

EXPERIMENTOS DE RASTREAMENTO DE TRAJETÓRIA DE UMA EMBARCAÇÃO DE SUPERFÍCIE UTILIZANDO LINEARIZAÇÃO POR REALIMENTAÇÃO E CONTROLE A ESTRUTURA VARIÁVEL

RAFAEL VIDA DE CASTRO ROSARIO*, JOSÉ PAULO VILELA SOARES DA CUNHA*

*Departamento de Eletrônica e Telecomunicações — Faculdade de Engenharia
Universidade do Estado do Rio de Janeiro — Rua São Francisco Xavier 524, sala 5001E — 20550-900

Emails: rafaeldvida@gmail.com, jpaulo@ieee.org

Abstract— Trajectory tracking experiments carried out with a small ship are presented. Feedback linearization was chosen to transform the nonlinear ship dynamics into a linear system. Variable structure control was adopted due to its robustness to parametric uncertainties and disturbances. The dynamic model of the ship is also presented to allow the design of the control system. The position and orientation of the ship are measured by an accurate image capture system Vicon MX.

Keywords— Surface vessel, Trajectory tracking, Variable structure control, Feedback linearization.

Resumo— Neste artigo são apresentados experimentos de rastreamento de trajetória realizados por uma pequena embarcação de superfície. A linearização por realimentação foi escolhida para transformar a dinâmica não-linear da embarcação em um sistema linear. O controle a estrutura variável foi adotado por ser insensível a incertezas paramétricas e perturbações. A modelagem da dinâmica do barco é desenvolvida para projetar o sistema de controle. A posição e a orientação do barco são medidas por um sistema de captura de imagens de precisão Vicon MX.

Palavras-chave— Embarcação de superfície, Rastreamento de trajetória, Controle a estrutura variável, Linearização por realimentação.

1 Introdução

O interesse em um sistema global de observação dos mares, rios e lagos têm estimulado um progresso considerável na área de embarcações de superfície não tripuladas (*unmanned surface vessels* — USVs). Como os sistemas de navegação e posicionamento global tornaram-se mais compactos, efetivos e acessíveis, os USVs se tornaram mais eficientes. Além disso, as redes sem fio de longo alcance também contribuíram para o crescimento das aplicações dos USVs (Manley, 2008). Algumas aplicações são a busca submarina e o mapeamento do solo marinho, que podem ser realizados com o auxílio de câmeras subaquáticas e sonares.

Tendo em vista as tarefas dos USVs, este artigo aborda o rastreamento de trajetórias. Para isto foram utilizados a linearização por realimentação e o controle a estrutura variável. A linearização por realimentação cancela as não-linearidades do sistema a fim de transformá-lo em um sistema linear, mais fácil de controlar. É muito utilizada em manipuladores robóticos, área que a denomina torque computado (Craig, 2013).

O controle a estrutura variável torna o sistema insensível a incertezas em parâmetros e rejeita completamente perturbações (Young et al., 1999; Cheng et al., 2007). Yang et al. (2014) e Liu et al. (2015) apresentaram o rastreamento de trajetórias para embarcações de superfície, porém apenas simulações foram realizadas. Poucos trabalhos apresentam resultados experimentais. Ashrafioun et al. (2008) realizaram experimentos com uma embarcação, porém com um sistema de visão

pouco preciso.

Aqui foram realizados experimentos com um pequeno barco numa piscina. Sua posição foi medida por um sistema visual muito preciso, adequado à realização de algoritmos de controle de alto desempenho. Este se mostrou vantajoso, já que o controle a estrutura variável teria pouca vantagem com sistemas de medição imprecisos.

2 Modelagem dinâmica de embarcações

Para o desenvolvimento do controle de embarcações é necessário analisar suas características dinâmicas. Para isto, são definidos os sistemas de coordenadas mostrados na Figura 1. O sistema estacionário é representado por $x_e O_e y_e$. O sistema de coordenadas móvel, fixo no barco, é representado por $x_b O_b y_b$. O ângulo de rumo é representado por ψ . Nessa figura, também são mostrados os propulsores P_1 , P_2 e P_3 . Os vetores R_{P_2} e R_{P_3} representam as posições dos propulsores P_2 e P_3 no sistema de coordenadas móvel.

2.1 Modelo para três graus de liberdade

A embarcação considerada se movimenta na superfície da água (eixos x_b e y_b) além de rotacionar em torno do eixo vertical z_b . Assume-se que seu balanço e movimento vertical são desprezíveis, assim o movimento se faz em três graus de liberdade. Neste caso, as equações dinâmicas genéricas de um veículo marinho podem ser representadas

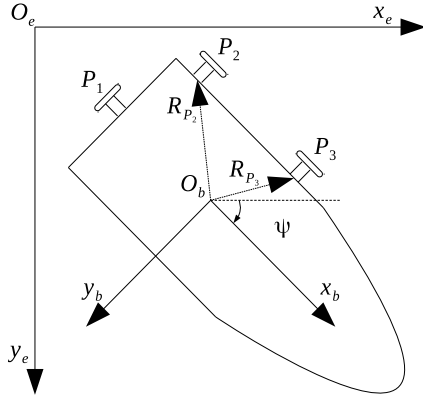


Figura 1: Vista superior da embarcação, disposição dos propulsores e os sistemas de coordenadas.

por (Fossen, 2002, Capítulo 2 e Seção 3.5.1):

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu = \tau + w, \quad (1)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)\nu, \quad (2)$$

nas quais:

M   a matriz de inércia e massas adicionais;

$C(\nu)$ é a matriz Coriolis-centrípeta;

$D(\nu)$ é a matriz de amortecimento;

$\nu := [u, v, r]^T$ é o vetor da velocidade generalizada representado no sistema de coordenadas móvel;

$\tau := [X, Y, N]^T$ é o vetor da força generalizada gerada pelos propulsores representado no sistema de coordenadas móvel;

$\eta := [x, y, \psi]^T$ é o vetor de posição generalizada, no qual x e y são as coordenadas da origem O_b representadas no sistema estacionário;

w é o vetor de perturbações ambientais (ventos, ondas e correntezas).

A Tabela 1 mostra a not    o naval para forças, momentos e velocidades (SNAME, 1950).

Tabela 1: Not    o para embarcações.

Descrição	Força	Velocidade
Translação no eixo x_b	X	u
Translação no eixo y_b	Y	v
Rotação em torno do eixo z_b	N	r

A matriz Jacobiana que transforma os vetores do sistema de coordenadas móvel para o sistema de coordenadas estacionário (vide (2))  

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Os parâmetros do barco são disponíveis em (Sokal et al., 2011).

2.2 Modelo dos propulsores

A força gerada por cada propulsor é dada por

$$F_{P_i} = \alpha_i^*(u_i)u_i|u_i|, \quad \alpha_i^*(u_i) = \begin{cases} \alpha_i^+, & \text{se } u_i \geq 0 \\ \alpha_i^-, & \text{se } u_i < 0 \end{cases}, \quad (4)$$

na qual α_i^+ e α_i^- são os coeficientes de empuxo das hélices nos sentidos direto e reverso, respectivamente, e u_i   o comando de velocidade de rotação do i -ésimo propulsor em p.u. (Cunha et al., 2000). A força generalizada dos propulsores é dada por

$$\tau = B\mathcal{F}_p. \quad (5)$$

Para a embarcação na Figura 1, a matriz de distribuição de controle  :

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & R_{P_{2x}} & R_{P_{3x}} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$\mathcal{F}_p = [F_{P_1}, F_{P_2}, F_{P_3}]^T$ é a força dos propulsores, $R_{P_{2x}}$ e $R_{P_{3x}}$ são as coordenadas dos propulsores P_2 e P_3 no eixo x_b , respectivamente.

3 Linearização por Realimentação

A ideia central é transformar algebricamente um sistema não-linear em um sistema linear, para então aplicar técnicas de controle de sistemas lineares (Slotine and Li, 1991, Capítulo 6).

3.1 Compensador não-linear dos propulsores

A característica quadrática dos propulsores poderia dificultar o projeto de controladores lineares para o barco. Além disso, a não-linearidade tornaria o comportamento de controladores lineares dependente das condições de operação. A opção adotada foi utilizar um compensador com a característica inversa (Domingues, 1989)

$$u_i = \text{sign}(\bar{u}_i)\sqrt{|\bar{u}_i|}, \quad (7)$$

na qual $\bar{u}_i$   o sinal de comando do i -ésimo propulsor na entrada do seu respectivo compensador.

Combinando as equações (4), (5) e (7), temos

$$\tau = B\alpha^*(\bar{u})\bar{u}, \quad \alpha^*(\bar{u}) := \text{diag}\{\alpha_i^*(\bar{u}_i)\}. \quad (8)$$

No entanto, os comandos gerados pelo algoritmo de controle são forças e momentos no sistema de coordenadas estacionário, não forças nos propulsores. Então,   necessário realizar o desacoplamento por meio da inversão da matriz de distribuição de controle

$$\bar{u} = [\alpha^*(\bar{u})]^{-1}B^{-1}\bar{\tau}, \quad (9)$$

que resultaria no sinal de controle ideal $\tau = \bar{\tau}$.

3.2 Desacoplamento no sistema de coordenadas estacionário

Para que o sinal de controle seja computado no sistema de coordenadas estacionário,   necessário desacoplar o modelo neste sistema. Derivando a equação (2), obt m-se (Fossen, 2002, Seção 7.3.2)

$$\dot{\nu} = J^{-1}(\eta) \left[\ddot{\eta} - \dot{J}(\eta)\nu \right]. \quad (10)$$

A lei de controle linearizante é

$$\tau = Ma^b + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu, \quad (11)$$

na qual a^b é o comando de aceleração no sistema de coordenadas do barco. Aplicando esta lei na equação (1), com $w = 0$, obt m-se

$$M(\dot{\nu} - a^b) = MJ^{-1}(\eta) \left[\ddot{\eta} - \dot{J}(\eta)\nu - J(\eta)a^b \right] = 0. \quad (12)$$

Escolhendo-se

$$a^e = \dot{J}(\eta)\nu + J(\eta)a^b, \quad (13)$$

na qual a^e   o comando de aceleração no sistema que coordenadas estacionário gerado por um controlador, obt m-se de (12)–(13) o sistema linear desacoplado

$$M^*(\ddot{\eta} - a^e) = 0, \quad (14)$$

no qual $M^* = J^{-T}(\eta)MJ^{-1}(\eta) > 0$. Da equação (13), tem-se (vide Figura 2):

$$a^b = J^{-1}(\eta) \left[a^e - \dot{J}(\eta)\nu \right]. \quad (15)$$

Esta realimentação utiliza os parâmetros nominais do barco. Idealmente, transforma sua dinâmica em três duplos integradores com ganhos unitários, um para cada grau de liberdade. Os termos resultantes das aproximações, incertezas e perturbações ambientais podem ser incluídos como perturbação de entrada d . Esta linearização reduz a equação dinâmica do barco a

$$\ddot{\eta} = a^e + d. \quad (16)$$

4 Estratégias de Controle

4.1 Controle proporcional-derivativo (PD)

A lei de controle PD utilizada é dada por

$$a^e(t) = K_p e(t) + K_d \dot{e}(t), \quad (17)$$

na qual $K_p = K_p^T > 0$ é a matriz de ganho proporcional, $K_d = K_d^T > 0$ é a matriz de ganho derivativo,

$$e(t) := \eta_{ref}(t) - \eta(t) \quad (18)$$

É o sinal de erro, $\eta_{ref} := [x_{ref}, y_{ref}, \psi_{ref}]^T$ é a posição generalizada de referência que define a trajetória a ser seguida.

Para reduzir o erro de rastreamento, pode-se inserir a aceleração da trajetória $\ddot{\eta}_{ref}$ na lei de controle (17), que resulta em

$$a^e(t) = K_p e(t) + K_d \dot{e}(t) + \ddot{\eta}_{ref}(t). \quad (19)$$

4.2 Controle a estrutura variável

Uma alternativa para aumentar a robustez do sistema é utilizar a lei de controle a estrutura variável dada por (Cheng et al., 2007)

$$a^e = \rho \text{sign}(\sigma), \quad (20)$$

$$\sigma = \dot{e}(t) + \Lambda e(t), \quad (21)$$

nas quais $\rho = \text{diag}\{\rho_i\}$, $\rho_i > 0$, $i = 1, 2, 3$, e $\Lambda = \Lambda^T > 0$ são parâmetros de projeto. Finalmente, a lei de controle total, que combina o controle a estrutura variável (20) com o PD (19), resulta em

$$a^e = K_p e(t) + K_d \dot{e}(t) + \rho \text{sign}(\sigma) + \ddot{\eta}_{ref}(t). \quad (22)$$

5 Análise de Estabilidade

Para analisar a estabilidade do sistema com a lei de controle (22), deriva-se duas vezes a equação (18), obtendo-se

$$\ddot{e} = \ddot{\eta}_{ref} - \ddot{\eta}. \quad (23)$$

Combinando as equações (16), (21), (22) e (23), com $K_p = \Lambda$ e $K_d = \Lambda + I$, obt m-se

$$\ddot{e} = -K_p \dot{e} - \sigma - \rho \text{sign}(\sigma) - d, \quad (24)$$

que substituída na derivada da eq. (21), resulta

$$\dot{\sigma} = -\sigma - \rho \text{sign}(\sigma) - d. \quad (25)$$

Utiliza-se a função de Lyapunov $V = \frac{1}{2}\sigma^T\sigma$, cuja derivada é

$$\dot{V} = \sigma^T \dot{\sigma} = -\sigma^T \sigma - |\sigma^T| \rho - \sigma^T d, \quad (26)$$

obtida a partir de (25). Se $\rho_i(t) \geq |d_i(t)|$, $\forall t \geq 0$, então

$$\dot{V} \leq -\sigma^T \sigma < 0, \quad (\sigma \neq 0), \quad (27)$$

logo, o estado atinge a superfície de deslizamento $\sigma = 0$ ao menos assintoticamente ou em tempo finito. A equação (21) pode ser reescrita na forma

$$\dot{e}(t) = -\Lambda e(t) + \sigma(t). \quad (28)$$

Como $\sigma(t) \rightarrow 0$ e a matriz $-\Lambda$   Hurwitz, então o erro $e(t)$ converge assintoticamente para a origem. Já que V é radialmente ilimitada, pode-se concluir que este sistema de controle é globalmente assintoticamente estável.

6 Sistema Experimental

O barco utilizado para os experimentos é mostrado na Figura 3. Ele se move com velocidade máxima de 0,26 m/s avante e possui 0,48 m de comprimento.

Para a medição da posição do barco foi utilizado um sistema Vicon MX, dotado de quatro câmeras de alta velocidade e uma unidade de processamento (Figura 4). A unidade de processamento

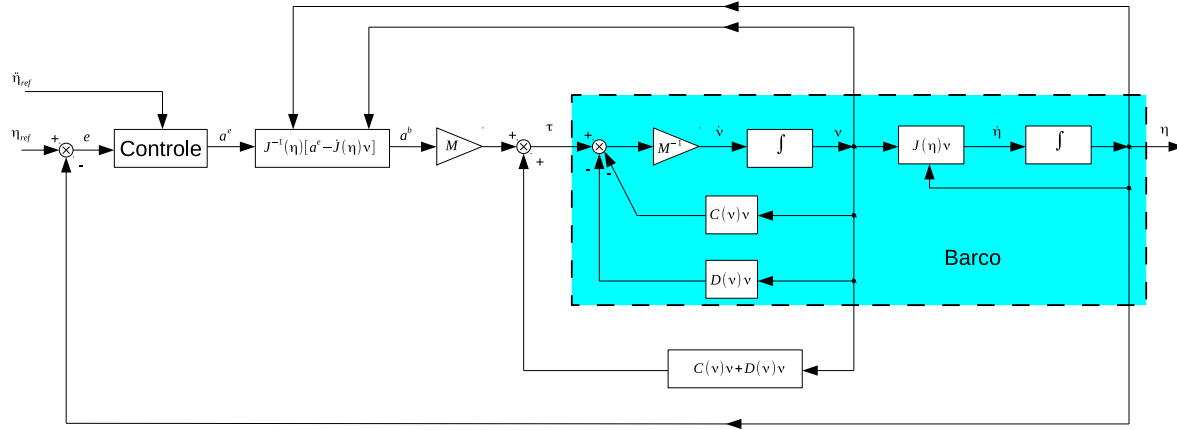


Figura 2: Sistema de controle com desacoplamento no sistema de coordenadas estacionário. Para simplificar o diagrama, as perturbações, os propulsores e sua linearização não são mostrados.

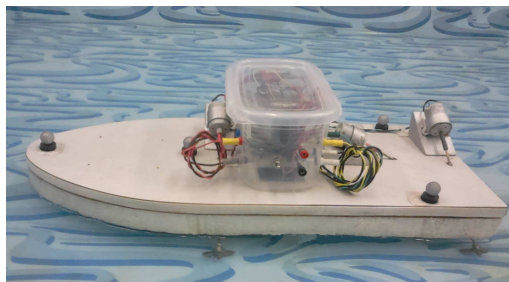


Figura 3: Barco utilizado nos experimentos.

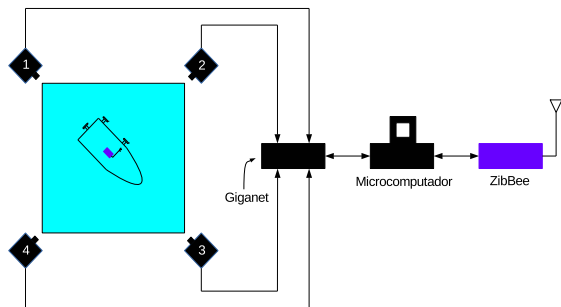


Figura 4: Sistema experimental.

é ligada a um computador por uma rede Gigabit Ethernet. No mesmo, o *software* Vicon Tracker processa as imagens. As câmeras possuem LEDs que geram luz praticamente infravermelha, que refletem nos marcadores esféricos (*tags*) fixados nos objetos de interesse (Gomes et al., 2014). A unidade de processamento Giganet é responsável pela sincronização das câmeras e transmissão dos dados para o computador (Gomes et al., 2014). O Vicon Tracker cria um ambiente 3D onde é possível manipular os dados de cada objeto, obter gráficos de posição, orientação, velocidade, etc. O sistema Vicon MX permite medir a posição de objetos com frequência de amostragem de até 1 kHz e precisão de cerca de 1 mm num espaço de trabalho

bastante amplo (Vicon, 2006). A Vicon também fornece um *kit* de desenvolvimento de *software* que permite utilizar as medições no MATLAB. O Tracker fornece ao MATLAB posição, orientação (ângulos de Euler) e número do quadro (*frame*), que serve para sincronizar precisamente a execução dos algoritmos de controle em tempo real.

Para a integração entre o microcomputador que realiza o controle e o barco, foi utilizado um microcontrolador Arduino e módulos ZigBee (Figuras 4 e 5). O ZigBee é uma plataforma de baixo custo e baixo consumo de potência para comunicação bidirecional sem fio (ZigBee, 2006). O MATLAB recebe a posição e a orientação do barco medidas pelo sistema Vicon, então calcula o sinal de controle. Este sinal é enviado por um módulo ZigBee conectado numa interface USB do microcomputador. Outro módulo ZigBee instalado na embarcação recebe o sinal e o envia ao Arduino. Este o processa para comandar pontes-H que acionam os motores do barco (Figura 5).

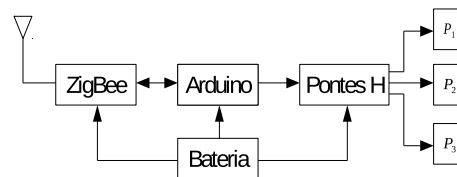


Figura 5: Eletrônica embarcada.

Embora as câmeras do sistema Vicon possam operar numa frequência de até 1 kHz, a frequência de amostragem foi limitada a apenas 30 Hz, devido a limitações da comunicação sem fio ZigBee.

7 Resultados Experimentais

Nos experimentos, o barco deve simular uma varredura, que é uma trajetória em zigue-zague. Foi utilizada uma velocidade de 0,1 m/s da embarcação, para evitar a saturação dos propulsores.

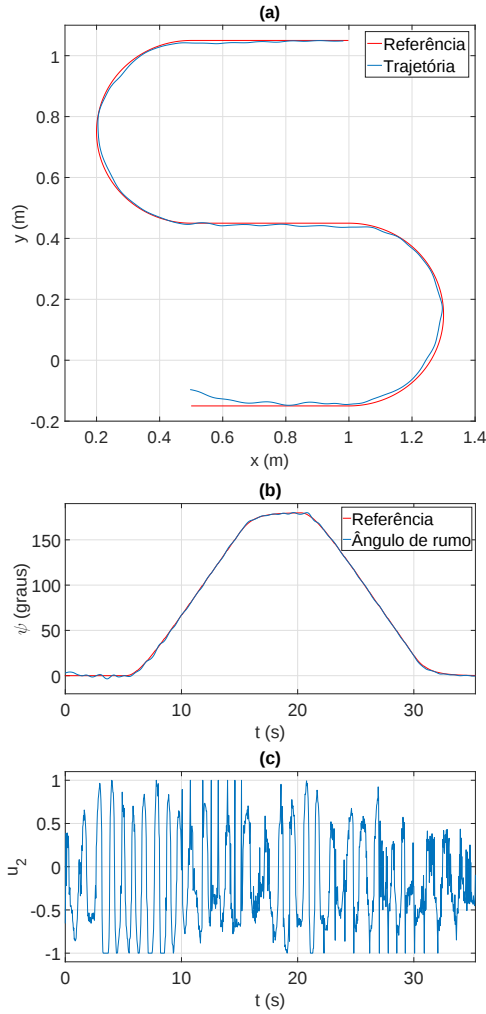


Figura 6: Experimento com controle PD.

Numa trajetória ideal que possua retas interpoladas com curvas, no momento em que o barco entra numa curva haveria um salto na velocidade angular $\dot{\psi}_{ref}$ para manter a orientação do barco tangencial à trajetória. Isso produziria impulsos na aceleração angular de referência, no sinal de controle e, consequentemente, deslocamentos indesejados na trajetória. Para superar este inconveniente, a referência de rumo foi suavizada por um filtro passa-baixas de primeira ordem.

As velocidades e a derivada do erro foram estimadas pela da aproximação *backward difference* (Åström and Wittenmark, 1997, Seção 8.2):

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e[k] - e[k-1]}{h}, \quad (29)$$

na qual $k \in \mathbb{Z}$ é o tempo discreto e $h = 1/30$ s é o período de amostragem.

Foram comparados experimentalmente os desempenhos das seguintes estratégias de controle: (i) PD, (ii) PD com controle a estrutura variável e (iii) PD com controle a estrutura variável e aceleração da trajetória.

Os ganhos do controlador PD, $K_p = 12I$ e $K_d = \text{diag}\{6; 18; 6\}$, foram ajustados experimen-

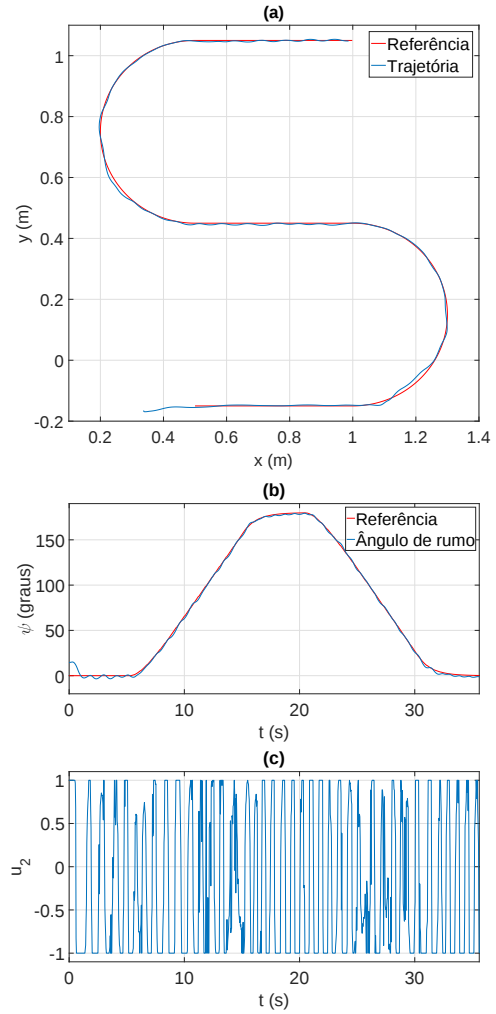


Figura 7: Experimento com controle PD, estrutura variável e aceleração da trajetória.

talmente de forma sucessiva até obter o melhor desempenho. A Figura 6.a apresenta a trajetória e a Figura 6.b o ângulo de rumo da embarcação.

Para melhorar o desempenho, aplicam-se todas as estratégias de controle simultaneamente (controle (iii)), porém com o ganho ρ da estrutura variável pequeno. Foram utilizados $\rho = 0,3I$ e $\Lambda = K_p K_d^{-1}$. A Figura 7.a apresenta a trajetória e a Figura 7.b o ângulo de rumo da embarcação com esta estratégia de controle.

Comparando-se os sinais de controle de um dos propulsores (P_2), percebe-se que o sinal de controle a estrutura variável (Figura 7.c) resulta um pouco mais oscilatório que o sinal de controle PD (Figura 6.c).

A Tabela 2 exibe os valores de erro RMS, médio absoluto e de pico absoluto de x , y e ψ para cada estratégia de controle testada. Os resultados experimentais indicam que cada estratégia de controle adicional melhorou o rastreamento de trajetória, porém piorou a precisão do ângulo de rumo.

Tabela 2: Erros RMS, médio absoluto e máximo pico absoluto para cada estratégia de controle.

Estratégia	Erro	x (mm)	y (mm)	ψ (graus)
PD	RMS	19,12	10,95	0,873
	Médio absoluto	16,63	9,44	0,658
	Pico absoluto	39,14	27,39	3,25
PD e estrutura variável	RMS	7,25	5,87	1,23
	Médio absoluto	5,03	4,92	1,01
	Pico absoluto	23,52	12,52	3,38
PD, estrutura variável e aceleração da trajetória	RMS	8,71	5,27	1,39
	Médio absoluto	5,54	3,84	1,16
	Pico absoluto	39,16	19	3,22

8 Conclusões

Neste artigo foram obtidos resultados experimentais de rastreamento de trajetória de uma embarcação usando linearização por realimentação e controle a estrutura variável. A linearização por realimentação foi capaz de transformar a dinâmica da embarcação em três duplos integradores e, assim, facilitar o projeto do controlador. O controle a estrutura variável foi escolhido pela sua robustez a incertezas e perturbações. Nos experimentos, observou-se que a linearização por realimentação e o controle PD são suficientes para que a trajetória seja rastreada com erros pequenos. A inclusão do controle a estrutura variável ajudou a lidar com as imperfeições na modelagem e identificação de parâmetros do barco, para reduzir o erro de rastreamento da trajetória.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela CAPES, CNPq e FAPERJ.

Referências

- Ashrafiun, H., Muske, K. R., McNinch, L. C. and Soltan, R. A. (2008). Sliding-mode tracking control of surface vessels, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **55**(11): 4004–4012.
- Åström, K. J. and Wittenmark, B. (1997). *Computer Controlled Systems: Theory and Design*, 3 edn, Prentice Hall.
- Cheng, J., Yi, J. and Zao, D. (2007). Design of a sliding mode controller for trajectory tracking problem of marine vessels, *IET Control Theory Appl.* **1**(1): 233–237.
- Craig, J. J. (2013). *Robótica*, 3 edn, Pearson, São Paulo.
- Cunha, J. P. V. S., Hsu, L., Lizarralde, F. and Costa, R. R. (2000). Avaliação experimental da modelagem e simulação dinâmica de um veículo submarino de operação remota, *Revista Controle e Automação* **11**(2): 82–93.
- Domingues, R. B. (1989). *Simulação e controle de um veículo submarino de operação re-*

mota, Master's thesis, Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

- Fossen, T. I. (2002). *Marine Control Systems: Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*, Marine Cybernetics, Trondheim, Norway.
- Gomes, L. L., Leal, L., Oliveira, T. R. and Cunha, J. P. V. S. (2014). Controle de um veículo quadrrorotor usando um sistema de captura de movimentos, *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática*, Belo Horizonte – MG, pp. 1474–1481.
- Liu, C., Zou, Z. and Yin, J. (2015). Trajectory tracking of underactuated surface vessels based on neural network and hierarchical sliding mode, *Journal of Marine Science and Technology* **20**(2): 322–330.
- Manley, J. E. (2008). Unmanned surface vehicles, 15 years of development, *Proc. OCEANS*, Quebec City – QC, pp. 1–4.
- Slotine, J.-J. E. and Li, W. (1991). *Applied Non-linear Control*, Prentice-Hall, New Jersey.
- SNAME (1950). Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid, *Technical and Research Bulletin* (1-5).
- Sokal, G. J., Cunha, J. P. V. S. and Coelho, P. H. G. (2011). Experimentos de posicionamento dinâmico utilizando controle a estrutura variável e servovisão, *Anais do X Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, São João Del Rei – MG, pp. 1161–1166.
- Vicon (2006). *System Reference*, 1.4 edn.
- Yang, Y., Du, J., Liu, H., Guo, C. and Abraham, A. (2014). A trajectory tracking robust controller of surface vessels with disturbance uncertainties, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **22**(4): 1511–1518.
- Young, K. D., Utkin, V. I. and Özgüner, U. (1999). A control engineer's guide to sliding mode control, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **7**(3): 328–342.
- ZigBee (2006). *Zigbee specification: Zigbee document 053474r13*.