Controle de trajetórias de um veículo submarino autônomo com estados estimados.

Vinícius B. Falchetto Prof. Dr. Janito Vaqueiro Ferreira

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

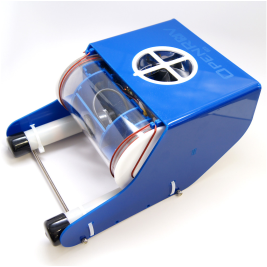
28/07/2016

Sumário

Motivação

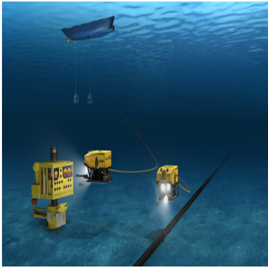
- Submarinos são instrumentos para a humanidade explorar o meio aquático.
- História: desde grécia antiga até em tempos modernos como máquinas de guerra (séc. XX).
- A recente revolução em tecnologias computacionais de baixo custo e pequeno porte: robótica móvel.
- Os AUVs aparecem na conjunção do desenvolvimento da robótica móvel e os interesses de exploração:
  - militar: defesa, espionagem, minas marinhas
  - economia: mineração, óleo e gás

Motivação



- Submarinos são instrumentos para a humanidade explorar o meio aquático.
- História: desde grécia antiga até em tempos modernos como máquinas de guerra (séc. XX).
- A recente revolução em tecnologias computacionais de baixo custo e pequeno porte: robótica móvel.
- Os AUVs aparecem na conjunção do desenvolvimento da robótica móvel e os interesses de exploração:
  - militar: defesa, espionagem, minas marinhas
  - economia: mineração, óleo e gás

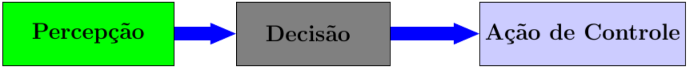
Motivação



- Submarinos são instrumentos para a humanidade explorar o meio aquático.
- História: desde grécia antiga até em tempos modernos como máquinas de guerra (séc. XX).
- A recente revolução em tecnologias computacionais de baixo custo e pequeno porte: robótica móvel.
- Os AUVs aparecem na conjunção do desenvolvimento da robótica móvel e os interesses de exploração:
  - militar: defesa, espionagem, minas marinhas
  - economia: mineração, óleo e gás

Motivação

- A maioria das tarefas de exploração referem à inspeção de estruturas, ambientes, seres vivos, etc...
- LMA e ENIB-Fr (RSM): AUV de pequeno porte, baixo consumo energético e poucos sensores (IMU e pressão).
- Aplicação do RSM: inspeção de turbinas, risers(restrição de espaço)
- Em geral, as camadas de um AUV:



Sensores: IMU, pressão, sonar, radar, câmeras, etc ...

'Inteligência': armazena, decide, planeja, gerencia, etc ...

Atuadores: garantir que a ordem da decisão seja cumprida.

Objetivos

- **O objetivo:** algoritmos do bloco de ação de controle.
- A implementação de um modelo dinâmico representativo.
- O desenvolvimento de um filtro de **identificação** das correntes marinhas.
- A construção de um filtro de estimação de estados para a **localização** do AUV.
- A implementação de uma **lei de controle** não linear para rastreamento de trajetórias.

Em resumo:

Resolver o problema de controle de trajetórias com influência de efeitos externos e que considera as restrições de um sistema embarcado.

Problema de controle de trajetórias

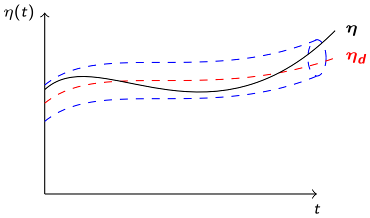
Obter lei de controle para o problema de rastreamento de trajetórias de um veículo submarino.

Problema de rastreamento de trajetória:

$$\|\boldsymbol{\eta}(t) - \boldsymbol{\eta}_d(t)\| \to \epsilon \quad quando \quad t \to \infty$$

Veja que a trajetória do veículo fica no interior de um tubo centrado em $\boldsymbol{\eta}_d(t)$

- $\boldsymbol{\eta}_d(t)$ em $t \in [0, \infty)$ trajetória desejada
- $\boldsymbol{\eta}(t) = [\boldsymbol{p}^\top, \boldsymbol{q}^\top]^\top$ é a trajetória do veículo



Para o problema de controle é **necessário** conhecer os estados do sistema!

Problema de Filtragem de Estados

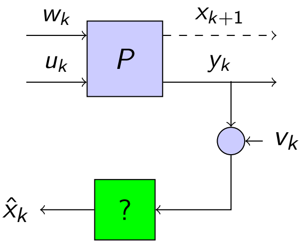
Nem todos os estados (posição e velocidades lineares) são medidos!

Implementar algoritmo que estime todos os estados do veículo a partir de sensores embarcados no veículo.

Seja o sistema não linear :

$$P \begin{cases} x_{k+1} = f(x_k) + w_k \\ y_k = h(x_k) + v_k \end{cases}$$

onde as medidas $y_0, \ldots, y_k$ são conhecidas.



Problema de filtragem:

- Qual a melhor estimativa de x_k apesar dos distúrbios?

Problema de Filtragem de Correntes Marinhas

As correntes marinhas influenciam muito no desempenho do sistema de controle.

Estimar correntes marinhas:

- Sejam as correntes constantes: ${}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{V}_c$
- Dada a estimativa do estado do veículo: $\hat{\boldsymbol{\eta}}$ e $\hat{\boldsymbol{\nu}}_r$

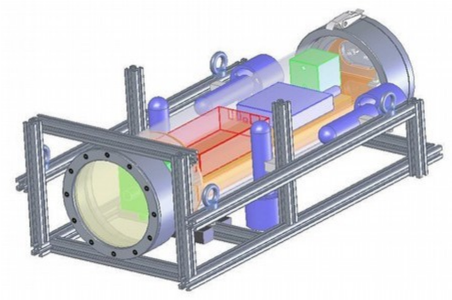
Implementar método para encontrar estimativa ${}^{\mathcal{I}}\hat{\boldsymbol{V}}_c(t)$:

$$\|{}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{V}_c - {}^{\mathcal{I}}\hat{\boldsymbol{V}}_c(t)\| \rightarrow \epsilon \quad quando \quad t \rightarrow t_1 \text{ (tempo finito)}$$

Modelo Matemático

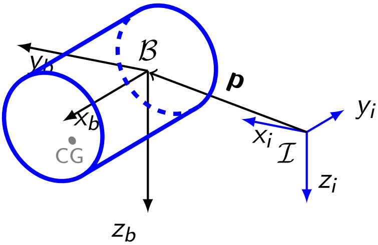
O modelo do AUV da Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest (ENIB)em cooperação com o LMA da Unicamp.

- manobrável
- corpo rígido cilíndrico
- correntes marinhas constantes
- sem efeitos de superfície e leito
- completamente atuado



Cinemática

- Referencial Inercial: $\mathcal{I}$
- Referencial fixo ao AUV: $\mathcal{B}$
- **Quaternions**: sem singularidades
- Variáveis padronizadas: SNAME(1950)



$$\boldsymbol{\eta} = [{}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{p}^\top, \mathbf{q}^\top], \quad {}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{p}^\top = [x, y, z], \quad \mathbf{q}^\top = [q_0, q_1, q_2, q_3]$$

$$\boldsymbol{\nu} = [{}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{v}^\top, {}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{w}^\top], \quad {}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{v}^\top = [u, v, w], \quad {}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{w}^\top = [p, q, r]$$

$$\boldsymbol{\tau} = [{}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{f}^\top, {}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{m}^\top], \quad {}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{f}^\top = [X, Y, Z], \quad {}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{m}^\top = [K, L, M]$$

Cinemática: Translação

Quaternion de rotação: $\mathbf{q} = [q_0, \vec{q}] \in \mathbb{H}, \ |\mathbf{q}| = 1.$

Transformação entre referenciais por produto de quaternion:

$$^{\mathcal{I}}\overline{\dot{\boldsymbol{p}}} = \mathbf{q} \otimes {}^{\mathcal{B}}\overline{\boldsymbol{v}} \otimes \mathbf{q}^*$$

Matricialmente:

$$\dot{\mathbf{p}} = {}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{R}_{\mathcal{B}}(\mathbf{q})^{\mathcal{B}}\boldsymbol{v}$$

onde,

$$^{\mathcal{I}}\boldsymbol{R}_{\mathcal{B}}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 1-2(q_2^2+q_3^2) & 2(q_1q_2-q_3q_0) & 2(q_1q_3+q_2q_0) \\ 2(q_1q_2+q_3q_0) & 1-2(q_1^2+q_3^2) & 2(q_2q_3-q_1q_0) \\ 2(q_1q_3-q_2q_0) & 2(q_2q_3+q_1q_0) & 1-2(q_1^2+q_2^2) \end{bmatrix}$$

Cinemática: Rotação

Quaternions e velocidades angulares

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{1}{2}\mathbf{q} \otimes {}^{\mathcal{B}}\overline{\boldsymbol{w}}$$

Matricialmente:

$${}^{\mathcal{I}}\dot{\boldsymbol{q}} = \frac{1}{2}\boldsymbol{R}_2(\mathbf{q})^{\mathcal{B}}\boldsymbol{w}$$

onde,

$$\boldsymbol{R}_2(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_0 & q_3 & -q_2 \\ -q_3 & q_0 & q_1 \\ q_2 & -q_1 & q_0 \end{bmatrix}, \qquad \boldsymbol{R}_2(\mathbf{q})^\top \boldsymbol{R}_2(\mathbf{q}) = \boldsymbol{I}_3$$

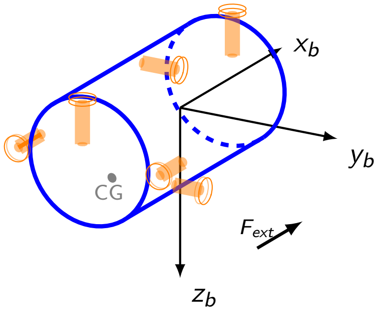
Dinâmica

Equações de Newton-Euler para o corpo rígido:

$$\begin{aligned} m\ddot{\boldsymbol{p}}_{cg} &= \boldsymbol{f} \\ \boldsymbol{I}_{\mathcal{B}}\dot{\boldsymbol{w}} + \boldsymbol{w} \times \boldsymbol{I}_{\mathcal{B}}\boldsymbol{w} + m\boldsymbol{r}_{cg} \times (\dot{\boldsymbol{v}} + \boldsymbol{w} \times \boldsymbol{v}) &= \boldsymbol{m} \end{aligned}$$

Modelo **análogo** aos robôs aéreos (quadrirrotores, dirigível), com efeitos externos adicionais.

- Dinâmica de corpo rígido
- Forças externas
- Distúrbios
- Atuadores



Dinâmica

Se o CG está à $\boldsymbol{r}_{cg}$, é possível parametrizar Newton-Euler como

$$\boldsymbol{M}_{rb}\dot{\boldsymbol{\nu}} + \boldsymbol{C}_{rb}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} = \boldsymbol{f}_{ext}$$

Onde

$$\boldsymbol{M}_{rb} = \begin{bmatrix} m\boldsymbol{I}_3 & -\boldsymbol{S}({}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{r}_{cg}) \\ \boldsymbol{S}({}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{r}_{cg}) & \boldsymbol{I}_{\mathcal{B}} \end{bmatrix} > 0$$

$$\boldsymbol{C}_{rb}(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} m\boldsymbol{S}({}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{w}) & -m\boldsymbol{S}({}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{w})\boldsymbol{S}({}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{r}_{cg}) \\ m\boldsymbol{S}({}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{r}_{cg})\boldsymbol{S}({}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{w}) & \boldsymbol{S}(\boldsymbol{I}_{\mathcal{B}}{}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{w}) \end{bmatrix}$$

Dinâmica

O vetor de forças externas pode ser particionado como segue

$$\boldsymbol{f}_{ext} = -\boldsymbol{f}_{ma} - \boldsymbol{f}_{arr} - \boldsymbol{f}_{res} + \boldsymbol{f}_{u}$$

Onde

- $\boldsymbol{f}_{ma}$ é o efeito de massa adicionada
- $\boldsymbol{f}_{arr}$ é o efeito de arrasto hidrodinâmico
- $\boldsymbol{f}_{res}$ é o efeito das forças restaurativas
- $\boldsymbol{f}_{u}$ são os atuadores

Considera-se também o efeito de correntes marinhas.

Massa adicionada

É a tendência de que o volume de água ao redor do veículo também acelere com ele. Visto como um ganho de massa (Lamb, 1932).

$$T = \frac{1}{2}\boldsymbol{\nu}^\top \boldsymbol{M}_a \boldsymbol{\nu}$$

Aplicando as equações de Kirchhoff (Lagrange), chega-se à

$$\boldsymbol{f}_{ma} = \boldsymbol{M}_a \dot{\boldsymbol{\nu}} + \boldsymbol{C}_a(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu}$$

onde,

$$\boldsymbol{M}_a = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} > 0$$

$$\boldsymbol{C}_a(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 & -\boldsymbol{S}(M_{11}{}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{v} + M_{12}{}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{w}) \\ -\boldsymbol{S}(M_{11}{}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{v} + M_{12}{}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{w}) & \boldsymbol{S}(M_{21}{}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{v} + M_{22}{}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{w}) \end{bmatrix}$$

Arrasto Hidrodinâmico

Força de arrasto (quadrática) em fluidos:

$$f_d(u) = \underbrace{-\frac{1}{2}\rho C_d A \|\boldsymbol{u}\|}_{D(\boldsymbol{u})} \boldsymbol{u}$$

Forma mais completa para submarinos pode ser escrita com componentes lineares e quadráticas

$$\boldsymbol{f}_{arr} = (\boldsymbol{D}_l + \boldsymbol{D}_q(\boldsymbol{\nu}))\boldsymbol{\nu} = \boldsymbol{D}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu}$$

É dissipativa, sempre

$$\boldsymbol{D}(\boldsymbol{\nu}) > 0$$

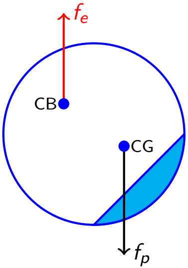
Forças restaurativas

Resultado da ação do binário força **peso**$({}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{f}_p)$ e **empuxo** $({}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{f}_e)$ em um veículo submerso em um fluido.

Se CG está em ${}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{r}_{cg}$ e CB em ${}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{r}_{cb}$, então

$$\boldsymbol{f}_{rest} = \begin{bmatrix} {}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{f}_p + {}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{f}_e \\ \boldsymbol{S}({}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{r}_{cg})^{\mathcal{B}}\boldsymbol{f}_p + \boldsymbol{S}({}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{r}_{cb})^{\mathcal{B}}\boldsymbol{f}_e \end{bmatrix}$$

$$= \boldsymbol{g}(\eta) \qquad \text{(navios, dirigíveis, etc.)}$$



Requisito de projeto: posicionar CG **abaixo** CB de forma que o binário seja estável.

Atuadores

São 6 atuadores: $\boldsymbol{u} = [u_1, \ldots, u_6]^\top$.

- ${}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{b}_i$ versor de orientação do atuador;
- ${}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{p}_i$ a posição do atuador.

O vetor de esforços dos atuadores fica

$$
\begin{aligned}
{}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{f}_u &= \begin{bmatrix} {}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{b}_1 & {}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{b}_2 & \cdots & {}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{b}_6 \\ \boldsymbol{S}({}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{p}_1)^{\mathcal{B}}\boldsymbol{b}_1 & \boldsymbol{S}({}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{p}_2)^{\mathcal{B}}\boldsymbol{b}_2 & \cdots & \boldsymbol{S}({}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{p}_6)^{\mathcal{B}}\boldsymbol{b}_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_6 \end{bmatrix} \\
&= \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}
\end{aligned}
$$

O modelo é **afim** no controle.

Correntes marinhas

Influenciam tanto a cinemática quanto a dinâmica. São assumidas constantes ${}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{V}_c = [V_{cx}, V_{cy}, V_{cz}]^\top$.

Reescrever em relação ao novo referencial inercial, com velocidade relativa é : ${}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{v}_r = {}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{v} - {}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{v}_c$.

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{T}(\boldsymbol{\nu}_r + \boldsymbol{\nu}_c), \qquad \boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} {}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{R}_{\mathcal{B}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{1}{2}\boldsymbol{R}_2 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{M}_{rb}\dot{\boldsymbol{\nu}}_r + \boldsymbol{C}_{rb}(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r = \boldsymbol{\tau}_r$$

$$\boldsymbol{f}_{ma} = \boldsymbol{M}_a\dot{\boldsymbol{\nu}}_r + \boldsymbol{C}_a(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r$$
$$\boldsymbol{f}_{arr} = \boldsymbol{D}(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r$$

As forças restaurativas e os atuadores não sofrem alteração.

Modelo Completo

O modelo completo no formato de equações de estados

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \begin{bmatrix} {}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{R}_{\mathcal{B}} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \frac{1}{2}\boldsymbol{R}_2 \end{bmatrix} (\boldsymbol{\nu}_r + \boldsymbol{\nu}_c)$$

$$\dot{\boldsymbol{\nu}}_r = -\boldsymbol{M}^{-1}[\boldsymbol{C}(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r + \boldsymbol{D}(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{\eta})] + \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}$$

Sendo que

- $\boldsymbol{M} = \boldsymbol{M}_{cr} + \boldsymbol{M}_a$
- $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{\nu}_r) = \boldsymbol{C}_{rb}(\boldsymbol{\nu}_r) + \boldsymbol{C}_a(\boldsymbol{\nu}_r)$

Modelo de sensor

Um modelo genérico de sistema medida

$$^{\mathcal{A}}\boldsymbol{x}_m = {^{\mathcal{A}}\boldsymbol{R}_{\mathcal{B}}}(\boldsymbol{K}^{\mathcal{B}}\boldsymbol{x}_r + \boldsymbol{b} + \boldsymbol{\omega}), \quad \boldsymbol{\omega} \sim \mathcal{N}(0, \boldsymbol{\Sigma})$$

- $^{\mathcal{A}}\boldsymbol{R}_{\mathcal{B}}$ é desalinhamento do sensor
- $\boldsymbol{K}$ matriz de ganhos do sensor
- $\boldsymbol{b}$ é polarização na medida
- $\boldsymbol{\omega}$ é ruído aleatório

Se o sensor está alinhado ($^{\mathcal{A}}\boldsymbol{R}_{\mathcal{B}} = \boldsymbol{I}$), o valor correto pode ser obtido

$$^{\mathcal{B}}\boldsymbol{x}_r = \boldsymbol{K}^{-1}(\boldsymbol{x}_m - \boldsymbol{b}) + \overline{\boldsymbol{\omega}}, \quad \boldsymbol{\omega} \sim \mathcal{N}(0, \boldsymbol{K}^{-1}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{K}^{-\top})$$

Neste trabalho foram utilizados uma **IMU** e um sensor de **pressão**.

Filtro de estados

Problema de filtragem de estados:

- Para hipótese de ruído gaussiano: filtro de Kalman
  - Sistemas lineares a filtragem é ótima
  - Sistemas não lineares, EKF
- Outros ruídos, outros filtros: $\mathcal{H}\infty$, partículas
- Para o Filtro de Kalman Estendido (EKF)
  - Não há garantia de otimalidade
  - Bom funcionamento: sistema bem comportado

Apesar das limitações, o **EKF** ainda é solução padrão para problemas de navegação.

EKF

Modelo geral discreto

$$
\begin{aligned}
x_k &= f(x_{k-1}, u_k, w_{k-1}), \qquad & w_{k-1} \sim \mathcal{N}(0, Q)\\
y_k &= h(x_k, u_k, \epsilon_k), & \epsilon_k \sim \mathcal{N}(0, R)
\end{aligned}
$$

- $x_k \in \mathbb{R}^n$ estados,
- $u_k \in \mathbb{R}^m$ entradas conhecidas,
- w_{k-1} e ϵ_k ruídos,
- $y_k \in \mathbb{R}^p$ a medição,
- $f(\cdot)$e $h(\cdot)$ funções.

O problema de filtragem

Encontrar melhor estimativa de x_k conhecendo-se $y_k, y_{k-1}, \ldots, y_0$.

EKF

Modelo não linear é linearizado no entorno da última estimativa

$$
\begin{aligned}
\tilde{x}_k &= F_{k-1}\tilde{x}_{k-1} + G_{k-1}w_{k-1} \\
\tilde{y}_k &= H_k\tilde{x}_k + L_k\epsilon_k
\end{aligned}
$$

onde $\tilde{x}_k = x_k - \hat{x}_{k|k}$ e $\tilde{y}_k = y_k - \hat{y}_{k|k-1}$

$$
F_k = \left.\frac{\partial f}{\partial x_k}\right|_{x_k=\hat{x}_{k|k}}, \quad G_k = \left.\frac{\partial f}{\partial w_k}\right|_{x_k=\hat{x}_{k|k}}
$$

$$
H_k = \left.\frac{\partial h}{\partial x_k}\right|_{x_k=\hat{x}_{k|k-1}}, \quad L_k = \left.\frac{\partial h}{\partial \delta_k}\right|_{x_k=\hat{x}_{k|k-1}}
$$

O algoritmo do filtro de Kalman linear é então aplicado.

EKF

O modelo do sistema para o problema de filtragem:

$$\begin{aligned}
\dot{\boldsymbol{p}} &= {}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{R}_{\mathcal{B}}(\boldsymbol{v}_r + \boldsymbol{v}_c) + \delta_p, \quad \delta_p \sim \mathcal{N}(0, \Sigma_p) \\
\dot{\mathbf{q}} &= \frac{1}{2}\boldsymbol{R}_2 \boldsymbol{w} \\
\dot{\boldsymbol{\nu}}_r &= -\boldsymbol{M}^{-1}[\boldsymbol{C}(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r + \boldsymbol{D}(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{\eta})] + \\
&\qquad + \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{B}\boldsymbol{u} + \delta_\nu, \quad \delta_\nu \sim \mathcal{N}(0, \Sigma_\nu)
\end{aligned}$$

Com medidas $\boldsymbol{y} = [\boldsymbol{h}_1; \boldsymbol{h}_2; \boldsymbol{h}_3; h_4]$, tais que

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{h}_1 &= \dot{\boldsymbol{v}}_r + \boldsymbol{S}(\boldsymbol{w})\boldsymbol{v}_r + \epsilon_1, \quad & \boldsymbol{h}_2 &= \boldsymbol{w} + \epsilon_2 \\
\boldsymbol{h}_3 &= {}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{R}_{\mathcal{B}}^{\top}\boldsymbol{h} + \epsilon_3, & h_4 &= \rho\|{}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{g}\| z_i + \epsilon_4
\end{aligned}$$

Correntes marinhas

Em algumas missões do AUV, as correntes marinhas **podem influenciar** no rastreamento de trajetórias.

Para estes casos, o problema de desempenho:

- Compensar o efeito das correntes marinhas
- Sem compensação o erro de trajetória cresce linearmente com o valor da corrente

Filtros complementares:

- Muito utilizados em fusão sensorial (Brown,1972)
- O Estimador de correntes é inspirado nesta ideia

Estimador de correntes

Considera que estão disponíveis medidas da posição e da velocidade relativa do veículo com ruídos

$$
\begin{aligned}
{}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{p}_m &= {}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{p} + \boldsymbol{\omega}_p \\
{}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{V}_{rm} &= {}^{\mathcal{I}}\dot{\boldsymbol{p}} - {}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{V}_c + \boldsymbol{\omega}_v
\end{aligned}
$$

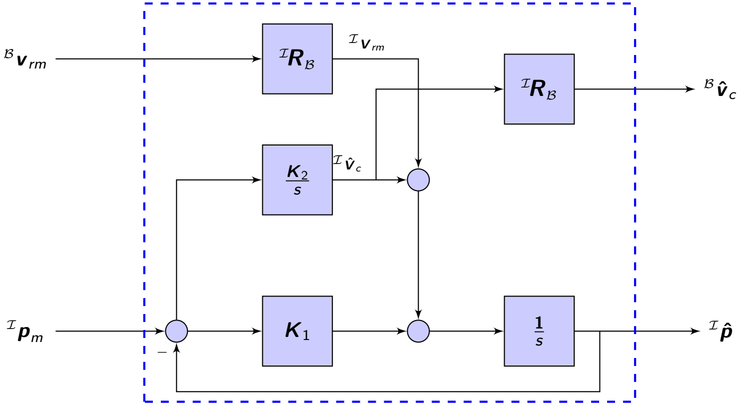
A corrente marinha é assumida constante (variação lenta).O estimador de correntes marinhas pode ser dado como:

$$
\begin{aligned}
{}^{\mathcal{I}}\dot{\hat{\boldsymbol{p}}} &= {}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{V}_{rm} + \boldsymbol{k}_1({}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{p}_m - {}^{\mathcal{I}}\hat{\boldsymbol{p}}) + {}^{\mathcal{I}}\hat{\boldsymbol{V}}_c \\
{}^{\mathcal{I}}\dot{\hat{\boldsymbol{V}}}_c &= \boldsymbol{k}_2({}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{p}_m - {}^{\mathcal{I}}\hat{\boldsymbol{p}})
\end{aligned}
$$

Com $\boldsymbol{k}_1$ e $\boldsymbol{k}_2 \in \mathbb{R}^{3\times 3}$ escolhidas para garantir a convergência.

Estimador de Correntes

Observe que o filtro 'trabalha' no referencial inercial $\mathcal{I}$, onde as correntes são constantes

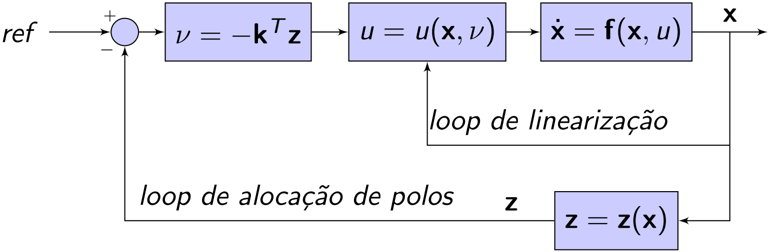


Controle

Para o controle de trajetórias:

- Controle simples: PID, LQR (modelo linearizado).
- Controle não linear: ganho em desempenho, porém com maior complexidade.

Dado o modelo não linear desenvolvido, foi escolhida a técnica de controle não linear de linearização por realimentação.



Controle

O problema de controle pode ser particionado em dois subproblemas: um rastreador cinemático e um controlador de velocidade.

Seja o modelo de controle cinemático

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\eta}} &= \boldsymbol{T}(\boldsymbol{u}_{cin} + \boldsymbol{\nu}_c) \\ \boldsymbol{y}_c &= \boldsymbol{\eta} \end{aligned}$$

E o modelo de controle de velocidades

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\nu}}_r &= -\boldsymbol{M}^{-1}[\boldsymbol{C}(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r + \boldsymbol{D}(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{\eta})] + \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{B}\boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{y}_{din} &= \boldsymbol{\nu} \end{aligned}$$

Controle Cinemático

Para a cinemática de rotação:

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{1}{2}\boldsymbol{R}_2(\mathbf{q})\boldsymbol{w}_{cin}$$

O controle é a velocidade angular $\boldsymbol{w}_{cin}$ que faz seguir as trajetórias de orientação $\mathbf{q}_d, \dot{\mathbf{q}}_d, \ddot{\mathbf{q}}_d$. O erro de orientação é definido como

$$\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{q}^{-1} \otimes \mathbf{q}_d$$

Derivando, substituindo relações cinemáticas:

$$\dot{\tilde{\mathbf{q}}} = \frac{1}{2}[\tilde{\mathbf{q}} \otimes \overline{\boldsymbol{w}}_d - \overline{\boldsymbol{w}}_{cin} \otimes \tilde{\mathbf{q}}]$$

Controle Cinemático

Ao se considerar a derivada do erro como

$$\dot{\tilde{\mathbf{q}}} = \boldsymbol{K}_q \delta_{\tilde{\mathbf{q}}}, \quad \delta_{\tilde{\mathbf{q}}} = [1, 0, 0, 0]^\top - \tilde{\mathbf{q}}$$

E considerando a velocidade angular de referência da seguinte forma

$$\boldsymbol{w}_d = 2\boldsymbol{R}_2^\top(\mathbf{q}_d)\dot{\mathbf{q}}_\mathbf{d}$$

Obtém-se a lei cinemática de controle de orientação

$$\boldsymbol{w}_{cin} = [\otimes \tilde{\mathbf{q}}]^\top \{[\tilde{\mathbf{q}} \otimes]\boldsymbol{w}_d - 2\boldsymbol{K}_q \delta_{\tilde{\mathbf{q}}}\}$$

Controle Cinemático

Já para a cinemática de translação tem-se

$$\dot{\boldsymbol{p}} = {}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{R}_{\mathcal{B}}(\boldsymbol{v}_{cin} + \boldsymbol{v}_c)$$

O controle é a velocidade linear $\boldsymbol{v}_{cin}$ que faz seguir as trajetórias $\boldsymbol{p}_d, \dot{\boldsymbol{p}}_d$.
Dado o erro de posição

$$\tilde{\boldsymbol{p}} = \boldsymbol{p} - \boldsymbol{p}_d$$

É possível definir a seguinte lei de controle

$$\boldsymbol{v}_{cin} = {}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{R}_{\mathcal{B}}^{\top}(\dot{\boldsymbol{p}}_d - \boldsymbol{K}_p\tilde{\boldsymbol{p}}) - \boldsymbol{v}_c$$

Controle Cinemático

De fato, a malha fechada é a equação da dinâmica do erro de posição:

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{p}}} + \boldsymbol{K}_p \tilde{\boldsymbol{p}} = 0$$

Ao se escolher a matriz de ganhos apropriadamente, o erro convergirá para zero.

Por fim, a lei de controle cinemática é dada por

$$\boldsymbol{\nu}_{cin} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_{cin} \\ \boldsymbol{w}_{cin} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{R}_{\mathcal{B}}^{\top}(\dot{\boldsymbol{p}}_d - \boldsymbol{K}_p \tilde{\boldsymbol{p}}) - \boldsymbol{v}_c \\ [\otimes \tilde{\mathbf{q}}]^{\top}\{[\tilde{\mathbf{q}} \otimes]\boldsymbol{w}_d - 2\boldsymbol{K}_q \delta_{\tilde{\mathbf{q}}}\} \end{bmatrix}$$

Controle dinâmico

A partir do modelo dinâmico, e utilizando a técnica de Linearização por realimentação, obtém-se

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{y}}_{din} &= \dot{\boldsymbol{\nu}}_r \\ &= -\boldsymbol{M}^{-1}[\boldsymbol{C}(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r + \boldsymbol{D}(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{\eta})] + \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{B}\boldsymbol{u} \\ &= \boldsymbol{F}(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\nu}_r) + \boldsymbol{A}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{u}\end{aligned}$$

tais que os campos vetoriais são :

$$\begin{aligned}\boldsymbol{F}(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\nu}_r) &= -\boldsymbol{M}^{-1}[\boldsymbol{C}(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r + \boldsymbol{D}(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{\eta})] \\ \boldsymbol{A}(\boldsymbol{\eta}) &= \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{B}\end{aligned}$$

Controle dinâmico

Por fim, seja o erro de velocidade:

$$\tilde{\boldsymbol{\nu}} = \boldsymbol{\nu} - \boldsymbol{\nu}_d$$

Então a seguinte lei de controle lineariza a equação dinâmica e já inclui o rastreamento de trajetória

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{A}^{-1}(\boldsymbol{\eta})[\dot{\boldsymbol{\nu}}_d + \boldsymbol{K}_\nu \tilde{\boldsymbol{\nu}} - \boldsymbol{F}(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\nu}_r)]$$

A malha fechada resulta na dinâmica do erro de velocidade:

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\nu}}} + \boldsymbol{K}_\nu \tilde{\boldsymbol{\nu}} = 0$$

Controle dinâmico

1. Calcular a velocidade desejada e sua derivada:

$$\boldsymbol{\nu}_d = \begin{bmatrix} {}^{\mathcal{I}}\boldsymbol{R}_{\mathcal{B}}^{\top}(\dot{\boldsymbol{p}}_d - \boldsymbol{K}_p\tilde{\boldsymbol{p}}) - \boldsymbol{v}_c \\ [\otimes\tilde{\mathbf{q}}]^{\top}\{[\tilde{\mathbf{q}}\otimes]\boldsymbol{w}_d - 2\boldsymbol{K}_q\delta_{\tilde{\mathbf{q}}}\} \end{bmatrix}$$

$$\dot{\boldsymbol{\nu}}_d = \frac{d\boldsymbol{\nu}_d}{dt}$$

2. Calcular o sinal de controle da malha de velocidade

$$\boldsymbol{\xi} = \dot{\boldsymbol{\nu}}_d + \boldsymbol{K}_\nu\tilde{\boldsymbol{\nu}}$$

3. Por fim, o esforço de controle

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{A}^{-1}(\eta)[\xi - \boldsymbol{F}(\eta, \boldsymbol{\nu}_r)]$$

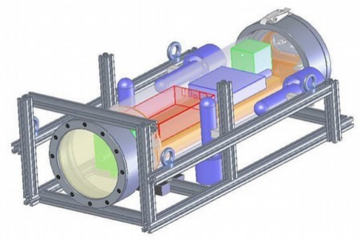
onde

$$\boldsymbol{F}(\eta, \boldsymbol{\nu}_r) = -\boldsymbol{M}^{-1}[\boldsymbol{C}(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r + \boldsymbol{D}(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r + \boldsymbol{g}(\eta)]$$
$$\boldsymbol{A}(\eta) = \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{B}$$

Resultados

As simulações consideraram o modelo do veículo RSM com os parâmetros:

Parâmetro	Valor	Descrição
r	$0.1(m)$	raio
L	$0.6(m)$	comprimento
m	$18.71(kg)$	mas. seca
V	$18.85(dm^3)$	volume
ρ	$998(\frac{kg}{m^3})$	dens. água
g	$9.81(\frac{m}{s^2})$	acc. gravidade
c_d	0.8	arr. axial
c_{dc}	1.2	arr. long.
γ	1.005	flutuação
$\boldsymbol{p}_{cg}$	$[0, 0, 1/80]^\top (m)$	CG
$\boldsymbol{p}_{cb}$	$[0, 0, 0]^\top (m)$	CB



O modelo foi implementado em Matlab, com integração de Euler, passo de $T_s = 0.001s$ e os algoritmos desenvolvidos com taxa de atualização e de aquisição de $100Hz$.

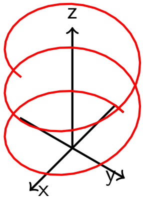
Resultados

Os parâmetros dos algoritmos desenvolvidos:

- Filtro de correntes: $\boldsymbol{K}_1 = 20\boldsymbol{I}_3, \quad \boldsymbol{K}_2 = 100\boldsymbol{I}_3$
- EKF: processo $Q_p = 0.1\boldsymbol{I}_3, Q_q = 0.1\boldsymbol{I}_4, Q_v = 0.1\boldsymbol{I}_3, Q_w = 0.1\boldsymbol{I}_3$ e medidas $R_a = 10^{-4}\boldsymbol{I}_3, R_m = 10^{-4}\boldsymbol{I}_3, R_w = 10^{-1}\boldsymbol{I}_3, R_b = 0.1$
- Controlador: $\boldsymbol{K}_p = 10\boldsymbol{I}_3, \boldsymbol{K}_q = 10\boldsymbol{I}_4, \boldsymbol{K}_\nu = 10\boldsymbol{I}_3$

A trajetória de referência é helicoidal (inspeção riser):

$$
\begin{aligned}
x_d &= R\sin(w_r t) \\
y_d &= -R\cos(w_r t) \\
z_d &= v_r t \\
\mathbf{q}_d &= [\cos(w_r t/2), 0, 0, \sin(w_r t/2)]^\top
\end{aligned}
$$



onde foram escolhidos $R = 3m$, $w_r = 1/2rad/s$ e $v_r = 0.1m/s$.

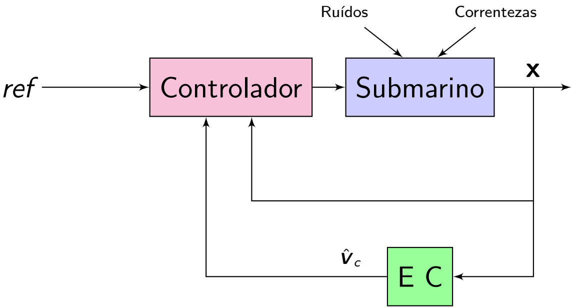
Resultados

Caso 1: Realimentação de estados (com adição de ruído)

1. desempenho do estimador de correntes
2. controlador com estimação de correntes

Caso 2: Realimentação de Saída

1. desempenho do EKF
2. controle + EKF
3. sistema completo



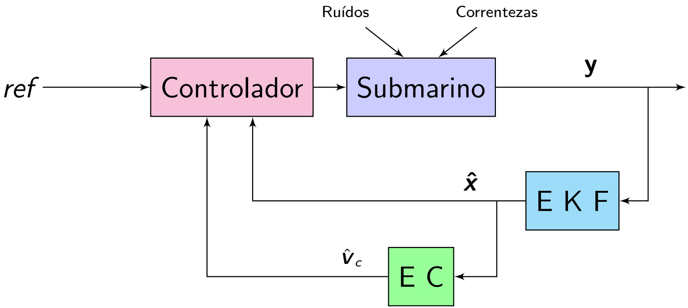
Resultados

Caso 1: Realimentação de estados (com adição de ruído)

1. desempenho do estimador de correntes
2. controlador com estimação de correntes

Caso 2: Realimentação de Saída

1. desempenho do EKF
2. controle + EKF
3. sistema completo



Resultados

Caso 1: Realimentação de estados (com adição de ruído)

1. desempenho do estimador de correntes
2. controlador com estimação de correntes

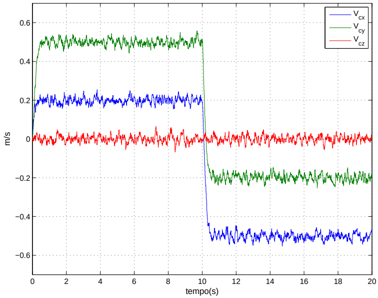
Caso 2: Realimentação de Saída

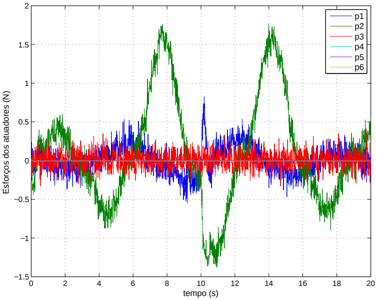
1. desempenho do EKF
2. controle + EKF
3. sistema completo

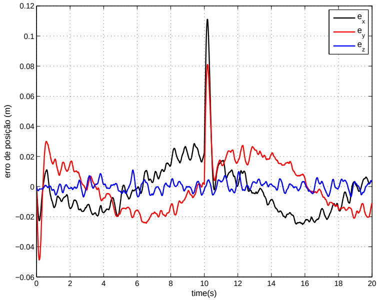
Correnteza com variação abrupta: testar convergência do filtro de correntes

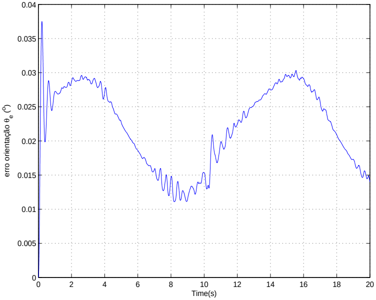
$$V_{cx} = 0.2(t \leq 10) - 0.5(t > 10)$$
$$V_{cy} = 0.5(t \leq 10) - 0.2(t > 10)$$
$$V_{cz} = 0$$

Resultados: caso 1

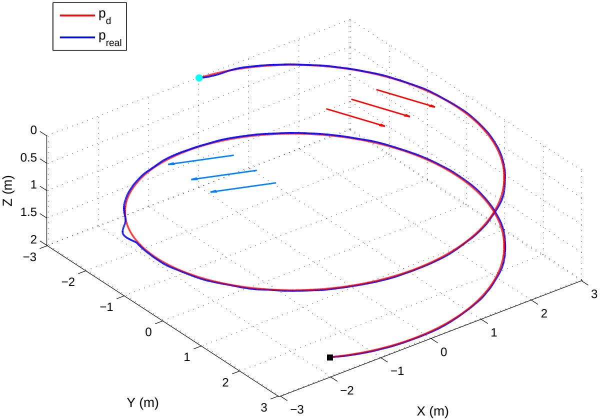




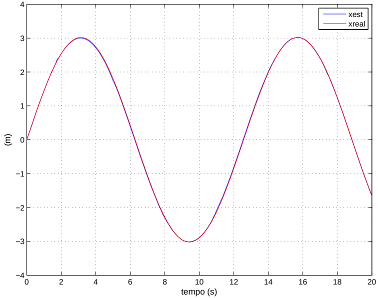


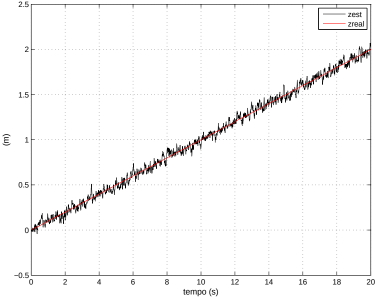


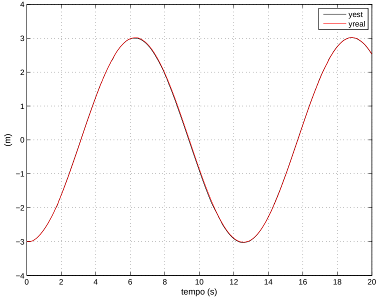
Resultados: caso 1

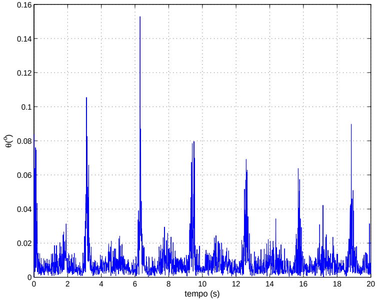


Resultados: caso 2

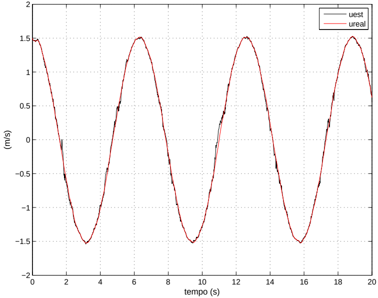


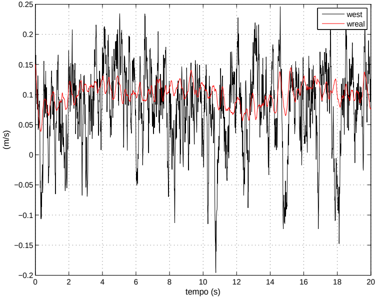


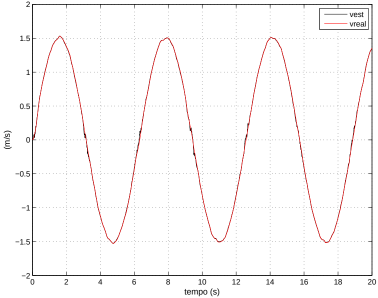




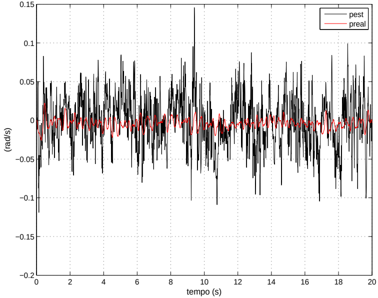
Resultados: caso 2

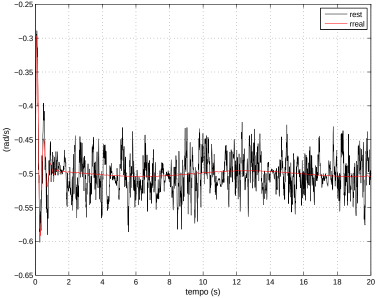


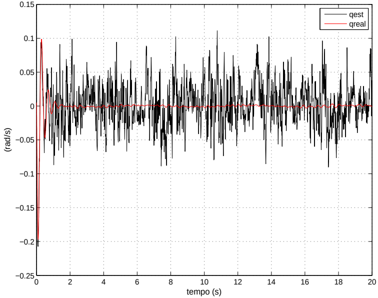




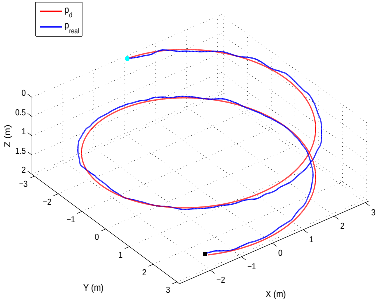
Resultados: caso 2

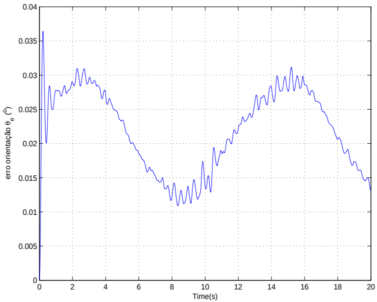


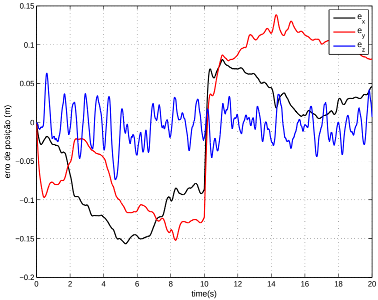


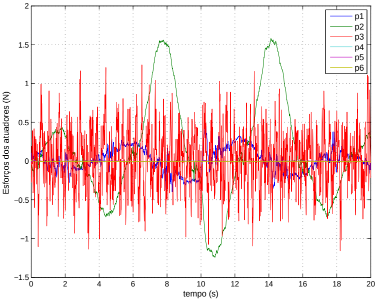


Resultados: caso 2

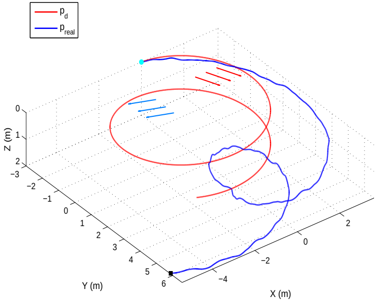


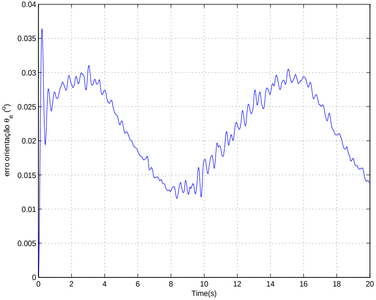


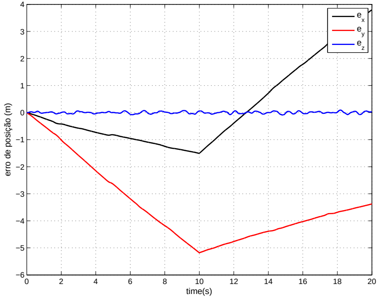


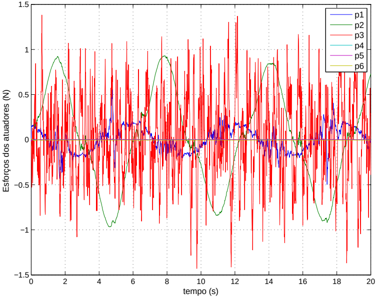


Resultados: caso 2









Conclusões

- Os algoritmos propostos foram implementados e testados em simulação.
- Proposta deste trabalho: desenvolver os algoritmos de controle e filtragem para o AUV para o problema de controle de trajetória.
- A implementação modular auxilia no entendimento do problema
- Estudo e implementação do modelo utilizando quaternions
- O uso do modelo dinâmico de translação foi proposto no EKF
- Como resultado do modelo, a associação EKF + EC deve incluir sonar (info posição)

Trabalhos futuros

- Incluir efeitos de superfície e de ruídos no modelo (ondas, não gaussiano)
- Implementar novas técnicas de integração de quaternions
- Aplicar Técnicas de controle robusto, para os filtros e controlador
- Integrar o estimador de correntes ao filtro de estimação de estados
- Considerar o problema de controle de trajetórias do AUV com subatuação

Fim

Obrigado!