, a escolha da lei de controle

$$u = J_a^{-1}(q)\bar{u} \quad (18)$$

onde

$$\bar{u} = \dot{x}_d + K_t(x_d - x_e) \quad (19)$$

Controle Cinemático

Dinâmica do erro:

$$\dot{e} + K_t e = 0 \quad (20)$$

Sistema é assintoticamente estável, com $e \rightarrow 0$ quando $t \rightarrow \infty$.

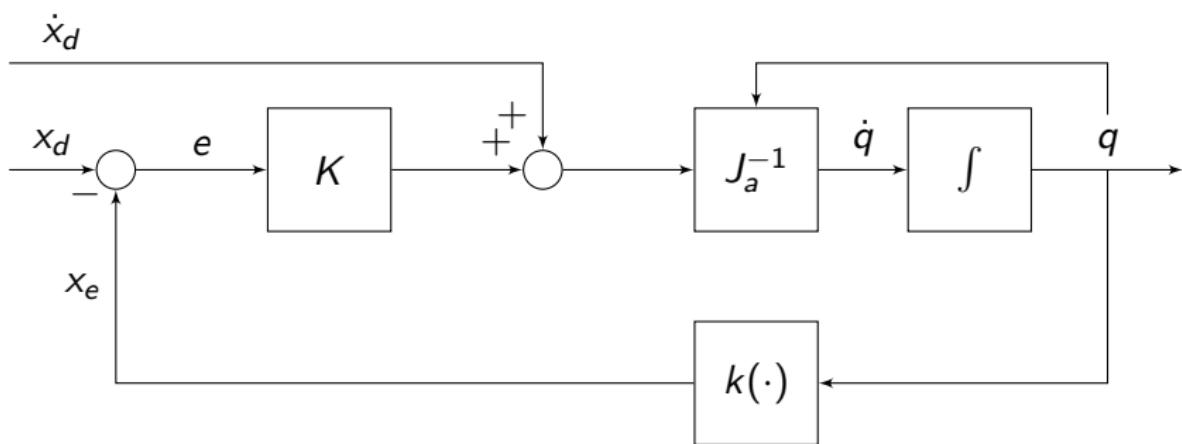
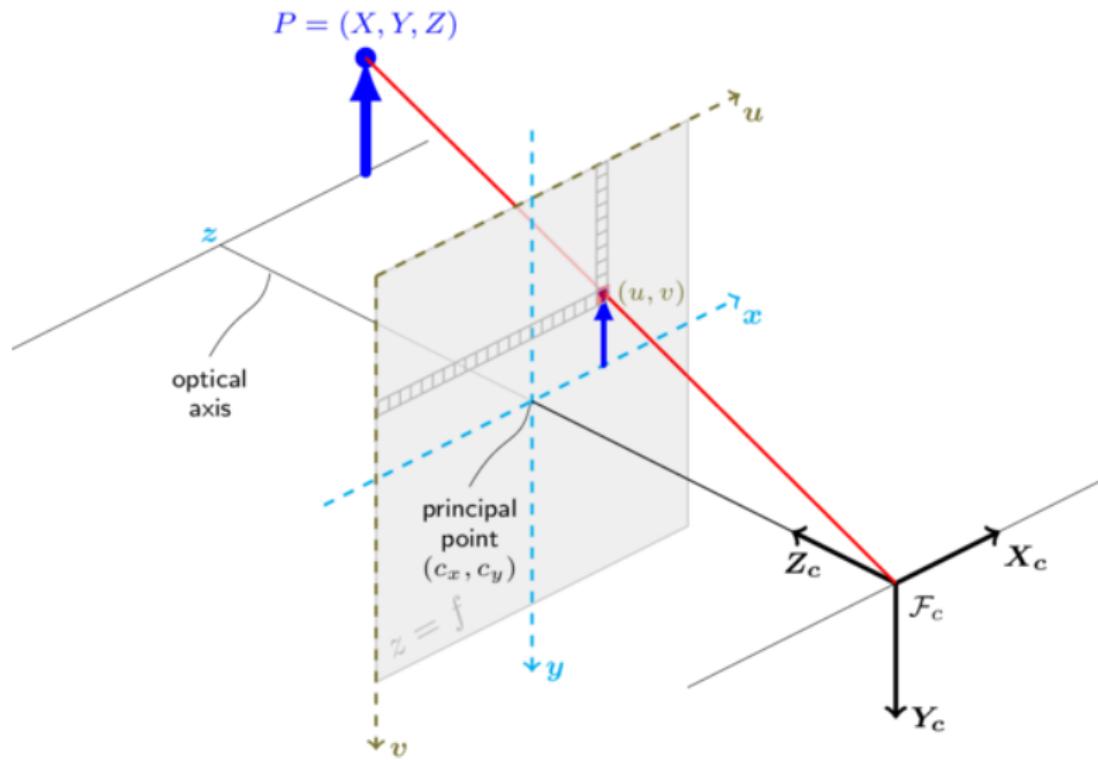


Figura: Controle cinemático proporcional com feedforward

Servo Visão

- Servo Visão Baseada em Posição

Modelo da Câmera



Projeção de perspectiva

$$\tilde{p} = \begin{bmatrix} f/\rho_w & 0 & u_0 \\ 0 & f/\rho_h & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} T_{0c}^{-1}(\tilde{P})_0 \quad (21)$$

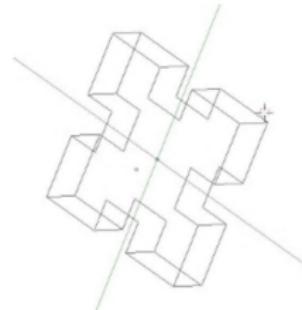
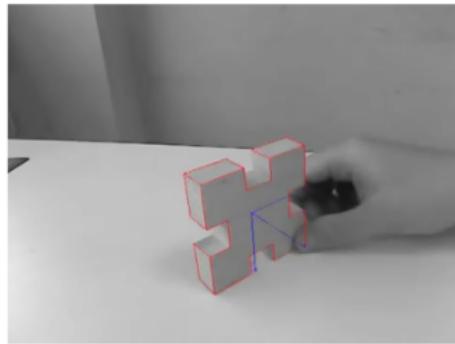
$$= K P_0 T_{0c}^{-1}(\tilde{P})_0 \quad (22)$$

$$= C(\tilde{P})_0 \quad (23)$$

onde K é chamada matriz de calibração da câmera.

Estimação da Pose

- Determinar a posição e orientação T_{ct} a partir de um conjunto de pontos característicos
- *Perspective-n-Point*
- ViSP - Visual Servoing Platform



Servo Visão Baseada em Posição

- Configuração *eye-in-hand*.
- Servo Visão baseada em Posição.



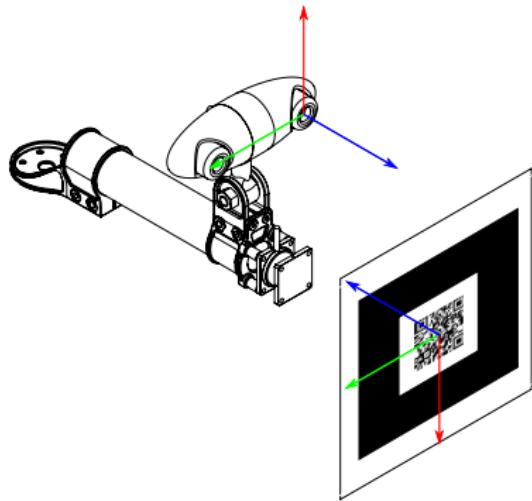
Matriz de calibração da câmera: parâmetros intrínsecos.



$$K = \begin{bmatrix} f/\rho_w & 0 & u_0 \\ 0 & f/\rho_h & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

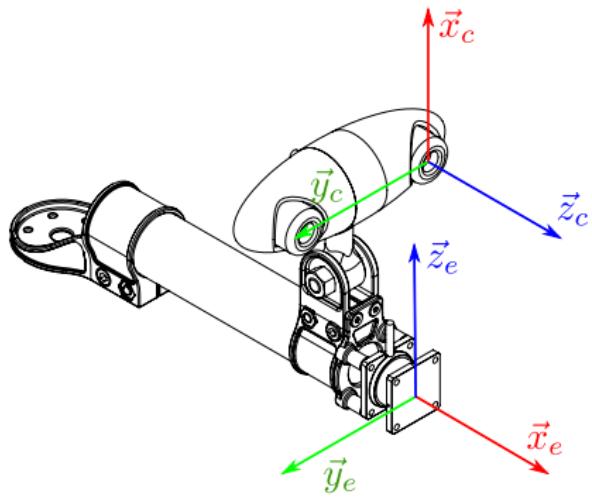
$$K = \begin{bmatrix} 877.62 & 0 & 306.53 \\ 0 & 880.32 & 210.12 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

T_{ct} : Posição e orientação do alvo em relação ao sistema de coordenadas da câmera.



$$T_{ct_0} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & (p_{t_0})_c \\ 0 & 0 & -1 & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

T_{ec} : Posição e orientação da câmera em relação ao efetuador.



$$T_{ec} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -30 \\ 0 & -1 & 0 & 101 \\ 1 & 0 & 0 & -43 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Orientação ϕ_t

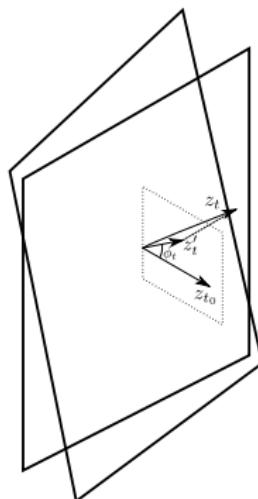


Figura: Caso em que a rotação em torno de x_c não representa a inclinação do plano do alvo.

Após obter os valores de $(p_t)_e$ e ϕ_t :

$$(x_t)_e = \begin{bmatrix} (p_t)_e \\ \phi_t \end{bmatrix} \quad (26)$$

e controle fica:

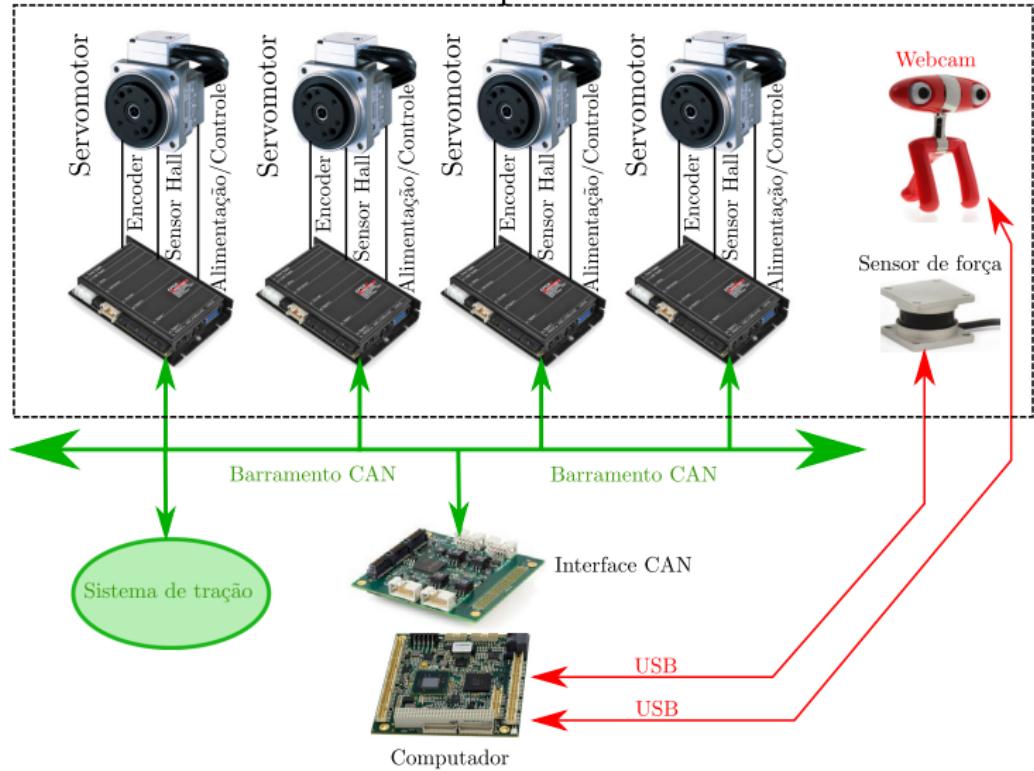
$$e_v = (x_t)_e - (x)_e \quad (27)$$

$$\bar{u}_v = K_v e \quad (28)$$

$$u_v = (J_a)_e^{-1} e_v \quad (29)$$

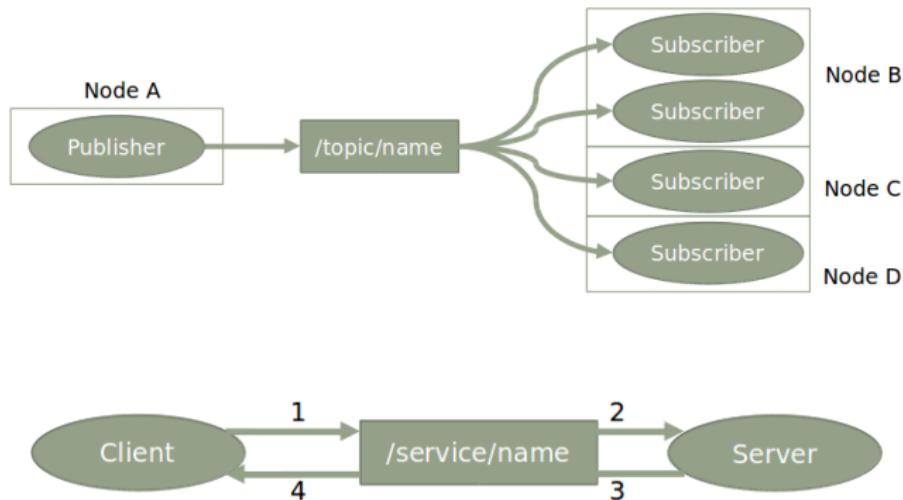
Hardware - Descrição

Manipulador

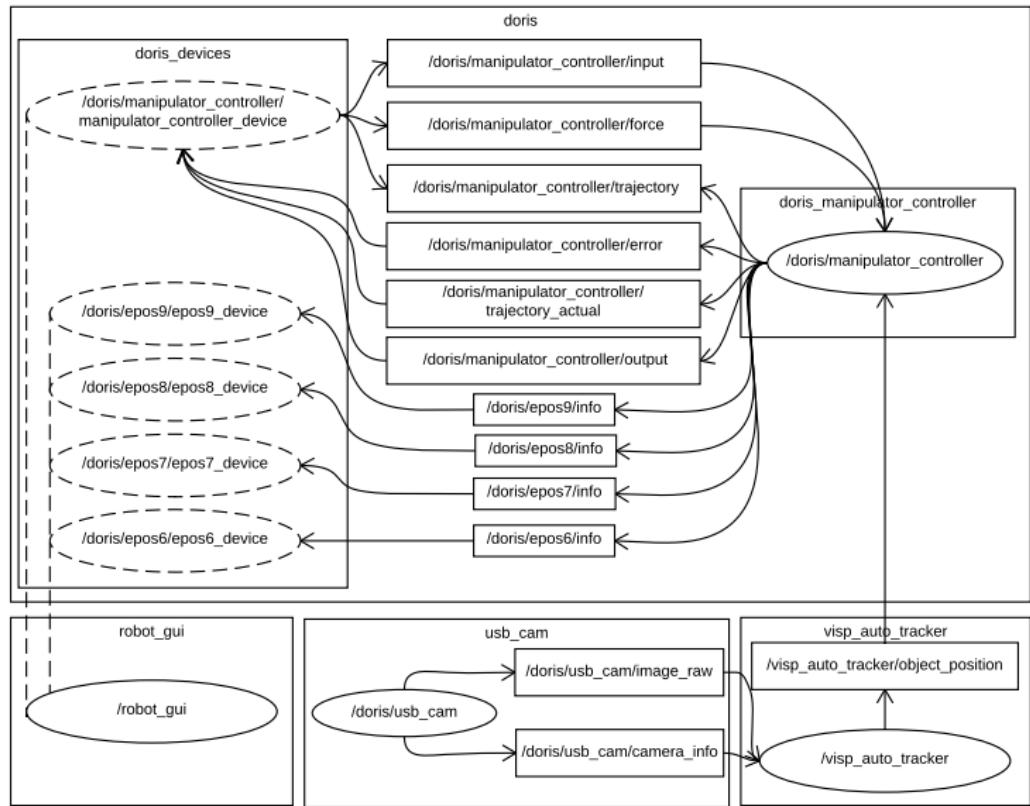


Robot Operating System (ROS)

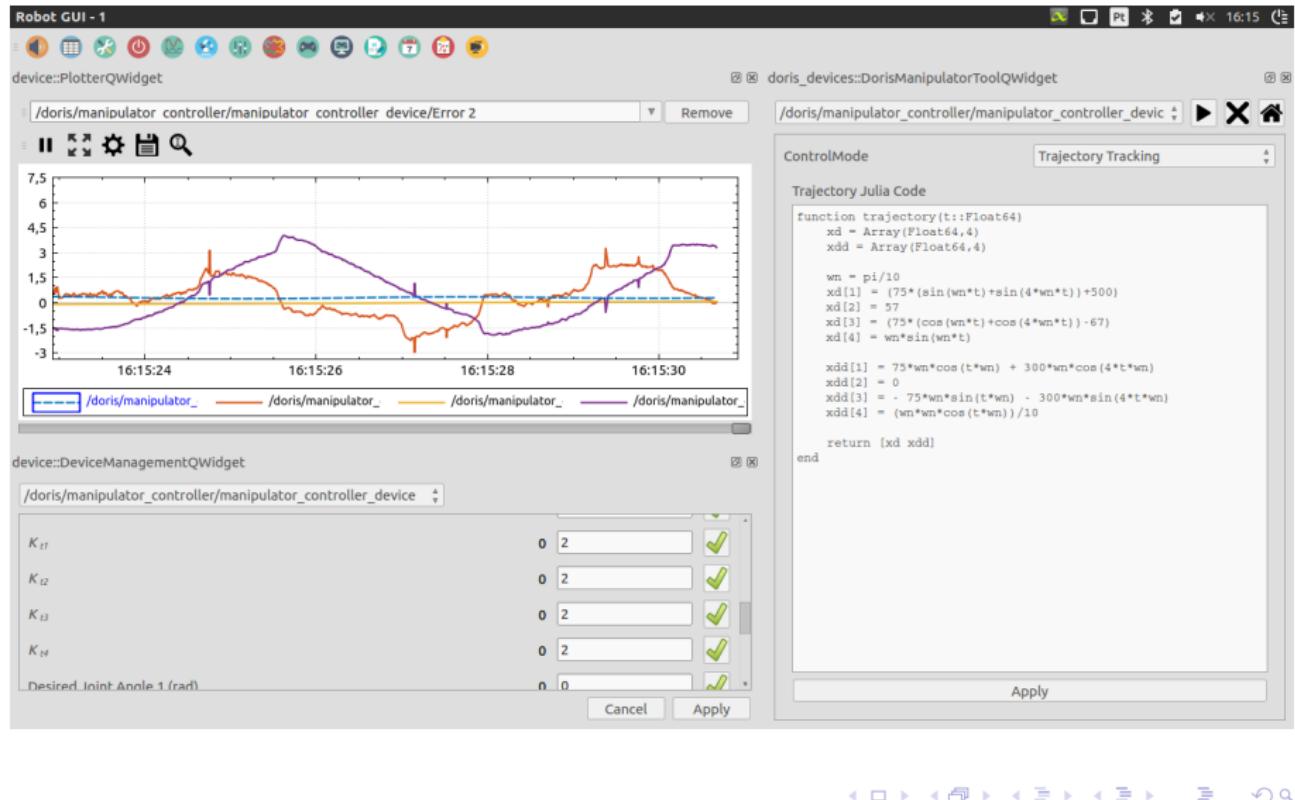
- Nodes
- Master
- Messages
- Topics
- Services



Software - Topologia (simplificar ...)

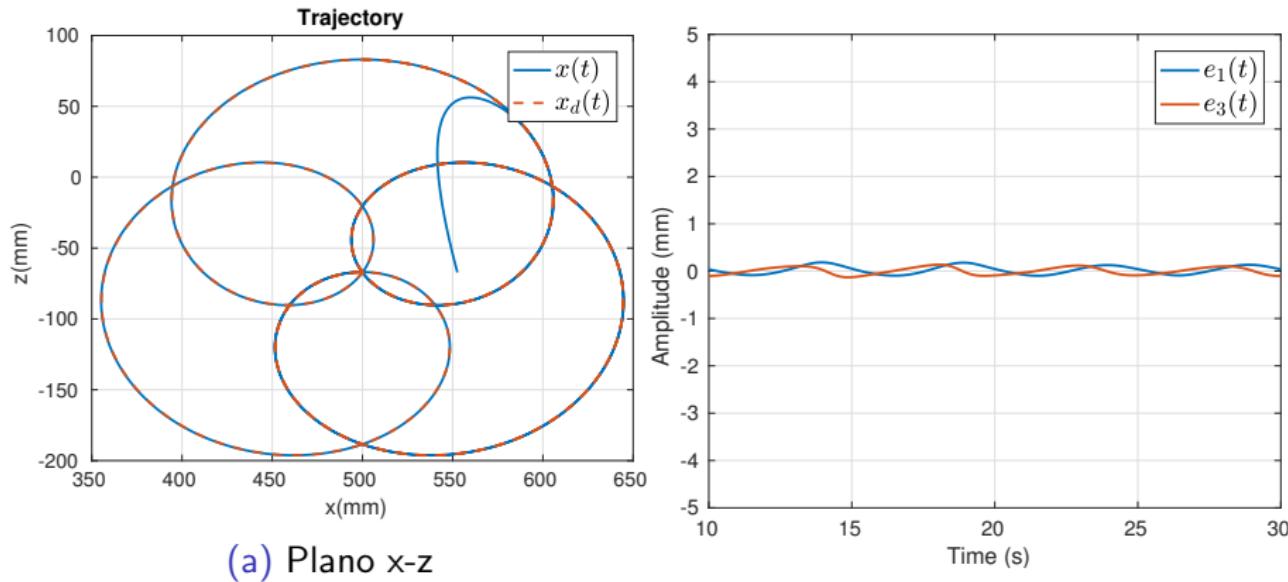


Software - Interface



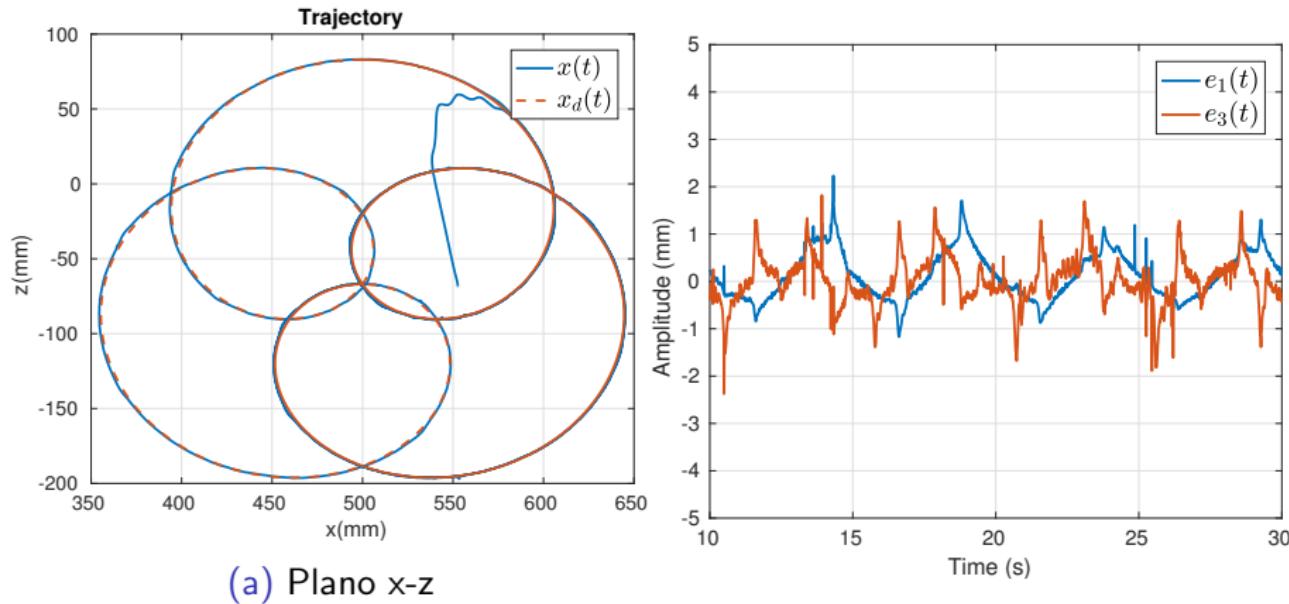
Resultados de Simulação

Resultados de simulação com ZOH de 10ms e ganho $K_t = 5I$



Resultados Experimentais - Rastreamento de Trajetória

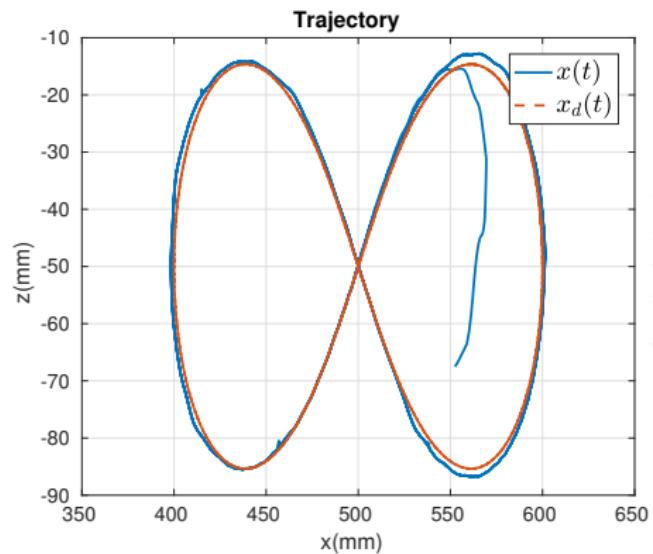
Resultados experimentais com ganho $K_t = 5/$ para trajetória 1.



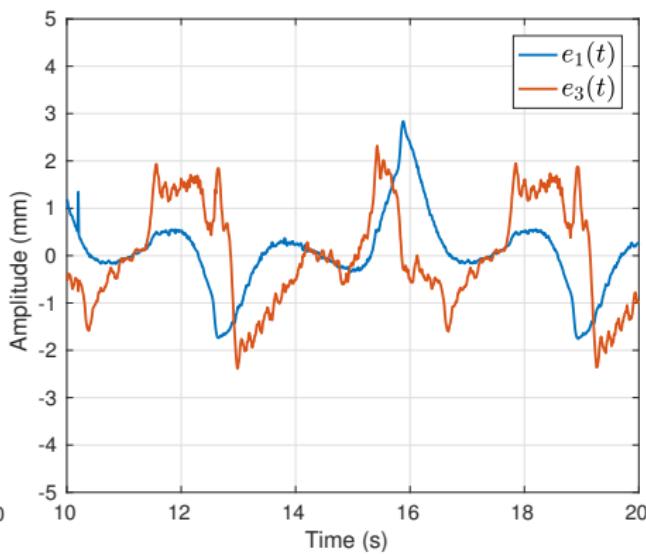
Video

Resultados experimentais - Rastreamento de Trajetória

Resultados experimentais com ganho $K_t = 5/$ para trajetória 2.



(a) Plano x-z



(b) Erro e_1 e e_2

Video

Resultados experimentais - Controle de Força

Resultados experimentais do controle de força com $k_f = 100$.

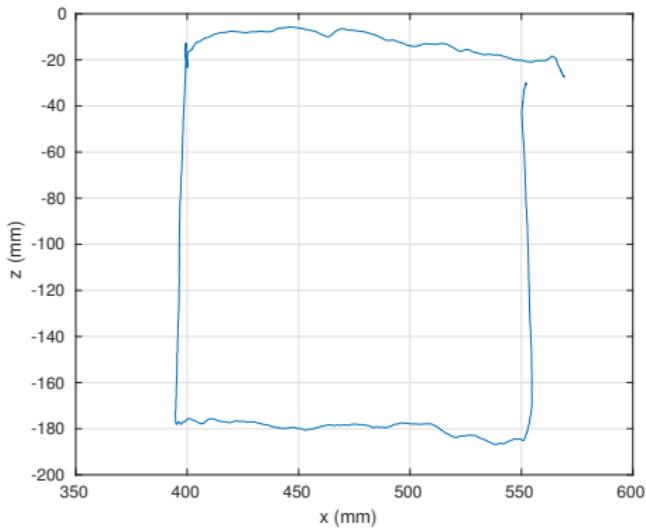
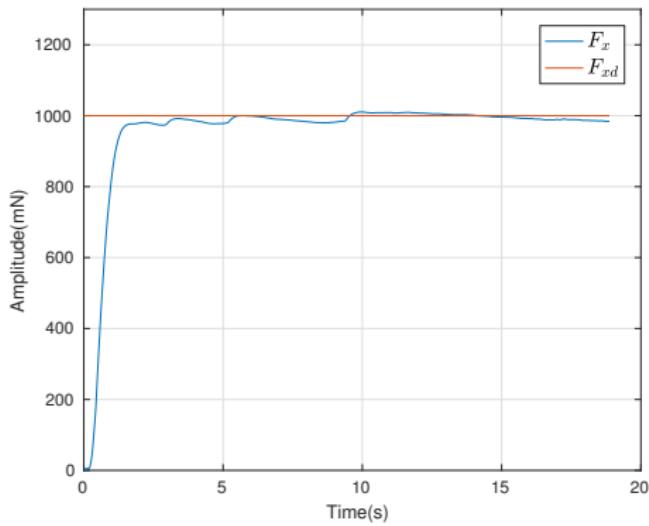


Figura: Plano x-z

Video

Resultados experimentais - Controle de Força Approach

Resultados experimentais do controle de força na direção de approach com controlador PI de $k_p = 2$ e $k_i = 0.05$.



Resultados experimentais - Controle por Servo Visão



Video

Conclusão

- Tópico 1
- Tópico 2
- Tópico 3
- Tópico 4

The End