

Navegação Baseada em Sensoriamento Laser para uma Formação Líder-Seguidor[★]

Leonardo A. Fagundes-Júnior^{*} Denise Cristina H. de Freitas^{**}
Mário Sarcinelli-Filho^{***} Alexandre S. Brandão^{**}

^{*} Departamento de Informática, Universidade Federal de Viçosa, MG,
(e-mail: leonardo.fagundes@ufv.br).

^{**} Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Viçosa, MG, (e-mails: denise.henrique@ufv.br, alexandre.brandao@ufv.br)

^{***} Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, (e-mail: mario.sarcinelli@ufes.br)

Abstract: This paper proposes a Leader-Follower formation strategy for grounded mobile robots. The sensing strategy of the follower robot is able to detect and follow the leader one, using laser scanner information, while maintaining the desired formation shape. The strategy is evaluated in the presence of robots, which move around the map and carry a pattern identical to that of the Leader robot. They are therefore called “*fake Leaders*”. After encountering the real Leader for the first time and estimating its position, the Follower is able to reach the desired structure of the formation even after some temporary sensor occlusion. Numerical simulation results validate the identification and tracking strategy.

Resumo: Este trabalho propõe uma estratégia de formação Líder-Seguidor de robôs móveis terrestres. O sensoriamento do robô seguidor é capaz de detectar e seguir o robô líder, utilizando informações de um escâner laser, enquanto mantém a forma desejada da formação. A estratégia é avaliada na presença de robôs, que se movimentam pelo mapa e carregam sobre si um padrão idêntico ao do robô Líder. Eles são, portanto, denominados “*falsos Líderes*”. Ao encontrar o Líder pela primeira vez e estimar sua posição, o Seguidor é capaz de alcançar a estrutura desejada da formação mantendo a forma mesmo após oclusão temporária do sensor. Resultados de simulação validam a estratégia proposta de identificação e rastreamento.

Keywords: Robot Cooperation; Decentralized Control; Detection Strategy; Obstacle Avoidance; Navigation.

Palavras-chaves: Cooperação de Robôs; Controle Descentralizado; Estratégia de Detecção; Desvio de Obstáculos; Navegação.

1. INTRODUÇÃO

Em robótica, a navegação é um problema prático que muitas vezes envolve o deslocamento de agentes na presença de objetos, tais como paredes, obstáculos diversos ou mesmo outros robôs (Mohan and Salgoankar, 2018; Panchpor et al., 2018; Villani et al., 2018; Zacharakí et al., 2020; Rizk et al., 2019). O último caso comumente está associado à cooperação de robôs e o desafio está em identificar e reconhecer os agentes do entorno. O próximo passo é cumprir com a missão, a qual pode ser uma exploração coordenada do ambiente, o rastreamento de um alvo, um transporte de carga colaborativo, entre outras (Leite et al., 2020).

O senso comum já nos leva a concluir que o controle de formação é mais indicado para aquelas tarefas que ao serem realizadas por um único robô irão levar mais tempo para ser cumpridas e, provavelmente, terão um custo mais elevado. Neste aspecto, um grupo de robôs seria, e de fato

se apresenta como, uma possível solução para realizar a missão com maior eficiência e excelência.

Simplificadamente, o objetivo do controle de formação é o deslocamento em conjunto, enquanto se mantém um padrão de espaçamento entre os agentes. Dentre as estruturas de controle cooperativo, pode-se citar as estratégias: líder-seguidor, método baseado em comportamento, método baseado em consenso e estratégia de estruturas virtuais (Ren and Sorensen, 2008; Brandão et al., 2009; Shao et al., 2005; Consolini et al., 2008). No primeiro caso, um robô é responsável por liderar todos os outros robôs, tal qual pássaros que seguem um líder durante suas migrações. A segunda estratégia parte do princípio no qual os robôs são programados para reagir diante um ambiente segundo padrões pré-estabelecidos. O terceiro caso se fundamenta na regra de que os robôs devem convergir para o ponto desejado simultaneamente, sendo então um problema de ponto de encontro. Na última abordagem, a estrutura de formação recebe uma missão e os agentes que a compõem navegam como consequência.

^{*} Este trabalho foi apoiado pelas instituições de fomento a pesquisa: CAPES, CNPq, FAPES e FAPEMIG.

Apesar de ser um problema relativamente resolvido, estratégias de formação líder-seguidor descentralizadas podem não apresentar o desempenho requerido devido às incertezas do sistema de sensoriamento. Alguns trabalhos tratam apenas do comportamento dos robôs que integram a formação levando em conta sua interação com o ambiente. Contudo, ainda são pouco abordadas na literatura, estratégias que levem em consideração a existência de múltiplos candidatos a líderes, ou seja, a possibilidade de se ter vários robôs no ambiente com características idênticas ou similares àquelas de um líder que um seguidor deve rastrear. Neste contexto, este trabalho propõe uma estratégia de detecção, identificação e rastreamento do robô líder para navegação cooperativa descentralizada em ambientes não-estruturados, na presença de outros possíveis líderes, dando seqüências aos nossos trabalhos prévios (Brandão et al., 2007, 2009).

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: A Seção 2 apresenta o modelo matemático do robô móvel tipo uniciclo de tração diferencial e da estrutura de formação líder-seguidor usando esta configuração de robôs. Além disso, esta seção apresenta o sensor laser montado sobre o robô seguidor e como suas informações podem ser utilizadas para a identificação de um padrão montado sobre o robô líder. Na seqüência, a Seção 3 apresenta a contribuição do trabalho. No caso, uma estratégia de detecção e rastreamento baseada em uma série histórica das medidas do sensor laser e fundamentada na técnica de regressão linear. Por fim, a Seção 4 ilustra os resultados e discussão de experimentos numéricos que validam a proposta, enquanto a Seção 5 traz as considerações finais do trabalho.

2. MODELAGEM DA FORMAÇÃO LÍDER-SEGUIDOR

Os robôs utilizados para o desenvolvimento deste trabalho são do tipo uniciclo de tração diferencial, caracterizados pelo acionamento independente das rodas e presença de um eixo virtual conectando as mesmas (representada pela linha tracejada diagonal na Figura 1). Seu modelo cinemático dado por

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos \psi \\ \dot{y} = u \sin \psi \\ \dot{\psi} = \omega, \end{cases} \quad (1)$$

onde descreve seu movimento no plano cartesiano, sob a ação conjunta das velocidades linear u e angular ω , ou seja, sob a ação de seus sinais de controle. Sua postura é dada por $\mathbf{x} = [x \ y \ \psi]^T$, em que x e y são as coordenadas do ponto de controle, x_c e y_c , do ponto localizado no centro do eixo virtual que une as rodas do robô e ψ é a orientação angular do veículo em relação ao eixo x , tomando como base o referencial inercial $\langle r \rangle$, como exhibe a Figura 1.

O ponto de controle do robô é descrito na Figura 1 como p , dada uma distância a do centro do eixo virtual entre as rodas. Para este trabalho, considera-se o ponto de controle no centro do robô, com $a = 0$ m.

2.1 Equações de Estado

Esta seção apresenta as equações de estado que envolvem as variáveis de formação, as quais serão obtidas e con-

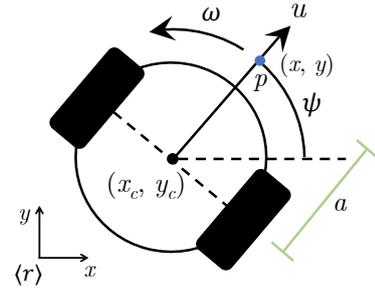


Figura 1. Modelo cinemático de um robô tipo uniciclo de tração diferencial.

troladas através dos dados provenientes de medidas do sensor de varredura laser. A Figura 2 ilustra as variáveis de formação para o controle descentralizado do tipo líder seguidor. Tais variáveis são completamente determinadas por meio das medidas providas do laser escâner montado sobre o robô seguidor. Vale ressaltar que ao longo do trabalho, variáveis com subscrito L se referem às variáveis do robô líder, bem como, variáveis com subscrito S serão usadas para descrever o robô seguidor. Ainda desta figura, $\mathbf{q} = [\rho \ \beta \ \theta]^T$ contém as variáveis que representam, respectivamente, a distância entre os robôs ($\rho \in \mathbb{R}^+$), o ângulo entre a linha que conecta o centro de gravidade dos dois robôs e o eixo x do seguidor ($\beta \in (-\pi/2, \pi/2)$ rad), e o erro de orientação entre os robôs ($\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$ rad). Note-se que na Figura 2, tem-se $\beta < 0$ rad e $\theta < 0$ rad. Em outras palavras, de uma forma simplória, pode-se dizer que o robô líder está à direita do seguidor e se afastando dele.

Conforme descrito por Brandão et al. (2007) e reescritas neste trabalho, as equações de estado da formação são dadas por

$$\dot{\mathbf{q}} : \begin{cases} \dot{\rho} = u_L \sin(\beta - \theta) - u_S \sin \beta \\ \dot{\beta} = \frac{1}{\rho} [u_L \cos(\beta - \theta) - u_S \cos \beta] - \omega_S \\ \dot{\theta} = \omega_L - \omega_S. \end{cases} \quad (2)$$

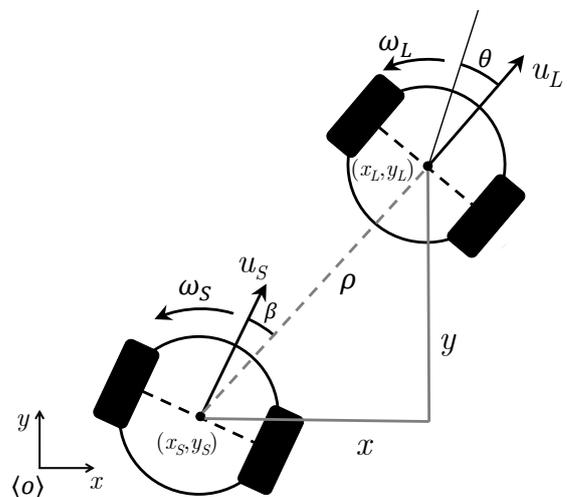


Figura 2. Descrição geométrica da formação e representação das variáveis de controle.

Note que a variação do erro de orientação θ depende somente da diferença entre as velocidades angulares dos robôs líder e seguidor.

2.2 Estratégia de Controle

Para o presente trabalho, o objetivo de controle é fazer $\rho \rightarrow \rho_d$ e $\beta \rightarrow \beta_d$ para $t \rightarrow \infty$, enquanto mantém limitado o erro de orientação θ . Para fins práticos, a estrutura de formação líder-seguidor deve manter sua distância e sua orientação rígidas. Qualquer erro nestas variáveis pode ser entendido como distúrbio no objetivo de controle.

Para cumprir tal objetivo, o vetor de sinais de controle aplicado ao robô seguidor é dado por $\mathbf{u}_S = [u_S \ \omega_S]^\top$, ou em sua forma expandida por

$$u_S = \frac{u_L \sin(\beta - \theta) - k_1 \tanh \tilde{\rho}}{\sin \beta} \quad (3)$$

e

$$\omega_S = \frac{u_L \sin \theta + k_1 \tanh \tilde{\rho} \cos \beta}{\rho \sin \beta} - k_2 \tanh \tilde{\beta} \quad (4)$$

com $k_1 > 0$ e $k_2 > 0$ ganhos positivos e os erros de estado da formação $\tilde{\rho} = \rho_d - \rho$ e $\tilde{\beta} = \beta_d - \beta$. Detalhes adicionais, referentes à demonstração de estabilidade, podem ser vistos em Brandão et al. (2007).

É válido ressaltar que para o bom desempenho do controlador empregado é fundamental que o robô seguidor receba constantemente informações do sensor que permitam calcular e atualizar os valores das variáveis de estado e, conseqüentemente, determinar seus sinais de controle.

O robô líder terá movimento livre no espaço realizando uma tarefa simples de posicionamento sem ter conhecimento do robô seguidor. O sistema de controle adotado para esta situação é o mesmo descrito por Pereira (2006), cujo objetivo é levar o robô de um ponto inicial a um ponto desejado, fazendo com que ele permaneça no ponto alvo. A análise de estabilidade para este controlador pode ser encontrada no mesmo trabalho.

Tomando o conjunto de equações cinemáticas (1), é possível obter as variáveis correspondentes em coordenadas polares, uma vez que esta representação é mais conveniente para o desenvolvimento do controlador de posição final. Na Figura 3 encontram-se representadas as variáveis utilizadas no modelo cartesiano polar.

Portanto, considerando ρ como o erro de posição do robô, as equações cinemáticas em coordenadas polares são dadas, de forma simplificada, por

$$\begin{cases} \dot{\rho}_p = -u \cos \alpha_p \\ \dot{\alpha}_p = -\omega + \frac{u \sin \alpha_p}{\rho_p} \end{cases}, \quad (5)$$

em que α_p representa o erro angular entre a orientação do robô e a direção do ponto alvo. É importante destacar que o erro de posição (ρ_p) deve ser diferente de zero, tendo em vista que, caso contrário, haveria uma indeterminação da derivada temporal da variável α_p .

Os sinais de controle são expressos de acordo com as leis das equações a seguir, como apresentado em Brandão et al. (2013)

$$u_L = u_{max} \tanh(\rho_p) \cos \alpha_p, \quad (6)$$

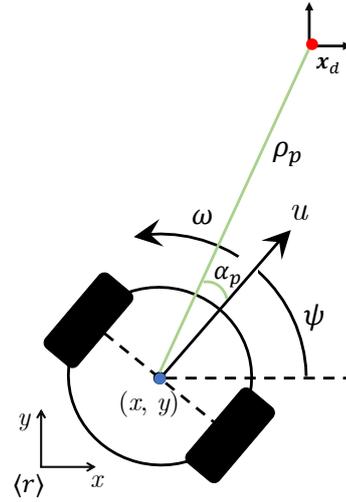


Figura 3. Representação do sistema polar de modelagem cinemática do robô do tipo unicloco. O ponto desejado é representado por \mathbf{x}_d .

$$\omega_L = \omega_{max} \alpha_p + u_{max} \frac{\tanh(\rho_p)}{\rho_p} \sin \alpha_p \cos \alpha_p. \quad (7)$$

De modo a não saturar as velocidades efetivamente executadas por um robô real do modelo Pioneer P3DX, foram escolhidas para a simulação $u_{max} = 0,35$ [m s⁻¹] e $\omega_{max} = 0,44$ [rad/s].

2.3 Sensoriamento e Detecção do Líder

Neste trabalho, as informações necessárias para o cálculo das variáveis de estado da formação e para estimar a posição do robô líder serão obtidas por meio de um escâner laser montado sobre o robô seguidor. Essas informações também serão utilizadas para a determinação das ações de controle do robô seguidor.

O sensor empregado apresenta um ângulo de varredura ajustável, que neste trabalho foi configurado para 180°, com resolução de 1°, ou seja, 181 medidas distintas de distância são fornecidas a cada varredura. Além disso, o raio de alcance máximo considerado neste trabalho é de 5,0 m.

Para detecção do robô líder, por meio das medições do sensor laser, utilizou-se um padrão semicilíndrico, de diâmetro p_r , sobre o líder, conforme mostrado na Figura 4. O padrão deve ser identificado pelo robô seguidor a partir das medidas do sensor laser apresentadas na Figura 5.

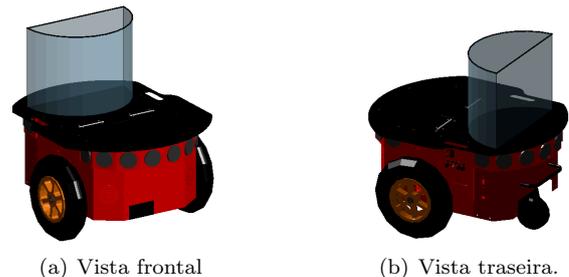


Figura 4. Robô líder com um padrão montado sobre si.

De acordo com Brandão et al. (2007), as variáveis no espaço da formação, que podem ser aproximadas por

$$\beta \approx \frac{\beta_1 + \beta_2}{2}, \quad (8)$$

$$\theta \approx \arctan \left(\frac{\rho_1 \sin \beta_1 - \rho_2 \sin \beta_2}{\rho_1 \cos \beta_1 - \rho_2 \cos \beta_2} \right), \quad (9)$$

$$\rho \approx \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}, \quad (10)$$

uma vez que são observados ruídos nas medidas entregues pelo escâner laser, durante navegação. Logo, haverá incertezas no processo de localização e rastreamento do líder, que tornam esta aproximação razoável e satisfatória.

Para a detecção dos feixes que tocam uma superfície qualquer e assim descobrir quem são β_1 e β_2 , utilizou-se a variação da distância entre feixes consecutivos. Em outras palavras, foi realizada uma diferenciação numérica entre as medidas de distância de feixes consecutivos. As demais variáveis podem ser obtidas a partir das relações geométricas ilustradas na Figura 5.

Em suma, a estratégia de sensoriamento consiste em detectar inicialmente o robô líder e, após o início de seu movimento, estimar sua posição e velocidade a partir de medidas consecutivas do sensor laser. Considerando-se a varredura angular do sensor laser e o formato do padrão, a postura do líder com respeito ao seguidor é dada por

$$\bar{x}_L = x_S + \rho \cos(\psi_S + \beta), \quad (11)$$

$$\bar{y}_L = y_S + \rho \sin(\psi_S + \beta), \quad (12)$$

$$\bar{\psi}_L = \psi_S + \theta. \quad (13)$$

3. ESTRATÉGIA DE DETECÇÃO DO LÍDER

Este trabalho é uma extensão dos estudos propostos por Brandão et al. (2009), levando em consideração a navegação dos robôs em ambientes sujeitos à presença de objetos com dimensões semelhantes àquelas do padrão carregado sobre o robô líder. Neste cenário, a tomada de decisão para localização e rastreamento do líder pelo seguidor se torna o desafio a ser solucionado. Nesta tarefa, o objetivo é obter a melhor reta representativa da direção de movimentação

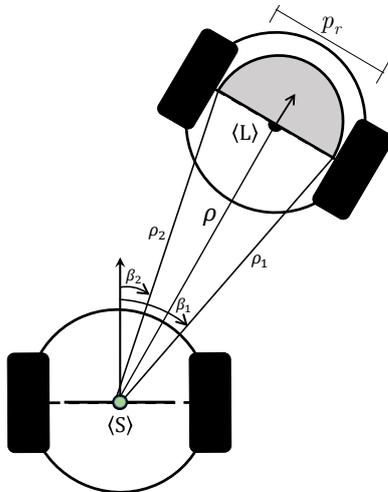


Figura 5. Caracterização da estratégia de sensoriamento, com destaque para o padrão montado sobre o líder, $\langle L \rangle$, em respeito ao seguidor, $\langle S \rangle$.

do líder, segundo a percepção do robô seguidor. Esta abordagem visa mitigar os ruídos provenientes das medidas do sensor e de sua resolução angular. Para tal, as medidas de distância obtidas pelas leituras foram utilizadas para a regressão linear e, posteriormente, para a estimação da posição e da velocidade do líder.

Aqui se supõe que o líder está em uma circunferência móvel de raio variável descrita por

$$r = r_a \bar{u}_{L_m} T_s + r_{min}, \quad (14)$$

em que r_a é um fator multiplicativo para descrever o raio da circunferência, \bar{u}_{L_m} é a velocidade média estimada do robô líder durante as 10 últimas iterações e T_s é o tempo de amostragem do robô seguidor. A estratégia é baseada no fato de que o robô tem uma velocidade limitada e não pode sofrer deslocamentos grandes em um único período de amostragem. Em outras palavras, o movimento do robô líder deve ser contínuo e suave, onde não é possível observar deslocamento infinito em um tempo finito. Consequentemente, quanto maior a velocidade do líder, maior será o raio da circunferência. Logo, a região de busca possui dimensão variável, a qual amplia (ou reduz) em função de uma maior (ou menor) velocidade média do robô Líder, observada a partir dos dados do sensor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A formação e o sensor laser foram implementados no software MATLAB[®] e tratados como um problema de interseção de retas, considerando cada feixe do sensor como um segmento de reta da origem até o alcance do mesmo, e o padrão como um perfil semicilíndrico formado por um conjunto de retas. Simulações realizadas a partir da plataforma AuRoRa¹ validam a estratégia proposta por meio de estudos de caso.

Nas simulações a seguir, considera-se um raio mínimo, r_{min} , igual a 250 mm compreendendo o robô por completo, onde não é possível ter outro robô inserido na área descrita, pois configuraria uma situação de colisão intra-formação. Dado que aplicações práticas objetivam a evitação de colisão entre robôs, esta aproximação acima é válida, uma vez que a proposta de uma estratégia de desvio foge ao escopo do trabalho

Considerando uma formação líder-seguidor, na qual o líder leva sobre si um padrão reconhecível pelo seguidor, a tarefa consiste em navegar mantendo uma distância de $\rho_d = 1,0$ m e um ângulo de $\beta_d = \pi/4$ rad entre os robôs. Especificamente, o seguidor estará localizado atrás e à direita do líder. Nas simulações a seguir, considerou-se um sensor com alcance de 2,5 e 5,0 m, a fim de se verificar a versatilidade da estratégia proposta, frente à alteração do alcance máximo do sensor.

A primeira tarefa tem o robô líder em repouso e almeja que o robô seguidor entre em formação. A segunda tarefa busca avaliar a presença de outros possíveis robôs líderes, no cenário de navegação. Neste caso, o robô líder realiza um controle de posição em quadrantes, enquanto os demais robôs se movimentam livremente no ambiente. Por sua vez, o robô seguidor deve detectar todos robôs, porém deve rastrear aquele inicialmente definido como seu líder.

¹ Interface AuRoRa - <https://github.com/NERO-UFV/AuRoRa>.

4.1 Líder Estático

Primeiramente, considerou-se o robô líder parado, a fim de verificar e validar a estimação de posição e velocidade do líder pelo robô seguidor, bem como observar os possíveis ruídos de medição e como eles afetam nas estimativas. A simulação pode ser visualizada no seguinte link: <https://www.youtube.com/watch?v=KHYo8ebE09I&t=7s>.

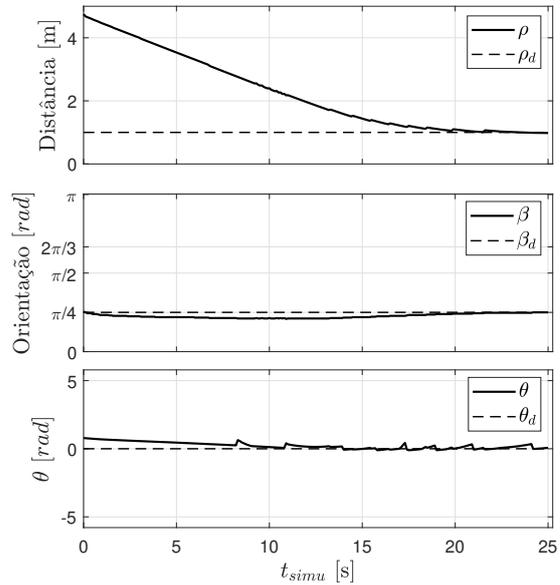
O líder encontra-se na posição $(x_L, y_L) = (3, 5; 3, 5)$ m, com orientação $\psi_L = \pi/4$ rad e, o robô seguidor, na origem com orientação nula, como mostra a Figura 6(a). Na Figura 6(b) é possível verificar a configuração final da formação.

As variáveis de estado da formação são exibidas na Figura 7(a). Note que os valores correntes tendem aos desejados. Ao atingir a configuração estipulada para a formação, o robô seguidor permanece estável até o fim da simulação. Além disso, o erro de orientação θ permanece limitado durante toda a execução da tarefa.

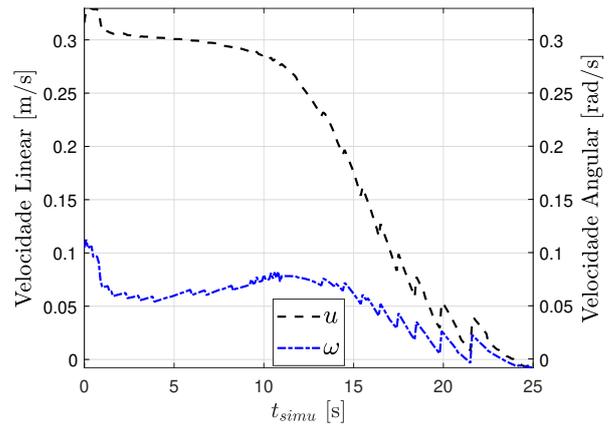
De acordo com a Figura 7(b), é possível notar que os sinais de controle são limitados e tendem a zero com o posicionamento do seguidor. As oscilações observadas ocorrem devido aos ruído de medição do sensor, que permaneceram mesmo após aplicação das estratégias da obtenção da melhor reta (*Least Squares*), porém não comprometem a execução da tarefa.

Observa-se a medição da velocidade do Líder, a partir dos dados do sensor, e sua velocidade real, na Figura 7(c). Devido ao filtro de média, houve certa diferença na amplitude dos valores obtidos. Sem a aplicação deste filtro, a velocidade medida se comportou de maneira mais oscilatória. No gráfico, u_L é a velocidade real do robô líder obtida através de sua odometria, \bar{u}_L é a velocidade estimada a partir da melhor reta representativa dos dados medidos e \bar{u}_{Lm} é a velocidade instantânea estimada a partir da filtragem

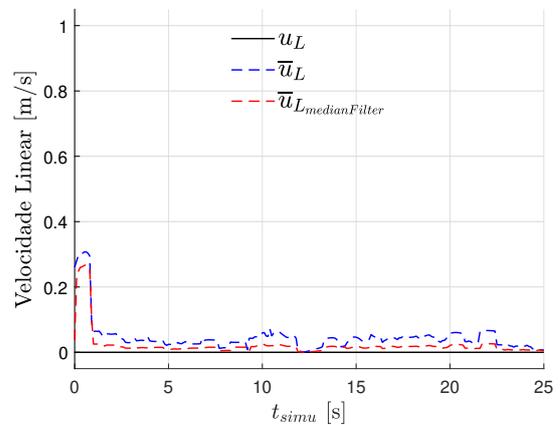
do sinal por um filtro de média móvel, com janela de 10 amostras.



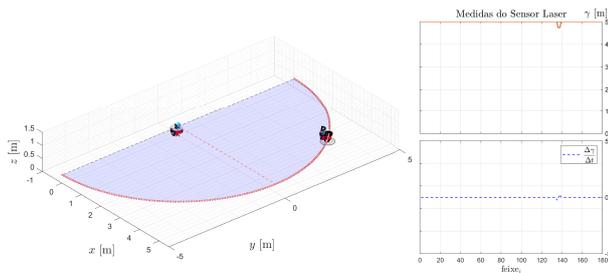
(a) Variação temporal do estado da formação.



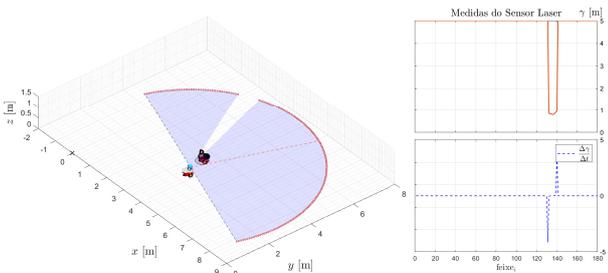
(b) Sinais de Controle enviados ao robô seguidor.



(c) Velocidade estimada do robô líder.



(a) Posição inicial



(b) Posição final

Figura 6. Tarefa de posicionamento com o líder parado.

Figura 7. Evolução temporal dos estados e dos sinais de controle durante a tarefa de estacionamento.

4.2 Navegação

Esta seção apresenta a inserção da formação em um ambiente na presença de outros robôs com um padrão similar àquele montado sobre líder, porém esses estarão navegando de maneira arbitrária, ou seja, não é de conhecimento do robô seguidor. A execução da tarefa pode ser observada no vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=KHYo8ebE09I&t=25s>.

O robô Líder possui um controle de posição sem orientação final. Sua tarefa é apenas chegar ao ponto desejado mantendo sua orientação final arbitrária. Ele inicializa a tarefa na posição $(x_L, y_L) = (1, 5; 0, 0)$ m, com orientação $\psi_L = \pi/4$ rad e, o seguidor, na origem com orientação nula. Em seguida, inseriu-se outros dois robôs nas posições $(2, 0; -1, 0)$ m e $(-1, 0; 1, 5)$ m, com orientação nula, representando os outros possíveis Líderes da formação, como exibido na Figura 8(a).

A Figura 8(b) apresenta a configuração final e a rota realizada pelo robô líder (em verde). Verifica-se que a estratégia proposta é capaz de identificar os outros possíveis líderes, porém os ignora para a aplicação do controle da formação e realiza a missão considerando apenas o robô inserido no círculo gerado pela estratégia (em cinza).

É possível observar a variação das variáveis de estado da formação na Figura 9(a). Note que as variáveis de formação tendem aos valores desejados, no máximo, 25 segundos após o líder partir do repouso. Ao atingir os pontos desejados, os robôs (e a formação) permanecem estáveis. Além disso, a orientação θ permanece limitada durante toda a execução da tarefa.

É possível notar que os sinais de controle são limitados e tendem a zero com o posicionamento do líder (veja a Figura 9(b)). A medição da velocidade do Líder, a

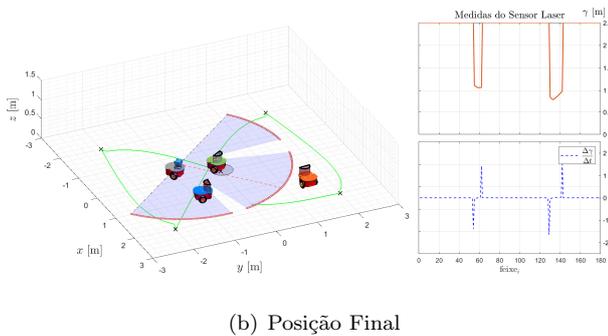
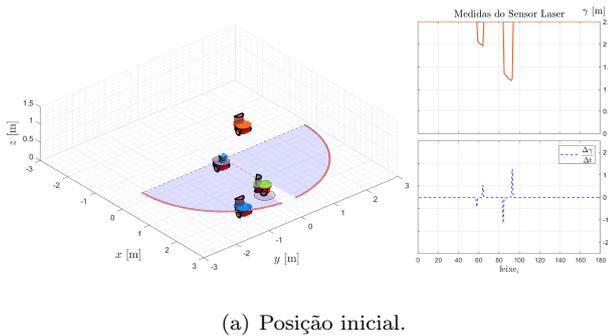
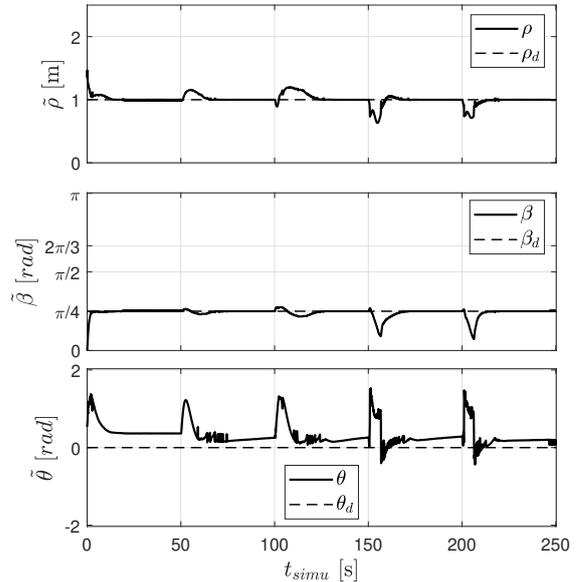
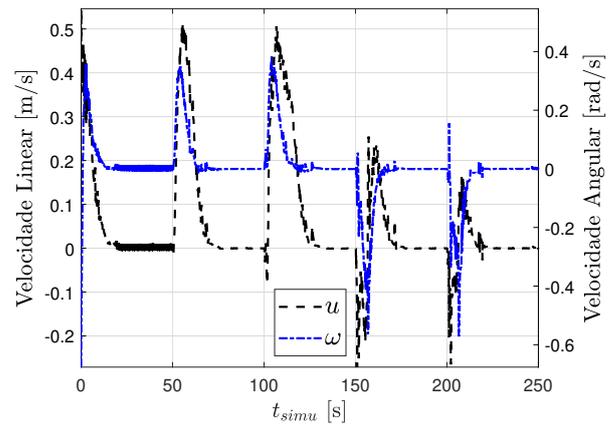


Figura 8. Navegação com inserção de falsos líderes.

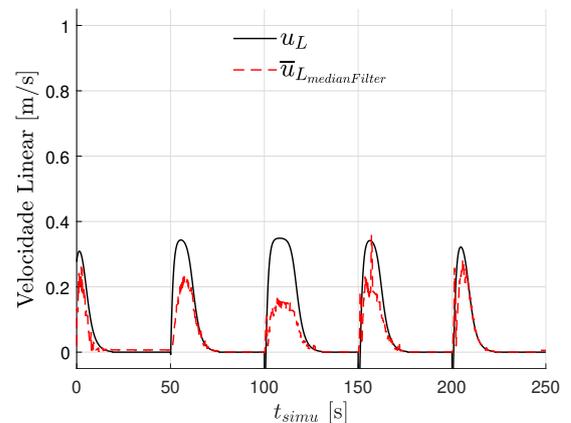
partir dos dados do sensor, e sua velocidade real são apresentados na Figura 9(c). Observa-se que o ruído de medição permanece nas estimativas da velocidade linear do líder, devido ao acúmulo de erros da derivação numérica.



(a) Variação temporal do estado da formação



(b) Sinais de Controle enviados ao robô seguidor



(c) Velocidade estimada do robô líder.

Figura 9. Evolução temporal dos estados e dos sinais de controle durante a tarefa de posicionamento do líder.

Apesar das diferenças entre a velocidade real do líder e da velocidade estimada pelo seguidor, a tarefa foi realizada com sucesso e, durante o percurso, nota-se que as variáveis de estado da formação tenderam aos valores definidos como referência.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho estudou as principais características associadas às estratégias de cooperação de robôs baseadas em estratégia Líder-Seguidor. A estratégia de controle implementada caracteriza-se pela descentralização da informação, sendo necessário ter conhecimento da posição e da velocidade instantânea do robô líder.

Os dados obtidos de simulações numéricas mostram a convergência das variáveis da formação para os valores de interesse, mostrando a estabilidade assintótica do controlador utilizado. Além disso, os resultados obtidos mostram a estabilidade do sistema na realização de tarefas de posicionamento do robô líder.

Como sugestão para a continuidade deste trabalho pode-se citar a análise dos erros de medição do robô seguidor, a fim de melhorar a estimativa da velocidade estimada do líder. Como se trata de ruídos de sensor, geralmente modelados por processos estocásticos (gaussianos, na maior parte das vezes), a estimativa descrita pode ser realizada por algum estimador de estados, como o filtro de Kalman estendido (EKF) ou de informação. Por fim, vale avaliar a proposta de estratégias para recuperação do líder, quando o seguidor perdê-lo de vista durante a navegação. Uma predição aprimorada de movimento poderá substituir a atual estratégia, a qual toma e retém o último sinal de controle realizado, em caso de perdas do líder, como pode ser visto em <https://www.youtube.com/watch?v=KHYo8ebE09I&t=125s>.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, uma agência brasileira do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações, à FAPES - Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo, e à FAPEMIG - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, pelo suporte dado a esta pesquisa. Sr. Fagundes-Júnior também agradece a CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa garantida a ele, possibilitando dedicação exclusiva aos estudos de mestrado.

REFERÊNCIAS

- Brandão, A.S., Sarcinelli-Filho, M., and Carelli, R. (2013). An analytical approach to avoid obstacles in mobile robot navigation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10(6), 278.
- Brandão, A.S., Sarcinelli-Filho, M., Carelli, R., and Bastos-Filho, T.F. (2009). Decentralized control of leader-follower formations of mobile robots with obstacle avoidance. In *2009 IEEE International Conference on Mechatronics*, 1–6. IEEE.
- Brandão, A., Torres, J., Carelli, R., Sarcinelli-Filho, M., and Bastos-Filho, T. (2007). Controlling a mobile robot to keep a line formation using a laser scanner. *Proceedings of the VIII Brazilian Symposium on Intelligent Automation (VIII SBAI)*. Florianópolis, SC.
- Consolini, L., Morbidi, F., Prattichizzo, D., and Tosques, M. (2008). Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints. *Automatica*, 44(5), 1343–1349.
- Leite, G.R., Cordeiro, T.D., Savino, H.J., Cavalcante, G.H., Freitas, B.S., Lima, A.M., et al. (2020). Veículos autônomos cooperativos para monitoramento marítimo: busca, rastreamento e sensoriamento. *Anais da Sociedade Brasileira de Automática*, 2(1).
- Mohanan, M. and Salgoankar, A. (2018). A survey of robotic motion planning in dynamic environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 100, 171–185.
- Panchpor, A.A., Shue, S., and Conrad, J.M. (2018). A survey of methods for mobile robot localization and mapping in dynamic indoor environments. In *2018 Conference on Signal Processing And Communication Engineering Systems (SPACES)*, 138–144. IEEE.
- Pereira, F.G. (2006). Navegação e desvio de obstáculos usando um robô móvel dotado de sensor de varredura laser. *Master's thesis, Universidade Federal do Espírito Santo-UFES*.
- Ren, W. and Sorensen, N. (2008). Distributed coordination architecture for multi-robot formation control. *Robotics and Autonomous Systems*, 56(4), 324–333.
- Rizk, Y., Awad, M., and Tunstel, E.W. (2019). Cooperative heterogeneous multi-robot systems: A survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 52(2), 1–31.
- Shao, J., Xie, G., Yu, J., and Wang, L. (2005). Leader-following formation control of multiple mobile robots. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation Intelligent Control, 2005.*, 808–813. IEEE.
- Villani, V., Pini, F., Leali, F., and Secchi, C. (2018). Survey on human-robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*, 55, 248–266.
- Zacharaki, A., Kostavelis, I., Gasteratos, A., and Dokas, I. (2020). Safety bounds in human robot interaction: A survey. *Safety science*, 127, 104667.