

Controle de uma Embarcação de Superfície Não Tripulada para o Seguimento de um Alvo

Victor Elias de Sousa da Silva, Flavio Marcell Moreira Lemos,
José Paulo Vilela Soares da Cunha e Téo Cerqueira Revoredo

*Departamento de Eletrônica e Telecomunicações, Faculdade de Engenharia,
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil (e-mails: victor_elias_silva@hotmail.com,
flamarcell.fisica@gmail.com, jpaulo@ieee.org, teorevoredodo@uerj.br).*

Abstract: Unmanned surface vehicles (USVs) have many applications such as cargo transportation, in which the capability of a vessel to follow another moving one is useful for optimization and cooperative transportation purposes. This work presents the development of a control system for an USV to track a target. The control system is evaluated experimentally in a small vessel using a motion capture system based on cameras to measure the target and vessel positions. The good performance obtained indicates that this control system will be a starting point for the development of cooperative fleet control strategies.

Resumo: Embarcações não tripuladas têm inúmeras aplicações dentre as quais o transporte de cargas, no qual a capacidade de uma embarcação seguir outra em movimento é interessante com vistas à otimização e ao transporte cooperativo. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de controle para que uma embarcação não tripulada siga um alvo. O sistema de controle desenvolvido é avaliado experimentalmente em uma embarcação pequena utilizando-se um sistema baseado em câmeras para medir as posições do alvo e da embarcação. O bom desempenho obtido indica que esse sistema de controle servirá como ponto de partida para o desenvolvimento de estratégias para o controle de frotas.

Keywords: Unmanned surface vehicle; USV; Target tracking; Motion capture system; PD control.

Palavras-chaves: Embarcação não tripulada; USV; Rastreamento de alvo, Sistema de captura de movimentos; Controle PD.

1. INTRODUÇÃO

O planejamento e o seguimento de trajetórias são conceitos importantes em inúmeras aplicações da engenharia de controle e robótica. Como exemplos podem-se citar sistemas de manufatura que regulam a movimentação de peças e materiais através de uma planta industrial (Kahraman et al., 2008; Widyotriatmo et al., 2013), a movimentação de aeronaves em procedimentos de pouso e decolagem (Revoredo et al., 2013), a movimentação de braços robóticos para a realização de tarefas em indústrias (Lombai et al., 2008) ou na realização de cirurgias remotas em pacientes humanos (Zhai et al., 2008; Hong et al., 2012), a movimentação autônoma de veículos em vias urbanas (Vilca et al., 2016) e robôs móveis em áreas fabris ou até mesmo em outros planetas. O planejamento de trajetórias para robôs móveis pode ser entendido como a definição de um caminho a ser desempenhado por um robô atrelado a uma função temporal, determinado a partir de requisitos tais como pontos de partida e destino, pontos de passagem, desvio de obstáculos, restrições dinâmicas e cinemáticas, etc. Outro conceito importante é o seguimento ou rastreamento de trajetória, que diz respeito ao projeto de leis de controle que forcem um veículo a alcançar e seguir uma trajetória especificada.

Nesse contexto, as embarcações não-tripuladas (USV, do inglês *unmanned surface vehicle*) têm atraído atenção crescente de pesquisadores devido às suas inúmeras aplicações, tais como operações militares de reconhecimento, segurança territorial, pesquisas em águas rasas, monitoramento ambiental e coordenação operacional com veículos autônomos subaquáticos (AUV, do inglês *autonomous underwater vehicle*) (Liu et al., 2017; Larrazabal et al., 2016).

Uma aplicação em particular destes tipos de veículo é o transporte de carga, no qual a possibilidade de vários veículos seguirem uma mesma trajetória, controlando a distância entre si é interessante e útil, por exemplo, para otimizar o transporte.

O rastreamento de trajetórias para USVs, entretanto, não é um problema simples, especialmente com veículos subatuados (Chwa, 2011; Huang et al., 2015), além das não-linearidades da sua dinâmica (Shoiaei, 2015), das incertezas (Guo et al., 2009) e da susceptibilidade ao vento, correntes marítimas e ondas (Bu et al., 2007; Temel et al., 2015).

Outro ponto a salientar é que o problema de posicionamento dinâmico é um tema complexo, com grande importância prática e que vem gerando vários estudos e a criação de

ambientes experimentais como é descrito por Lago et al. (2005) e Morishita et al. (2009).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de algoritmos de controle para que uma embarcação não tripulada siga um objeto de referência cuja posição é medida por um sistema externo. Para a avaliação experimental da proposta, um sistema com câmeras foi utilizado para medir a posição do alvo e do USV, tal como exposto por Lemos et al. (2019).

O trabalho é organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta um modelo da dinâmica da embarcação não tripulada; a Seção 3 descreve os algoritmos de controle propostos; a Seção 4 discorre sobre o sistema utilizado para a realização dos experimentos; a Seção 5 apresenta resultados experimentais e na Seção 6 são feitas considerações finais.

2. MODELO DA DINÂMICA DO VEÍCULO

Para os desenvolvimentos propostos neste trabalho, considera-se que o veículo possui três graus de liberdade, a saber: translações no plano horizontal, ao longo dos eixos X e Y , e rotação, caracterizada pela mudança de rumo Ψ (Rosario, 2017, p. 38). Os sistemas de coordenadas adotados são apresentados na Figura 1, na qual O denota a origem do sistema de coordenadas estacionário, enquanto X e Y são os eixos que definem o plano horizontal do mesmo e, de maneira semelhante, O' é a origem do sistema de coordenadas móvel, X' e Y' são os eixos do mesmo plano horizontal. O balanço da embarcação é desprezado e, assim, os eixos Z e Z' são paralelos. O rumo da embarcação é o ângulo entre os eixos X e X' .

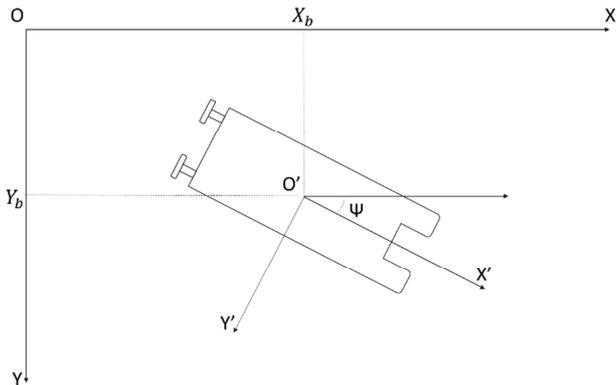


Fig. 1 Sistemas de coordenadas para a embarcação.

A modelagem da dinâmica da embarcação é subdividida em dois problemas, a saber: posicionamento e rumo. Para a determinação de ambos, as dimensões externas e a distância entre os propulsores do veículo são necessárias. Estes parâmetros são apresentados na Figura 2 e os seus valores para o veículo utilizado nos experimentos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Dimensões da embarcação utilizada.

Símbolo	Descrição	Dimensão
C	Comprimento	375 mm
L	Boca	125 mm
d_p	Distância entre os propulsores	70 mm

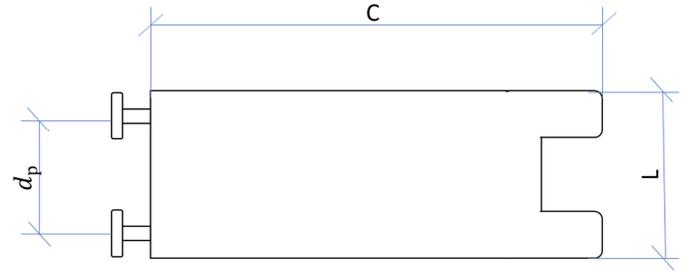


Fig. 2 Dimensões da embarcação.

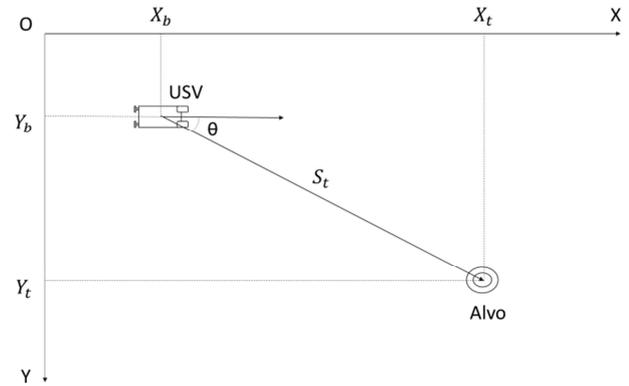


Fig. 3 Posições da embarcação e do alvo.

Com base na posição relativa do alvo, conforme a Figura 3, o movimento da embarcação é descrito a partir da sua distância (S_t) e orientação (θ), dadas por:

$$S_t = \sqrt{(X_t - X_b)^2 + (Y_t - Y_b)^2} \quad (1)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{Y_t - Y_b}{X_t - X_b} \right) \quad (2)$$

nas quais X_b e Y_b e X_t e Y_t são, respectivamente, as coordenadas da embarcação e do alvo no sistema de coordenadas estacionário.

As forças axiais geradas pelos propulsores, F_1 e F_2 na Figura 4, são as responsáveis tanto pela translação quanto pela rotação da embarcação, conforme as equações:

$$F = F_1 + F_2 = \ddot{S}_t m \quad (3)$$

$$M = (F_1 - F_2) d_p = \ddot{\theta} J \rightarrow F_1 - F_2 = \frac{\ddot{\theta} J}{d_p} \quad (4)$$



Fig. 4 Forças geradas pelos propulsores.

Nas equações (3) e (4), F denota a força resultante longitudinal, M o momento angular de propulsão, m é a massa equivalente da embarcação na água e J o seu momento de inércia em torno do eixo vertical. Os coeficientes m e J incorporam as massas adicionais que representam efeitos inerciais do deslocamento da embarcação na água para baixa frequência (Fossen, 2002). Os efeitos de ondas e arraste são desprezados, o que é válido em baixas velocidades e água parada. Por meio da manipulação dessas equações, é possível explicitar as seguintes expressões para as forças de cada propulsor:

$$F_1 = \frac{(d_p \dot{S}_t m) + (J \ddot{\theta})}{2 d_p} \quad (5)$$

$$F_2 = \frac{(d_p \dot{S}_t m) - (J \ddot{\theta})}{2 d_p} \quad (6)$$

Outra abordagem para desenvolver estas equações, partiria da representação simplificada do modelo clássico para a dinâmica de embarcações, descrito por Fossen (2002, p. 9), que considera apenas três graus de liberdade:

$$M\dot{v} = \sum_{i=1}^n F_i \quad (7)$$

$$v = [\dot{X}', \dot{Y}', \dot{\Psi}]^T \quad (8)$$

nas quais M representa a matriz de inércia da embarcação, \dot{v} é um vetor de aceleração e F_i ($i=1, \dots, n$) são forças generalizadas que agem na embarcação, geradas pelos propulsores, pelo arraste, etc. Desse modo pode-se assumir uma matriz de inércia simplificada condizente com um corpo rígido tal como apresentado por Rosário (2017, p. 39), somada a matriz de massas adicionais, a qual é simétrica e positiva ao se considerar um fluido ideal, sem ondas nem correnteza. A matriz de inércia é dada por

$$M = \begin{bmatrix} m_b - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m_b - Y_{\dot{u}} & m_b x_g^b - Y_{\dot{r}} \\ 0 & m_b x_g^b - Y_{\dot{r}} & I_{zb} - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

na qual m_b é a massa da embarcação, x_g^b é a coordenada da posição do centro de gravidade no sistema de coordenadas móvel, I_{zb} é o momento de inércia em torno do eixo vertical Z' , os termos $X_{\dot{u}}$, $Y_{\dot{u}}$, $Y_{\dot{r}}$ e $N_{\dot{r}}$ são massas adicionais.

3. CONTROLE

O propósito do controle da embarcação é fazê-la seguir um alvo que, em termos práticos, pode representar outra embarcação ou algum outro tipo de veículo ou objeto cuja trajetória deve ser seguida. Para alcançar este objetivo, propõem-se controladores para regular a distância S_t e o ângulo de orientação θ da embarcação em função da posição do alvo.

A distância é calculada de acordo com a equação (1). Entretanto, sabendo-se que o rumo é calculado por meio da tangente, é adicionada uma constante no valor do erro de distância. Esta constante é a distância entre o centro da embarcação, onde está situada a sua referência de posição, e a proa, para evitar a singularidade que ocorreria no cálculo do rumo, quando o erro da distância fosse nulo. Desse modo, a embarcação não alcança o ponto desejado, porém o controlador de rumo aponta para o seu alvo. Na lei de controle de rumo, leva-se em consideração apenas o ângulo θ , calculado pela equação (2).

O controle é realizado por dois controladores do tipo proporcional-derivativo (PD), um para o rumo e outro para a distância da embarcação até o alvo. As ações de controle são decompostas para o acionamento dos dois motores de acordo com as equações a seguir:

$$U_1 = \frac{U_d}{k+1} + \frac{k U_{Psi}}{k+1} \quad (10)$$

$$U_2 = \frac{U_d}{k+1} - \frac{k U_{Psi}}{k+1} \quad (11)$$

nas quais U_1 e U_2 são os sinais de acionamento dos motores CC 1 e 2, respectivamente, U_d é o sinal de saída do controlador de distância, U_{Psi} é o sinal de saída do controlador de rumo e $k = 4$ é o peso da ação de controle de rumo com relação à ação de controle de distância, escolhido experimentalmente para se obter um desempenho satisfatório. Os valores dos ganhos proporcionais K_c e tempos derivativos T_d dos controladores são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros dos controladores da embarcação.

Controlador	Parâmetro	Valor
Rumo	K_{cr}	3,5
Rumo	T_{dr}	1,4 s
Distância	K_{cd}	2,0
Distância	T_{dd}	1,8 s

A Figura 5 apresenta o diagrama de blocos do sistema de controle da embarcação.

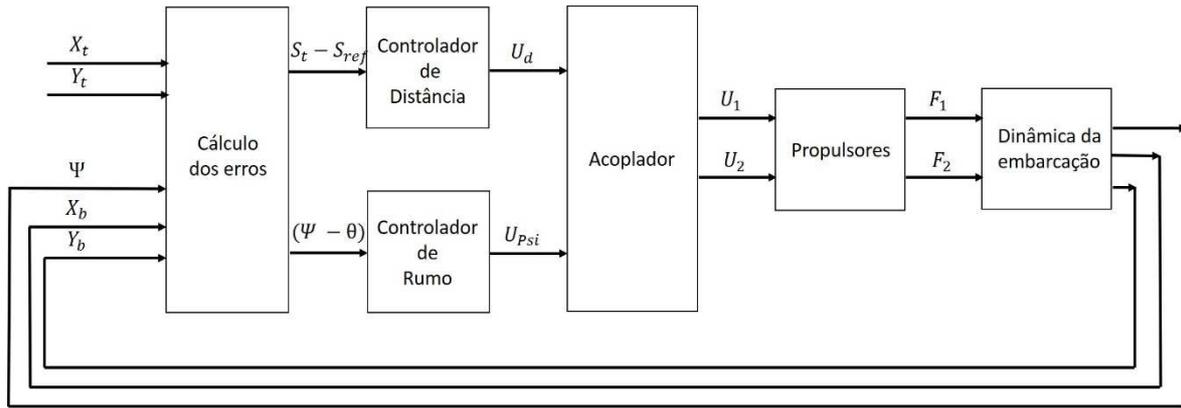


Fig. 5 Sistema de controle da embarcação.

Os sinais de erro, que são as entradas para os controladores de distância e rumo são obtidos como segue:

$$erro_d = S_t - S_{ref} \quad (12)$$

$$erro_\psi = \Psi - \theta \quad (13)$$

nas quais S_t é a distância entre a embarcação e o alvo, $S_{ref} = 45$ cm é a distância desejada, Ψ é o rumo atual da embarcação e θ o rumo desejado.

4. APARATO EXPERIMENTAL

Para a avaliação experimental do sistema de controle proposto, foi utilizado um sistema de aquisição de dados baseado em câmeras, conectado a um microcomputador que, por sua vez, envia as coordenadas das posições da embarcação e do alvo por meio de uma rede sem fio para a embarcação, conforme exemplificado na Figura 6.

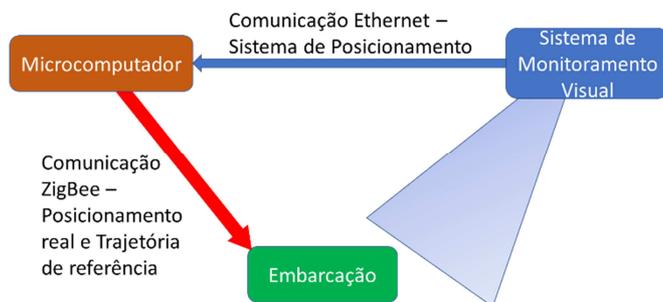


Fig. 6 Diagrama geral do sistema proposto.

O sistema utilizado para realizar a medição da posição do alvo e da embarcação é composto por três câmeras Vicon Vantage V5 de alta velocidade e resolução de 4 mega pixels e uma unidade de processamento, interligadas por cabos de rede de alta velocidade. A unidade de processamento é conectada a um microcomputador no qual configura-se o sistema de medição e criam-se os objetos a serem monitorados, neste caso o USV e o alvo.

Cada uma das câmeras utilizadas possui um sistema eletrônico embarcado que realiza parte do processamento de imagens, uma unidade estroboscópica com LEDs que geram luz infravermelha, uma lente e um filtro óptico. As câmeras geram pontos em tons de cinza a partir da imagem dos marcadores esféricos reflexivos fixados no objeto para o qual

deseja-se medir a posição. Em seguida, algoritmos são utilizados para calcular os centroides e determinar quais marcadores são válidos. Embora não tenha mobilidade, pois deve ser recalibrado sempre que é deslocado, o sistema Vicon é uma fonte confiável e precisa para projetos que demandem testes em ambientes controlados, pois gera dados a uma frequência de atualização de até 420 Hz com precisão melhor do que 1 mm, que são grandes vantagens quando comparadas a outros sistemas de posicionamento, tais como o GPS (*Global Positioning System*), que possuem uma taxa de atualização de poucas amostras por segundo, precisão de alguns metros e são inadequados para ambientes internos.

A unidade de processamento é responsável pela sincronização das câmeras e pela transmissão de dados, por rede Ethernet, para o microcomputador. O *software Vicon Tracker* instalado no mesmo cria um ambiente virtual 3D a partir dos dados obtidos pelas câmeras e pelas suas unidades de processamento, possibilitando a manipulação dos dados de cada marcador, a criação de um objeto composto por múltiplos marcadores, a obtenção de gráficos de velocidade, aceleração e rotações, dentre outras funcionalidades. O fabricante do sistema de câmeras fornece um *kit* de desenvolvimento de *software* (SDK) que possibilita o uso dos dados obtidos pelo sistema para programas de terceiros. Um *script* realizado no *software* de computação científica Matlab, de forma análoga ao apresentado por Rosário et al. (2016), processa as informações recebidas pelo sistema de aquisição de dados e os transmite para a embarcação. Neste trabalho, as medidas de posição da embarcação e do alvo, bem como os valores dos ganhos dos controladores são transmitidos por rede sem fio para a embarcação, na qual um microcontrolador utiliza estas informações para computar os sinais de controle para o acionamento dos motores CC da embarcação.

A transmissão de dados sem fio entre o microcomputador e a embarcação é realizada utilizando uma rede com protocolo *ZigBee*, escolhida por sua autonomia, flexibilidade e menor consumo de potência se comparada aos padrões *Wi-Fi* e *Ultra-wideband* (UWB) (Lee et al., 2007). A topologia de rede escolhida para o experimento é do tipo estrela devido ao número de dispositivos que serão conectados: a embarcação e o emissor de sinal conectado ao sistema de monitoramento.

Por ser o elemento que enviará os dados de posicionamento, o computador sincronizado com o sistema de câmeras é configurado como coordenador (ZC, elemento FFD) enquanto a embarcação é o dispositivo final (ZED, elemento RFD).

Um microcontrolador Arduino é embarcado no veículo para controlá-lo por meio do acionamento dos motores CC a partir das coordenadas de posições recebidas pela rede sem fio.

Na sobreposição das ações de controle de rumo e distância, definiu-se a primeira como prioritária, com o objetivo de evitar que houvesse movimentos extensos para direções equivocadas. Para isto, uma ação com intensidade quatro vezes maior foi especificada para o controlador de rumo se comparado à ação do controlador de distância. Ademais, para que a embarcação não comece a se deslocar no sentido oposto ao do alvo, foi definido um habilitador para o controle de distância, evitando, assim, que inicie o movimento de translação antes do rumo estar desalinhado em menos de 90° em relação ao alvo.

Um parâmetro adicional é necessário para compensar a zona morta dos propulsores, que é uma região existente na inversão dos motores por conta da tensão mínima necessária para o acionamento dos mesmos e fim de vencer o atrito seco nos eixos. A Figura 7 representa a zona morta dos propulsores, enquanto a Figura 8 apresenta a resposta dos compensadores implementados. Pode-se perceber ainda que a tensão enviada para os propulsores salta de -1 V até +1 V quando o sinal dos controladores passa da região negativa para a positiva, ou vice e versa.

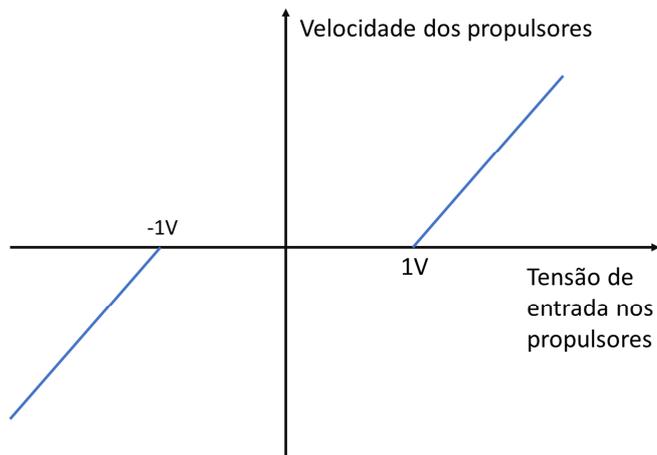


Fig. 7 Zona morta dos propulsores.

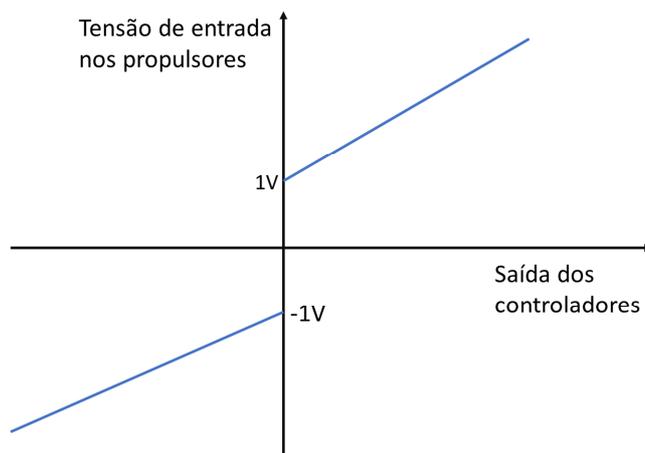


Fig. 8 Resposta dos compensadores da zona morta dos propulsores.

O sistema de controle foi testado na embarcação apresentada na Figura 9, movimentando-se em uma piscina apresentada na Figura 10.



Fig. 9 Embarcação utilizada nos experimentos.



Fig. 10 Ambiente de realização dos experimentos.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Três experimentos foram realizados. No primeiro, um alvo imóvel foi situado fora d'água e a posição inicial da embarcação foi direcionada para o mesmo. A distância até o alvo e o rumo da embarcação ao longo da trajetória desempenhada são apresentados na Figura 11.

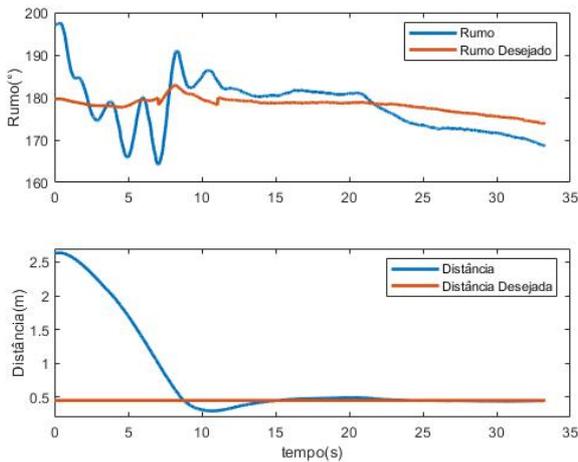


Fig. 11 Distância e ângulo de rumo no primeiro experimento.

Pode-se verificar que a embarcação leva menos de 10 s para atingir um rumo próximo ao desejado, o que condiz com o esperado, tendo em vista que o controlador associado é ajustado para ter a resposta rápida e com pouco sobrepasso. O erro residual no rumo, em torno de 5° , é causado pelas zonas mortas dos motores que não são compensadas perfeitamente. Neste experimento, o controlador de distância estava ativo desde o início do experimento, sendo isso um dos responsáveis para que o rumo tenha demorado um pouco mais para convergir. Observa-se que o controlador de distância atinge seu objetivo em cerca de 15 s após iniciar a sua atuação. Este também apresenta um pequeno sobrepasso, mas como foi definida uma distância de 45 cm entre o centro da embarcação e o centro do alvo como objetivo, este sobrepasso é aceitável uma vez que a embarcação não colide com o alvo.

A trajetória desempenhada pela embarcação ao longo do primeiro experimento é apresentada na Figura 12. Verifica-se que, após a aproximação da embarcação com o alvo, a primeira tenta manter sua posição imóvel em relação ao segundo, o que seria o comportamento ideal. A resposta real, entretanto, é apenas próxima da ideal, verificando-se a atuação do controlador levando a uma variação de posicionamento final da embarcação suave em torno do alvo.

No segundo experimento, foi também utilizado um alvo imóvel, porém desta vez pouco acima da lâmina d'água, com a embarcação posicionada para o lado oposto do mesmo. O rumo e a distância são apresentados na Figura 13, enquanto a trajetória da embarcação é apresentada na Figura 14.

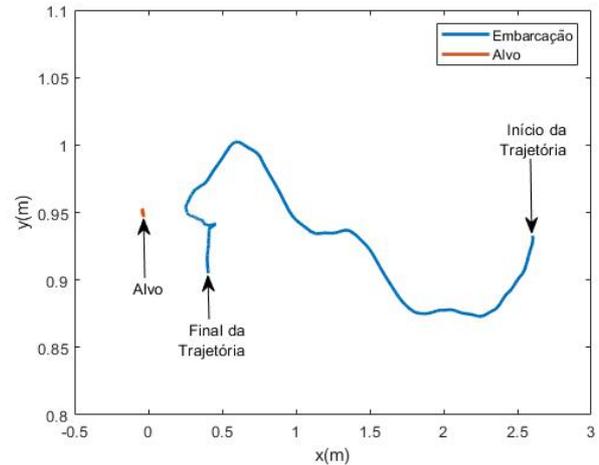


Fig. 12 Trajetória da embarcação no primeiro experimento.

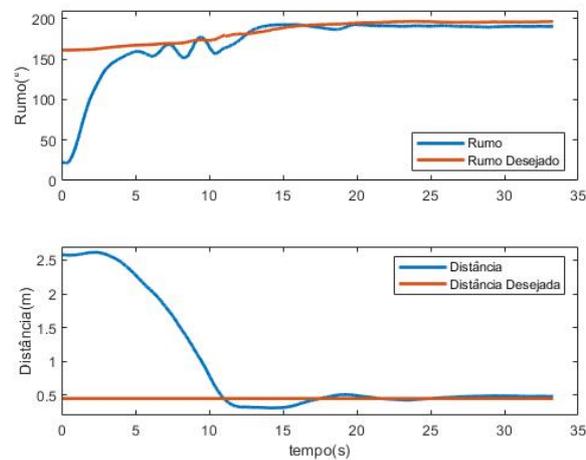


Fig. 13 Distância e ângulo de rumo no segundo experimento.

Pode-se verificar que em aproximadamente 15 s a embarcação já se encontrava com o rumo muito próximo do desejado, tal como no primeiro experimento. Também é possível verificar que o controlador de rumo diminui a velocidade quando a embarcação ultrapassa o ponto onde apenas o controlador de rumo está ativo, devido ao habilitador do controlador de distância discutido anteriormente. Outra observação importante é a existência de um pequeno erro de regime, da ordem de 5° . Com relação à distância observa-se muita similaridade com o primeiro experimento, com a diferença de que o veículo se afasta um pouco do alvo enquanto o controlador de distância está inicialmente inativo e, assim que o controlador de distância começa a sua atuação, a embarcação se aproxima rapidamente do alvo. Ademais, nota-se que a resposta desse controlador possui menor oscilação que aquela do controlador de rumo. Isto ocorre pois a ação do controlador PD do rumo é quatro vezes maior que a do controlador da distância, o que resulta numa resposta mais suave para a distância. O erro de regime apresentado também é pequeno, em torno de 3 cm, presumivelmente causado pela dinâmica do acionamento dos motores e as zonas mortas.

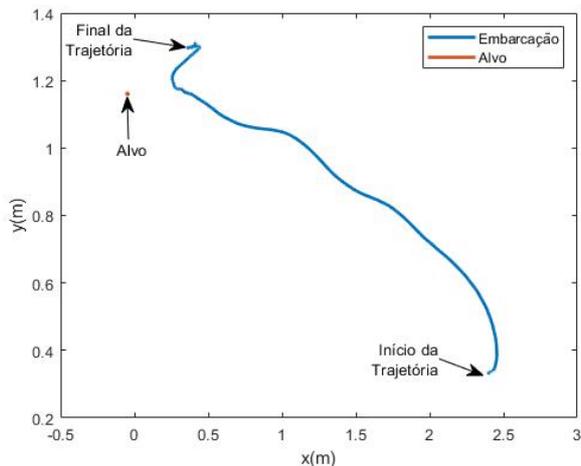


Fig. 14 Trajetória da embarcação no segundo experimento.

Na Figura 14 é possível verificar a aproximação da embarcação do alvo, bem como a atuação dos controladores mantendo-a apontada para o mesmo, como se esta apresentasse um âncora fixada na proa.

O terceiro experimento foi realizado com o objetivo de verificar o desempenho do controle proposto para o seguimento de um alvo em movimento. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 15 e 16.

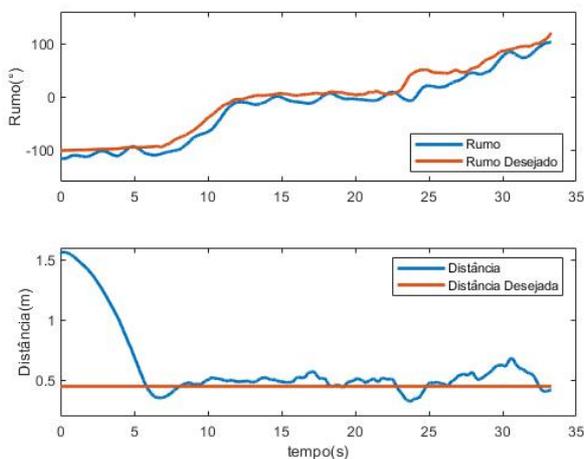


Fig. 15 Distância e ângulo de rumo no terceiro experimento.

Neste experimento, exige-se mais dos controladores, uma vez que o alvo se movimenta. No controlador de rumo, observa-se que, desde a aproximação inicial da embarcação ao alvo, este consegue fazer com que o veículo fique sempre apontando para o alvo com um atraso de poucos segundos.

Com relação ao controle de distância, é possível perceber que o movimento do alvo gera o aumento no erro de rastreamento, o que ocorre após a aproximação inicial da embarcação ao alvo, mas o controlador é capaz de manter esse erro pequeno, menor do que 5 cm, e, sobretudo, com sobrepasso entorno de cerca de 10 cm, o que evita o choque com o alvo.

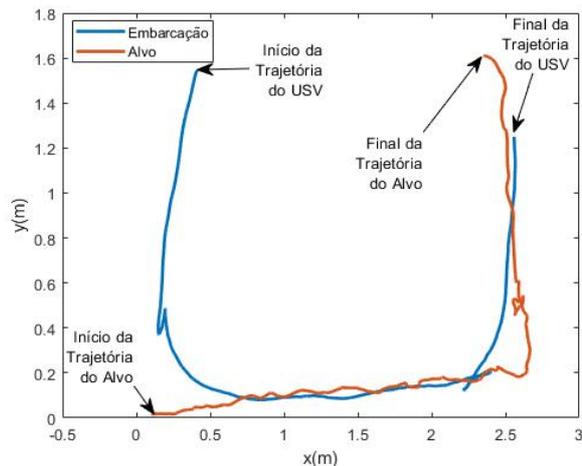


Fig. 16 Trajetória da embarcação no terceiro experimento.

Nota-se que, após a aproximação inicial, os controladores mantêm a embarcação com um percurso muito próximo da trajetória realizada pelo alvo. Adicionalmente, observa-se que o movimento do alvo é mais tortuoso que a resposta da embarcação, pois foi gerado manualmente. Por outro lado, o controlador de rumo aponta a embarcação para o alvo suavemente, não seguindo fielmente a trajetória do alvo.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a implementação de um algoritmo de controle para que uma embarcação não tripulada siga um alvo, o que possui diversas aplicações na automação de sistemas navais.

A validação do controle proposto foi baseada em experimentos realizados com uma pequena embarcação em um ambiente controlado. Para a medição da posição e orientação da embarcação, bem como a posição do alvo, foi utilizado um sistema de alta precisão baseado em câmeras. Os resultados obtidos indicam o bom desempenho do sistema de controle proposto.

Pretende-se continuar este trabalho em duas linhas: (i) o desenvolvimento de estratégias de controle que reduzam os erros de rastreamento, por exemplo, pela aplicação de controle a estrutura variável; (ii) o desenvolvimento de estratégias de controle de frotas de embarcações, tendo em vista a manutenção de formações e a execução de tarefas complexas, tais como monitoração ambiental de grandes regiões e o transporte cooperativo de cargas flutuantes.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Faperj e CNPq.

REFERÊNCIAS

- Bu, R., Liu, Z., Hu, J. (2007). Straight-path Tracking control of underactuated ships using dynamic nonlinear sliding. *J. Tsing Univ (Sci&Tech)*, 47(02), pp. 1880-1883.
- Chwa, D. (2011). Global tracking control of underactuated ships with input and velocity constraints using dynamic surface control method. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 19, pp. 1357-1370.
- Dong Z.P., Wan L., Liu T., et al. (2016). Horizontal-plane trajectory-tracking control of an unmanned maritime vehicle in the presence of ocean currents. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 13(83), 1-14.
- Encarnação, P., Pacoal, A., Arcak, M. (2000). Path following for autonomous marine craft. *Proc. of the 5th IFAC International Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*, August, Aalborg, Denmark, pp. 117-122.
- Fossen, T. I. (2002). *Marine Control Systems: Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*, Marine Cybernetics, Trondheim, Norway.
- Guo, C., Wang, Y., Sun, F.-C., Shen, Z.-P. (2009). Survey for motion control of underactuated surface vessels. *Control and Decision*, 24(03), pp. 321-329.
- Hong, M.B., Jo, YH. (2012) Prototype Design of Robotic Surgical Instrument for Minimally Invasive Robot Surgery. In: Dohi T., Liao H. (eds) *Computer Aided Surgery. Proceedings in Information and Communications Technology*, vol 3. Springer, Tokyo
- Huang, J., Wen, C., Wang, W., et al. (2015). Global stable tracking control of underactuated ships with input saturation. *Systems & Control Letters*, 85, pp. 1-7.
- Kahraman, C., Kaya, I., Çevik S., Ates N.Y., Gülbay M. (2008). Fuzzy Multi-Criteria Evaluation of Industrial Robotic Systems Using Topsis. In: Kahraman C. (eds) *Fuzzy Multi-Criteria Decision Making. Springer Optimization and Its Applications*, vol 16. Springer, Boston, MA
- Lago, G. A., Vêras, V. L. M., Santos, A. O., Morishita, H. M., Moratelli Junior, L., & Tannuri, E. A. (2005). Desenvolvimento de laboratório experimental de sistemas de posicionamento dinâmico. In *COPINAVAL'2005*. Guayaquil, Ecuador: IPIN.
- Larrazabal, J. M., Penas, M. S. (2016). Intelligent rudder control of an unmanned surface vessel. *Expert Systems with Applications*, vol 55, pp. 106-117.
- Lee, J.; Su Y; Shen C., (2007), A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi, *The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Taiwan.
- Lemos, F. M. M; Silva, V. E. S. (2019). Controle de uma embarcação não tripulada para seguimento de um alvo. Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- Liu, T., Zaopeng, D., Du., H., Song, L. (2017). Path following control of the underactuated USV based on the improved line-of-sight guidance algorithm. *IEEE Polish Maritime Research*. 1 (93), Vol. 24; pp. 3-11.
- Lombai, F., Szederkenyi, G. (2008). Trajectory tracking control of a 6-degree-of-freedom robot arm using nonlinear optimization, *10th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Trento, pp. 655-660.
- Morishita, H. M.; Tannuri, E. A.; Saad, A. C.; Sphaier, S. H.; Lago, G. A., Moratelli Jr, L. (2009) Laboratory facilities for dynamic positioning system. *Proc. of the 8th IFAC International Conference on Manoeuvring and Control Marine Craft* September, 2009, Guarujá, Brazil, pp. 400-405.
- Revoredo, T. C., Slama, J. G., Mora-Camino, F. (2013). Concepção de sistemas de seguimento de trajetórias complexas para aeronaves comerciais - Design of complex trajectories tracking systems for commercial aircraft. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 17 (2), pp 163-174.
- Rosario, R. V. C. (2017). Controle a Estrutura Variável de um Barco Empurrando uma Carga Flutuante Subatuada, Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrônica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- Rosario, R. V. C. e Cunha, J. P. V. S. (2016). Experimentos de rastreamento de trajetória de uma embarcação de superfície utilizando linearização por realimentação e controle a estrutura variável, *Anais do XXI Congresso Brasileiro de Automática*, Vitória – ES, pp. 3034– 3039.
- Shojaei, K. (2015), Neural adaptive robust control of underactuated marine surface vehicles with input saturation. *Applied Ocean Research*, 53, pp. 267-278.
- Temel, T., Ashrafiun, H. (2015). Sliding-mode speed controller for tracking of underactuated surface vessels with extended Kalman filter . *ELECTRONICS LETTERS* 19th, 51(06) :467-469.
- Vilca, J., Adouane, L. & Mezouar, Y. (2016). Optimal Multi-Criteria Waypoint Selection for Autonomous Vehicle Navigation in Structured Environment. *J. Intell. Robot Syst.* 82, pp. 301-324.
- Widyotriatmo, A., Pamosoaji, A.K., Hong, K.-S. (2013). Control architecture of an autonomous material handling vehicle. *Int. J. Artif. Intell.* 10(S13), pp. 139-153
- Zhai, W., Zhao, Y., Jia, P. (2008). A navigation system for minimally invasive abdominal intervention surgery robot, *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, Chengdu, pp. 819-823.