

Desvio de Obstáculo para uma Formação de Robôs Utilizando Espaço Nulo

Mauro Sérgio M. Moreira Mário Sarcinelli Filho

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES
(e-mails: mauromafra@gmail.com e mario.sarcinelli@ufes.br).*

Abstract: This paper proposes a control system to autonomously guide a formation of a differential-drive wheeled platform and an unmanned aerial vehicle to track a given trajectory in an environment containing static obstacles. Such an environment could be, for instance, an automated warehouse. The controller embeds two partial controllers, a formation controller to move the formation accordingly and a controller to deviate the formation when an obstacle appears in its route. The formation controller is designed considering the paradigm of virtual structure, in this case the tridimensional straight line linking the two robots. As for the obstacle avoidance controller, it should make the robot to navigate through regions of low potential, where the potential is a function associated to the obstacles. When the wheeled robot enters a region whose potential is higher than a predefined threshold the controller should modify the route of the formation to avoid the obstacle. These two controllers are then integrated, using the null space-based behavioral control approach. The use of such an approach allows giving higher priority to the subtask of avoiding the obstacle, leaving the subtask of moving the formation with a lower priority, thus generating a way to move around an obstacle following a path of low potential.

Resumo: Este trabalho propõe um sistema de controle para conduzir de forma autônoma uma formação envolvendo um robô terrestre com tração diferencial e um veículo aéreo não tripulado para rastrear uma determinada trajetória, em um ambiente contendo obstáculos estáticos. Tal ambiente poderia ser, por exemplo, um armazém automatizado. O controlador principal incorpora dois controladores parciais, um controlador de formação, para mover a formação no seguimento da trajetória e um controlador de desvio de obstáculo quando o mesmo é detectado em sua rota. O controlador de formação é projetado considerando o paradigma da estrutura virtual, neste caso a linha reta tridimensional que liga os dois robôs. Já o controlador de desvio de obstáculos deve fazer com que o robô navegue por regiões de baixo potencial definido por funções associadas aos obstáculos. Quando o robô do tipo unicycle entra em uma região cujo potencial é superior a um limite predefinido, o controlador de desvio de obstáculo modifica a rota da formação a fim de evitá-lo. Esses dois controladores são então integrados, usando a abordagem de controle comportamental baseado em espaço nulo. A utilização de tal abordagem permite dar maior prioridade à sub-tarefa de evitar o obstáculo, deixando a sub-tarefa de mover a formação com menor prioridade, gerando assim uma forma de contornar um obstáculo seguindo um caminho de baixo potencial.

Keywords: Obstacle Avoidance; Null Space Behavioral Control; Multi-robot Systems; Formation Control; Heterogeneous Formation.

Palavras-chaves: Desvio de Obstáculos; Controle Comportamental Baseado em Espaço Nulo; Sistemas Multirrobôs; Controle de Formação; Formação Heterogênea.

1. INTRODUÇÃO

Os veículos aéreos não tripulados (VANTs) têm sido cada vez mais usados nos últimos anos, principalmente para realizar tarefas que ofereçam risco à vida do ser humano ou que tenham alto grau de repetibilidade e conformidade, situações em que os robôs podem substituir o trabalho humano com benefícios.

* Este trabalho foi apoiado em parte pelo CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e em parte pela FAPES - Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo.

Uma vasta gama de aplicações usando VANTs para realizar tarefas diárias podem ser vistas em (Chen et al., 2016). Dentre os casos citados podemos destacar o caso particular de veículos do tipo helicóptero multirrotor, normalmente conhecidos como drones, que vêm sendo utilizados em diversas aplicações, tais como transporte de cargas (Villa et al., 2020), (Villa et al., 2021), entrega de pacotes (Schneider, 2020), (Bai et al., 2020), (Bacheti et al., 2021), automação de armazéns (Harik et al., 2016), agricultura de precisão (Zhang and Kovacs, 2012), inspeção predial (Jordan et al., 2018), (Jiang et al., 2019), e até mesmo

exploração espacial (Rice and Horgan, February 10, 2022), apenas para mencionar uns poucos casos.

Para o estudo de caso deste artigo, o VANT utilizado corresponde a um drone de pequeno porte, o modelo Bebop 2, da empresa *Parrot Drones SAS*. Eles são capazes de voar em pequenos espaços, inclusive no interior de edificações, permitindo assim aplicações como automação do processo de inventário em armazéns ou busca/resgate em ambientes que ofereçam risco à vida humana, como observado em áreas de desastres com desabamento e possibilidade de colapso de estruturas que sustentam edificações. Logo, o quadrimotor deve ser capaz de voar em áreas que tenham paredes e eventuais obstáculos a curtas distâncias, ou seja, em ambientes não estruturados.

Ainda no contexto de busca, mapeamento e interações com áreas de desastre, sabe-se que o tempo é um fator crucial, pois quanto mais rapidamente a tarefa de busca e mapeamento for realizada, maiores as chances de sucesso da operação. Nesse contexto, utilizar um grupo de agentes trabalhando de forma cooperativa reduz consideravelmente o tempo de execução da tarefa, quando comparado à ação de um único agente (Parker et al., 2016).

De fato, a cooperação entre vários agentes aumenta a eficiência na realização da tarefa, como podemos citar os casos de busca e manipulação de objetos em um armazém (Pizetta et al., 2019; Nguyen and Garone, 2016; Villa et al., 2021), ou mesmo no monitoramento e vigilância de áreas (Khaleghi et al., 2015). Ainda de forma mais ampla o uso de formações heterogêneas de robôs (Cai and Kousuke, 2015; Harik et al., 2016; Rice and Horgan, February 10, 2022; Cai and Kousuke, 2015; Bacheti et al., 2021), como a associação entre VANTs (veículos aéreos não tripulados) e VTNTs (veículos terrestres não tripulados), pode trazer benefícios adicionais, quando comparados a formações do tipo homogêneas VTNTs-VTNTs ou VANTs-VANTs. Nesse aspecto, pode-se citar o uso de uma formação VANT-VTNT a fim de se obter informações diversificadas do meio, como uma visão geral de uma área de operação associada a sinais recebidos de um robô terrestre que esteja mapeando o mesmo ambiente. Tais podem ser exemplificados como sons, luzes e vibrações, que podem ser mais facilmente detectados por robôs que estejam próximos às fontes geradoras de tais sinais.

Portanto, neste cenário colaborativo torna-se necessário controlar um grupo de agentes atuando de forma conjunta e coordenada, ou seja, compondo uma formação ou um *cluster*, o que é referido como controle de formação. A principal demanda é que os múltiplos agentes se movam de forma coordenada, movendo toda a formação em conformidade. Este é o caso neste artigo: um controlador é projetado para guiar uma formação composta por um VANT e um VTNT durante uma tarefa de seguimento de trajetória, com a possibilidade de evitar obstáculos não mapeados na trajetória do robô ao longo do percurso.

O cenário de navegação consiste em movimentar a formação de robôs através de um ambiente estático e não estruturado que apresenta obstáculos à passagem do robô terrestre, e que, portanto, devem ser evitados. Por conseguinte, a formação deve ser capaz de desviar-se de sua rota programada para evitar uma eventual colisão com

o obstáculo mais próximo, retomando a sua trajetória programada e a forma desejada da formação após deixar o obstáculo para trás.

No contexto deste artigo, são considerados apenas os obstáculos no solo. Logo, apenas o VTNT é afetado e deve desviar-se dos mesmos, enquanto o VANT deve continuar procurando a posição adequada, de forma a manter a formação. Para lidar com os obstáculos considera-se um campo potencial associado à sua posição central e um controlador que utiliza a abordagem de espaço nulo e priorização de tarefas para mover a formação mantendo sua forma e desviar de obstáculos. Desta forma, a formação é capaz de evitar obstáculos e guiar com segurança os robôs na trajetória especificada.

Em termos de controle de formação, tem-se três paradigmas principais, os quais podem ser descritos como formações líder-seguidor, estrutura virtual e o controle de formação baseado em comportamentos. O paradigma de líder seguidor é baseado na ideia de um agente (o seguidor) imitando o movimento de outro agente (o líder), mas preservando um certo erro de posição em relação ao líder (Brandão et al., 2009; Boel et al., 2015), que é controlado independentemente do seguidor. Embora inicialmente considerando a formação de dois agentes, esse paradigma pode ser estendido para a formação de n robôs (Zhang et al., 2017), considerando um único líder e vários seguidores. A principal restrição desta abordagem é que uma vez que o líder tenha algum problema e seja impedido de navegar, os outros agentes também irão parar, pois estão imitando o movimento do líder.

Quanto ao paradigma da estrutura virtual, não há mais líder. A formação como um todo está associada a um robô virtual sem massa (Lewis and Tan, 1997), cuja posição define a posição de toda a formação. Para mover a formação um controlador deve ser utilizado, de forma que este agente virtual (Bacheti et al., 2021) se mova segundo a tarefa a ser realizada. O movimento desejado do agente virtual gera as velocidades de referência para os robôs individuais da formação (Kitts and Mas, 2009; Brandão et al., 2015; Bacheti et al., 2021), que se moverão, fazendo a formação mover-se. Portanto, há uma relação entre o movimento desejado da formação e a forma como os robôs individuais devem se movimentar para manter a geometria do pelotão.

Finalmente quando consideramos o paradigma de controle baseado em comportamento, a ideia é dividir a tarefa de mover a formação em uma trajetória evitando obstáculos em sub-tarefas (cada uma caracterizando um *comportamento* mais simples (Antonelli et al., 2008)), que são, neste trabalho, manter uma trajetória alvo para a formação e evitar obstáculos. Essas sub-tarefas competem entre si para serem executadas, de modo que diferentes prioridades devem ser atribuídas a cada uma. Assim, a sub-tarefa com maior prioridade será sempre executada primeiro, com as demais sub-tarefas aguardando sua vez. Por razões de segurança, a sub-tarefa de maior prioridade deve ser atribuída a prevenir a colisão com obstáculos no percurso, inibindo por um tempo o seguimento adequado da trajetória, assim como a posição/forma desejados.

Em termos de estrutura de controle, existem duas possibilidades: controle centralizado ou controle descentralizado.

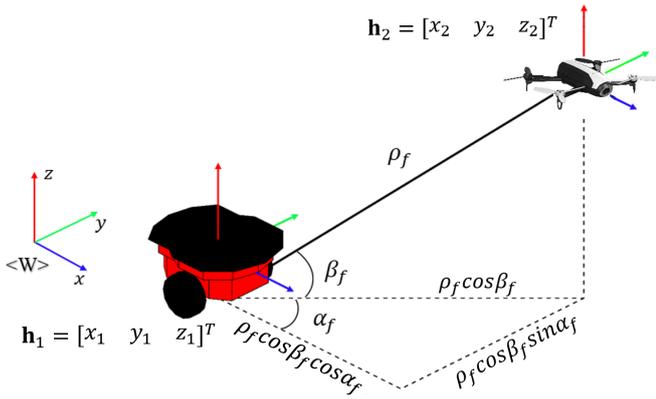


Figura 1. Caracterização da formação composta por um robô Pioneer 3-DX e um quadrimotor Bebop 2.

No primeiro caso, um único computador coleta as informações sobre as posições de todos os robôs individuais na formação, calcula os sinais de controle correspondentes a cada agente e envia tais sinais aos agentes, como em (Brandão et al., 2015; Bacheti et al., 2021). Tal computador pode estar a bordo de um dos agentes ou pode ser um computador externo.

Quanto à estratégia de controle descentralizado, todo agente deve receber as informações sobre as posições de todos os demais agentes da formação, transmitir sua posição aos demais agentes e calcular seu próprio sinal de controle. Observe que em ambos os casos uma rede de comunicação deve ser estabelecida, mas no caso de controle descentralizado ela é muito mais complexa, pois cada agente deve se comunicar com todos os demais agentes para enviar e receber informações. Portanto, tal rede de comunicação pode ser um gargalo quando o número de agentes na formação aumenta.

Para tratar de tais tópicos, este trabalho está dividido em algumas seções, começando pela Seção 2, que detalha a descrição da formação e suas variáveis, bem como a relação entre as variáveis de formação e as posições dos agentes individuais. Na sequência a Seção 3 descreve como cada obstáculo é modelado, enquanto a Seção 4 descreve o controle comportamental baseado em espaço nulo. Continuando, a Seção 5 descreve como se constitui o controlador aqui proposto, e a Seção 6 apresenta resultados simulados que validam o sistema de controle proposto. Por fim, na Seção 7 destacam-se as principais conclusões do trabalho.

2. CARACTERIZAÇÃO DA FORMAÇÃO

Um esboço representando a formação utilizada neste trabalho, incluindo os referenciais e a descrição das variáveis envolvidas, é mostrado na Figura 1.

A estrutura virtual associada a tal formação é a linha reta que liga os dois veículos, representada na Figura 1 como a linha contínua cujo comprimento é ρ_f , e cuja extremidade inferior é o ponto de coordenadas $(x_f = x_1, y_f = y_1, z_f = z_1)$, significando que a posição do robô virtual é a mesma posição do VTNT. Continuando a caracterização da estrutura virtual, ela forma o ângulo β_f com o plano XY , e sua projeção sobre tal plano forma o

ângulo α_f com o eixo X . Na verdade, qualquer ponto do segmento de linha que liga os dois robôs pode ser escolhido como a posição do robô virtual que representa a formação. A escolha pela extremidade inferior, coincidente com o VTNT, está associada à possibilidade do VANT pousar no VTNT, como em automação de armazéns (Harik et al., 2016) ou aplicações de entrega de pacotes (Bacheti et al., 2021), por exemplo. Observe-se, também, a inclusão da coordenada z_1 do VTNT, embora ela seja sempre zero. O objetivo de fazer isso é gerar uma formulação genérica válida também para dois VANTs ($z_1 \neq 0$ e $z_2 \neq 0$) ou dois VTNTs ($z_1 = 0$ $z_2 = 0$ e $\beta_f = 0$).

A partir da Figura 1 pode-se estabelecer as relações entre as variáveis $x_f, y_f, z_f, \rho_f, \beta_f$ e α_f , denominadas variáveis da formação ou *cluster*, e as posições x_1, y_1, z_1, x_2, y_2 , e z_2 dos dois robôs, chamadas de variáveis dos robôs (os subscritos 1 e 2 representam o VTNT e o VANT, respectivamente). Tais relações são descritas como duas transformações, do espaço dos robôs, caracterizado pelas variáveis dos robôs, para o espaço da formação (caracterizado pelas variáveis da formação). Tais transformações são

$$\mathbf{q} = f(\mathbf{x}), \quad (1)$$

para a qual

$$x_f = x_1,$$

$$y_f = y_1,$$

$$z_f = z_1,$$

$$\rho_f = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2},$$

$$\alpha_f = \tan^{-1} \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right), \text{ e}$$

$$\beta_f = \tan^{-1} \left(\frac{z_2 - z_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \right),$$

onde $\mathbf{q} = [x_f \ y_f \ z_f \ \rho_f \ \alpha_f \ \beta_f]^T$ é um vetor que contém as variáveis da formação, e

$$\mathbf{x} = g(\mathbf{q}), \quad (2)$$

para a qual

$$x_1 = x_f,$$

$$y_1 = y_f,$$

$$z_1 = z_f,$$

$$x_2 = x_f + \rho_f \cos(\alpha_f) \cos(\beta_f),$$

$$y_2 = y_f + \rho_f \sin(\alpha_f) \cos(\beta_f), \text{ and}$$

$$z_2 = z_f + \rho_f \sin(\beta_f),$$

em que $\mathbf{x} = [x_1 \ y_1 \ z_1 \ x_2 \ y_2 \ z_2]^T$ é um vetor contendo as variáveis dos robôs.

Usando tais equações pode-se saber como cada robô deve se mover para produzir uma mudança de formação desejada, bem como a formação evolui em consequência da mudança das posições dos dois robôs. Conseqüentemente, delega-se como a formação deve se mover e como sua forma deve variar ao longo do tempo, especifica-se como os robôs individuais devem se mover. Portanto, qualquer controlador proposto para guiar a formação deve gerar comandos de velocidade adequados para os robôs individuais, garantindo assim que a formação se mova para a posição desejada respeitando a forma especificada.

Embora guarde similaridade com o trabalho de Rabelo et al. (2021), em que a mesma formação segue uma trajetória, este trabalho complementa aquele, incluindo no controlador proposto a possibilidade de que o VTNT se desvie da rota atual (para evitar um obstáculo, por exemplo), situação à qual a formação como um todo se adapta. Ainda comparando com (Rabelo et al., 2021), aqui também manter a forma da formação e movê-la é considerada uma única sub-tarefa. Então, como se está considerando o desvio de obstáculos, duas sub-tarefas são efetivamente consideradas. A primeira delas é mover a formação seguindo uma dada trajetória e atingir/preservar sua forma, enquanto a segunda é desviar a formação de obstáculos próximos a ela, sendo esta última a de maior prioridade. Isso significa que quando não há nenhum obstáculo próximo ao VTNT o controlador guia a formação como em (Rabelo et al., 2021), enquanto que na presença de um obstáculo a formação como um todo se desvia de sua rota atual, como será mostrado na Seção 6.

3. FUNÇÃO POTENCIAL

Existem várias técnicas para garantir que um robô evite obstáculos ao navegar, dentro delas uma técnica clássica é baseada no conceito de potencial. O conceito por trás de tal técnica é que os obstáculos são barreiras ao robô, e assim uma função potencial é associada a qualquer obstáculo, de modo que o robô deve navegar por áreas de potencial mínimo, evitando assim os obstáculos. Neste trabalho tal técnica é utilizada para garantir que o robô virtual que caracteriza a formação, e assim o VTNT, evite qualquer obstáculo próximo a ele. Para caracterizar o potencial associado a um obstáculo, é utilizada uma família de curvas do tipo gaussianas (similares a sinus) que caracterizam o campo potencial ao redor de um obstáculo. Esta abordagem adota um valor simétrico da função potencial no plano XY , obtendo o centro da função gaussiana definido pelas coordenadas do centro do obstáculo, com o potencial decrescendo quando as magnitudes de $x - x_{obs}$, $y - y_{obs}$, e $z - z_{obs}$ diminuem. Para modelar este campo potencial, adotou-se a função

$$V(t) = e^{-\left(\frac{dx(t)}{a}\right)^{n_e}} - \left(\frac{dy(t)}{b}\right)^{n_e} - \left(\frac{dz(t)}{c}\right)^{n_e}, \quad (3)$$

onde n_e é um número natural par e positivo, ou seja ($n_e \in N | n_e = 2n \forall n \in N$), e a , b e c são constantes positivas que permitem ajustar o comprimento, largura e altura da função $V(t)$, respectivamente. No que se refere a $dx(t)$, $dy(t)$ e $dz(t)$, tais valores são a diferença entre as posições do VTNT, ou seja, do robô virtual que caracteriza a formação, e do centro do obstáculo considerado. Para múltiplos obstáculos, uma função potencial como a de (3) é definida para cada obstáculo, e o potencial total é a soma dos potenciais de todos os obstáculos, como em (Santos et al., 2017).

Observe-se que tal função potencial é de quatro dimensões. Portanto, sua visualização gráfica não é fácil. No entanto, como se consideram obstáculos apenas para o VTNT, ou seja, no solo, se utiliza $z(t) = 0$ e $z_{obs}(t) = 0$ em (3). Na verdade, essa condição, e consequentemente a função potencial representada na Figura 2, é que será considerada na sequência do artigo.

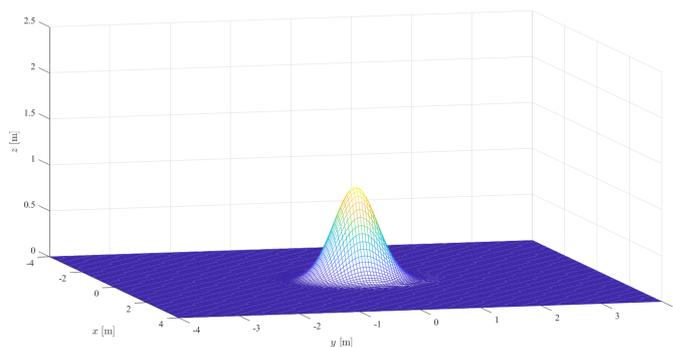


Figura 2. Campo potencial no nível do solo ($z = 0$).

4. CONTROLE BASEADO EM COMPORTAMENTO UTILIZANDO ESPAÇO NULO

A abordagem de controle comportamental baseada em espaço nulo (Antonelli et al., 2008) pode ser considerada como uma forma analítica de implementar uma arquitetura de subsunção (Brooks, 1986). Ela pode envolver vários comportamentos mais simples, em particular para sistemas multirrobo, e fornece uma maneira de executar tarefas conflitantes, projetando-se um único sistema de controle capaz de gerenciar tais conflitos, com garantia de estabilidade (Antonelli et al., 2009). A ideia geral é dividir a tarefa a ser executada pela formação em algumas sub-tarefas, que devem ser executadas de acordo com uma lista de prioridades. Neste trabalho são consideradas duas sub-tarefas, que são navegar a formação VANT-VTNT para seguir uma dada trajetória e desviar de obstáculos no solo que estão próximos a ela. Observe-se que tais sub-tarefas são conflitantes, de modo que diferentes prioridades são atribuídas a elas, para definir uma ordem de execução. Neste caso, evitar obstáculos tem a maior prioridade, enquanto seguir a trajetória é a sub-tarefa de menor prioridade. A abordagem envolve projetar controladores para cada sub-tarefa, como se fossem executados independentemente, e então os sinais de controle gerados pelo controlador associado à sub-tarefa de maior prioridade são aplicados aos robôs da formação, a menos que para realizar esta sub-tarefa não seja necessário (sem obstáculos próximos à formação, por exemplo). Em tal situação, os sinais de controle associados à sub-tarefa de menor prioridade são aplicados aos robôs.

Portanto, dois controladores serão projetados neste trabalho, que são o controlador para guiar a formação do VANT-VTNT para seguir a trajetória desejada, que é idêntico àquele proposto em (Rabelo et al., 2021), e um controlador para orientar o VTNT para desviar de qualquer obstáculo, mantendo-o em áreas do plano XY de baixo potencial $V(t)$. Este segundo controlador é uma adaptação daquele proposto em (Santos et al., 2017) e (Rosales et al., 2016), estes dois últimos projetados para um único quadrimotor e para um grupo de quadrimotores, respectivamente. No entanto, como uma primeira aproximação, apenas obstáculos estáticos são considerados aqui, o que significa que $x_{obs}(t)$, $y_{obs}(t)$ e $z_{obs}(t)$ são constantes. Cada um desses controladores gera comandos de velocidade, que são combinados conforme ilustrado na Figura 3, gerando os comandos de velocidade efetivamente enviados aos robôs na formação.

Nessa figura estão disponíveis dois vetores de comandos de velocidade para o VTNT, um gerado pelo controlador responsável por fazer a formação evitar obstáculos ($[u_o \ \omega_o]^T$) e o outro gerado pelo controlador responsável por guiar a formação para seguir a trajetória ($[u_f \ \omega_f]^T$). Através da expressão $(\mathbf{I} - \mathbf{J}_o^+ \mathbf{J}_o)$, onde \mathbf{J}_o^+ é a pseudo inversa à direita de \mathbf{J}_o , os comandos de velocidade $\dot{\mathbf{x}}_o$ são projetados no espaço nulo da matriz \mathbf{J}_o . Por sua vez, \mathbf{J}^{-1} , \mathbf{K}^{-1} e \mathbf{A}_p^{-1} são, respectivamente, a matriz Jacobiana que mapeia a variação temporal da formação nas velocidades correspondentes dos robôs, no sistema global de coordenadas, a matriz de cinemática inversa da formação, caracterizada por $\mathbf{K}^{-1} = \text{diag}(\mathbf{A}_b^{-1}, \mathbf{A}_p^{-1})$, sendo \mathbf{A}_p^{-1} a matriz de cinemática inversa do VTNT e \mathbf{A}_b^{-1} a matriz de cinemática inversa do VANT.

5. O CONTROLADOR PROPOSTO

Nesta seção os dois controladores referidos no diagrama de blocos da Figura 3 são projetados, e os comandos de velocidade que eles geram são combinados conforme mostrado, dando maior prioridade à sub-tarefa de desvio de obstáculos, conforme discutido na seção anterior. Em primeiro lugar, apenas controladores cinemáticos são considerados, em ambos os casos baseados em cinemática inversa (Antonelli and Chiaverini, 2006).

O primeiro controlador é um controlador cinemático responsável por fazer a formação VANT-VTNT seguir uma dada trajetória. É apenas um controle cinemático porque foi concebido para controlar o robô virtual sem massa que caracteriza a formação. A lei de controle adotada é

$$\dot{\mathbf{q}}_r = \dot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{L}\mathbf{K}_p [\tanh(\mathbf{L}^{-1}\tilde{\mathbf{q}})], \quad (4)$$

onde \mathbf{K}_p é uma matriz de ganho diagonal e positiva definida, \mathbf{L} é uma matriz diagonal real diferente de zero que limita o valor de $\mathbf{L}\mathbf{K}_p [\tanh(\mathbf{L}^{-1}\tilde{\mathbf{q}})]$ entre $\pm\mathbf{K}_p\mathbf{L}$, e $\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q}$ é o erro entre os valores desejados das variáveis que descrevem a formação e seus valores atuais. Com relação a \mathbf{q}_d , tal vetor define a posição alvo na trajetória e a forma desejadas para a formação, enquanto $\dot{\mathbf{q}}_d$ é sua variação no tempo.

Na sequência, a referência de controle $\dot{\mathbf{q}}_r$, que está no espaço da formação, deve ser mapeada para o espaço dos robôs, gerando as velocidades de referência $\dot{\mathbf{x}}_r$ para os dois robôs, agora no espaço dos robôs, embora ainda em coordenadas globais. Isso é feito usando a inversa da matriz Jacobiana \mathbf{J} , que é obtida tomando a derivada temporal de (1), ou seja, $\dot{\mathbf{q}} = \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{x})\dot{\mathbf{x}}$ (veja (Moreira et al.,

2019)), para obter $\dot{\mathbf{x}}_r = \mathbf{J}^{-1}\dot{\mathbf{q}}_r$. Assim, a matriz Jacobiana \mathbf{J} é uma matriz 6×6 , dada por

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_f}{\partial x_1} & \frac{\partial x_f}{\partial y_1} & \frac{\partial x_f}{\partial z_1} & \frac{\partial x_f}{\partial x_2} & \frac{\partial x_f}{\partial y_2} & \frac{\partial x_f}{\partial z_2} \\ \frac{\partial y_f}{\partial x_1} & \frac{\partial y_f}{\partial y_1} & \frac{\partial y_f}{\partial z_1} & \frac{\partial y_f}{\partial x_2} & \frac{\partial y_f}{\partial y_2} & \frac{\partial y_f}{\partial z_2} \\ \frac{\partial z_f}{\partial x_1} & \frac{\partial z_f}{\partial y_1} & \frac{\partial z_f}{\partial z_1} & \frac{\partial z_f}{\partial x_2} & \frac{\partial z_f}{\partial y_2} & \frac{\partial z_f}{\partial z_2} \\ \frac{\partial \rho_f}{\partial x_1} & \frac{\partial \rho_f}{\partial y_1} & \frac{\partial \rho_f}{\partial z_1} & \frac{\partial \rho_f}{\partial x_2} & \frac{\partial \rho_f}{\partial y_2} & \frac{\partial \rho_f}{\partial z_2} \\ \frac{\partial \alpha_f}{\partial x_1} & \frac{\partial \alpha_f}{\partial y_1} & \frac{\partial \alpha_f}{\partial z_1} & \frac{\partial \alpha_f}{\partial x_2} & \frac{\partial \alpha_f}{\partial y_2} & \frac{\partial \alpha_f}{\partial z_2} \\ \frac{\partial \beta_f}{\partial x_1} & \frac{\partial \beta_f}{\partial y_1} & \frac{\partial \beta_f}{\partial z_1} & \frac{\partial \beta_f}{\partial x_2} & \frac{\partial \beta_f}{\partial y_2} & \frac{\partial \beta_f}{\partial z_2} \end{bmatrix},$$

ou

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{d_x}{r} & \frac{d_y}{r} & \frac{d_z}{r} & -\frac{d_x}{r} & -\frac{d_y}{r} & -\frac{d_z}{r} \\ -\frac{d_y}{r} & \frac{d_x}{r} & 0 & \frac{d_y}{r} & -\frac{d_x}{r} & 0 \\ \frac{d_x^2}{r^2 d} & \frac{d_y^2}{r^2 d} & -\frac{d}{r^2} & -\frac{d_x^2}{r^2 d} & -\frac{d_y^2}{r^2 d} & \frac{d}{r^2} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

com $d_x = x_1 - x_2$, $d_y = y_1 - y_2$, $d_z = z_1 - z_2$, $r = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2}$, e $d = \sqrt{d_x^2 + d_y^2}$.

Conhecendo $\dot{\mathbf{x}}_r$, pode-se obter o vetor de comandos de velocidade \mathbf{u} no diagrama de blocos da Figura 3, que é obtido usando a matriz de cinemática inversa da formação $\mathbf{K}^{-1} = \text{diag}(\mathbf{A}_p^{-1}, \mathbf{A}_b^{-1})$, onde \mathbf{A}_p^{-1} e \mathbf{A}_b^{-1} são as matrizes da cinemática inversa do VANT e do VTNT, respectivamente. Neste ponto o vetor \mathbf{u} é dividido em dois sub-vetores, um contendo os comandos de velocidade para o VANT e o outro contendo os comandos de velocidade para o VTNT. Como o VANT não considera obstáculos, pois estão apenas no piso, apenas o VTNT deve ser capaz de desviar de tais obstáculos. Portanto, antes de enviar os comandos de velocidade $[u_f \ \omega_f]^T$ para o VTNT, tais comandos de velocidade devem ser tratados para levar em conta possíveis obstáculos no percurso do VTNT. Isso é feito incluindo um segundo controlador no sistema, conforme ilustrado na Figura 3, que introduz as mudanças necessárias nos comandos de velocidade a serem enviados ao VTNT.

O segundo controlador projetado é semelhante ao proposto em (Santos et al., 2017), mas agora considerando sua aplicação em um veículo terrestre, o robô virtual caracterizando a formação VANT-VTNT. Novamente, é proposto apenas um controlador cinemático. Por isso, a função potencial adotada para caracterizar a presença de um obstáculo será agora reduzida a uma função tridimensional $V(t) = f(x, y)$, que corresponde a fazer o terceiro termo do expoente no lado direito de (3) igual a zero. De tal função, considerando apenas obstáculos estáticos, obtém-se

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial x} \dot{x} + \frac{\partial V}{\partial y} \dot{y}, \quad (6a)$$

ou

$$\dot{V} = \left[\frac{\partial V}{\partial x} \quad \frac{\partial V}{\partial y} \right] [\dot{x}_o \ \dot{y}_o]^T = \mathbf{J}_o [\dot{x}_o \ \dot{y}_o]^T, \quad (6b)$$

onde

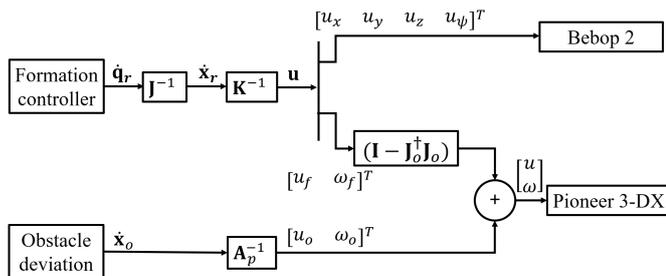


Figura 3. Uma representação simples da abordagem de controle comportamental baseado em espaço nulo.

$$\frac{\partial V}{\partial x} = V n_e \frac{(dx)^{n_e-1}}{a^{n_e}} \quad \text{and} \quad \frac{\partial V}{\partial y} = V n_e \frac{(dy)^{n_e-1}}{b^{n_e}}. \quad (6c)$$

Com base em tal comportamento pode-se projetar um controlador cinemático, correspondendo à lei de controle

$$\dot{\mathbf{x}}_o = [u_o \ \omega_o]^T = \mathbf{J}_o^\dagger (\dot{V}_d + \mathbf{K}_{obs} \tilde{V}), \quad (7)$$

onde V_d é o valor desejado para a função potencial, neste caso um pequeno valor positivo, pois o robô deve navegar por zonas de baixo potencial, \dot{V}_d é sua derivada temporal, valor aproximado para zero, também porque o robô deve navegar por áreas de baixo potencial, e \mathbf{K}_{obs} é uma matriz de ganho diagonal e positiva definida.

Agora, ainda referindo-se à Figura 3, as velocidades comandadas u_f e ω_f devem ter menor prioridade no paradigma de controle baseado em espaço nulo, em comparação com u_o e ω_o . Assim, u_f e ω_f são projetados no espaço nulo da matriz Jacobiana \mathbf{J}_o , o que é feito multiplicando tais comandos por $(\mathbf{I} - \mathbf{J}_o^\dagger \mathbf{J}_o)$. Desta forma, o sistema de controle completo da Figura 3 é implementado.

Por fim, vale à pena comentar que o controlador proposto também pode ser utilizado para uma tarefa de posicionamento, bastando fazer \mathbf{q}_d constante e $\dot{\mathbf{q}}_d = \mathbf{0}$. Além disso, com algumas adaptações (Bacheti et al., 2021) ele também pode ser adotado para realizar tarefas de seguimento de caminho.

6. RESULTADOS

Nesta seção o controlador da Figura 3 é utilizado para guiar a formação em uma tarefa de seguimento de trajetória. Dessa forma, tem-se \mathbf{q}_d como uma função de tempo (a trajetória a ser rastreada) com sua derivada temporal $\dot{\mathbf{q}}_d$ definindo a velocidade desejada em cada instante. Entretanto, os resultados ainda são apenas simulações, prevendo-se realizar experimentos na continuidade do trabalho.

Para a simulação as posições iniciais dos dois robôs são $\mathbf{h}_{10} = [0 \ m \ 0 \ m \ 0 \ m]^T$, para o VTNT, e $\mathbf{h}_{20} = [1 \ m \ 1 \ m \ 0.75 \ m]^T$, para o VANT. A formação desejada é $\mathbf{q}_d = [x_d(t) \ m \ y_d(t) \ m \ 0 \ m \ 1.5 \ m \ 0 \ rad \ \pi/3 \ rad]^T$, para a qual tem-se as variações temporais desejadas $\dot{\mathbf{q}}_d = [\dot{x}_d(t) \ m/s \ \dot{y}_d(t) \ m/s \ 0 \ m/s \ 0 \ m/s \ 0 \ rad/s \ 0 \ rad/s]^T$.

Quanto às matrizes de ganho e saturação associadas ao controlador da formação, adotaram-se os valores $\mathbf{K}_p = \text{diag}[1 \ 1 \ 0 \ 2 \ 4 \ 7]$ e a matriz identidade 6×6 , respectivamente, enquanto que para a matriz de ganho associada ao controlador responsável pelo desvio do obstáculos adotou-se $\mathbf{K}_{obs} = \text{diag}[1 \ 10]$. Observe-se que $\mathbf{K}_p(3, 3) = 0$, porque $z_f = z_1 = 0$ o tempo todo (a altitude do VTNT). Com relação ao controlador para desvio de obstáculos, foi estabelecido um valor desejado para a função potencial de $V_d = 0.05$, com $\dot{V}_d = 0$. No que se refere à trajetória a ser seguida pelo VTNT, e consequentemente pela formação, ela é caracterizada por

$$\mathbf{x}_d = [x_d(t) \ y_d(t)]^T = [a \cos \omega t \ b \sin \omega t]^T, \quad (8)$$

para a qual

$$\dot{\mathbf{x}}_d = [\dot{x}_d(t) \ \dot{y}_d(t)]^T = [-\omega a \sin \omega t \ \omega b \cos \omega t]^T, \quad (9)$$

onde $a = 4 \ m/s$, $b = 2 \ m/s$ e $\omega = 0,2 \ rad/s$. Por fim, dois obstáculos são considerados, o primeiro localizado em $(x_{o1}, y_{o1}, z_{o1}) = (3 \ m, 3 \ m, 0 \ m)$ e o segundo localizado em $(x_{o2}, y_{o2}, z_{o2}) = (5 \ m, 4 \ m, 0 \ m)$, sendo os parâmetros das curvas gaussianas a eles correspondentes $n_e = 2$, $a = 0,5$, $b = 0,5$ e $c = 0$.

O VTNT se direciona ao ponto de referência que está se deslocando sobre a trajetória desejada, e uma vez alcançado tal ponto ele segue a mesma. No entanto, há obstáculos localizados no seu caminho, de modo que o VTNT, e portanto a formação, deve se desviar de sua rota a fim de evitar uma colisão com o obstáculo.

A Figura 4 fornece uma visão 3D da simulação, onde se pode ver o conjunto de curvas gaussianas que se assemelham a sinos representando o obstáculo no meio da trajetória desejada, enquanto a Figura 5 mostra as vistas superior e laterais dos percursos dos dois robôs no cumprimento da tarefa.

Por fim, a Figura 6 mostra a evolução dos erros nas variáveis de formação ao longo da navegação, onde se percebe que todas as variáveis de formação convergem para seus valores desejados, ou seja, os erros em tais variáveis convergem para zero, quando a formação deixa os obstáculos para trás, após ter havido um crescimento dos erros quando o VTNT se desvia da trajetória para evitar um obstáculo. Ou seja, para valores de potencial abaixo do valor desejado estabelecido o controlador move a formação no sentido de seguir a trajetória desejada. Porém, quando o robô terrestre atinge um alto potencial, ele começa a ser empurrado para direções em que o potencial está abaixo do desejado. O controlador comportamental baseado em espaço nulo, nesse momento, atua passando do seguimento de trajetória para evitar um obstáculo, pois a prioridade é evitar colisões.

Portanto, o controlador busca um ponto de equilíbrio onde o potencial esteja dentro dos limites configurados. Em termos de controle, o controlador de comportamento baseado em espaço nulo equilibra as sub-tarefas seguir a trajetória e evitar obstáculos, ou seja, para potenciais próximos do valor desejado o controlador alterna entre as duas tarefas, tentando ficar em uma região cujo potencial

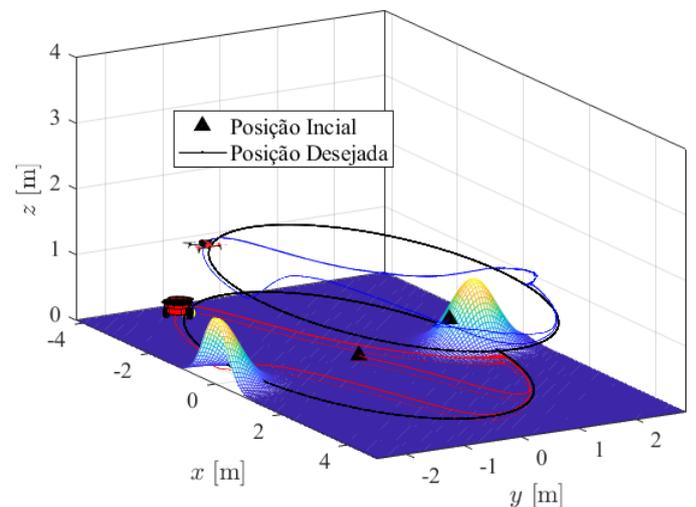


Figura 4. Vista 3D da simulação.

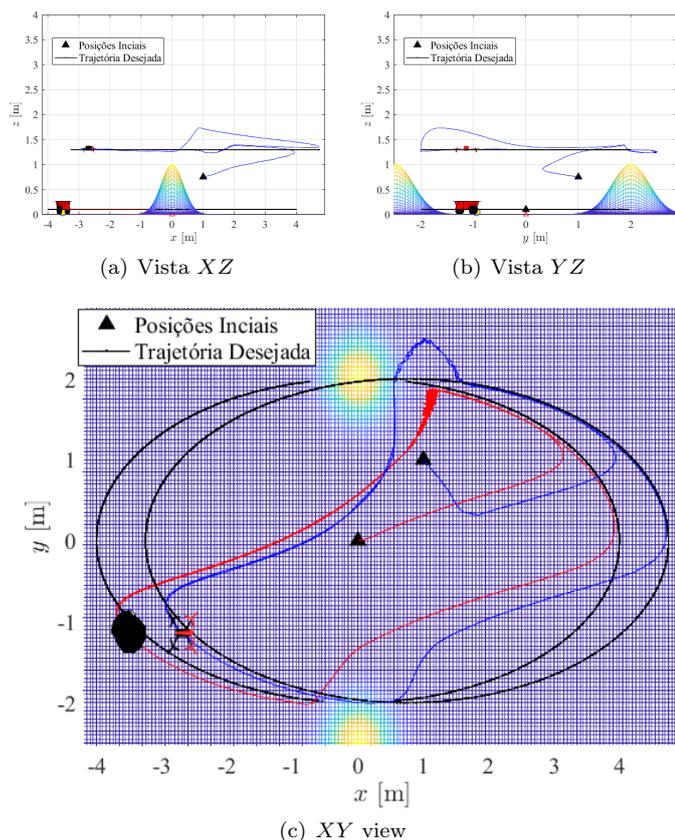


Figura 5. Vistas XZ, YZ e XY correspondentes à Figura 4.

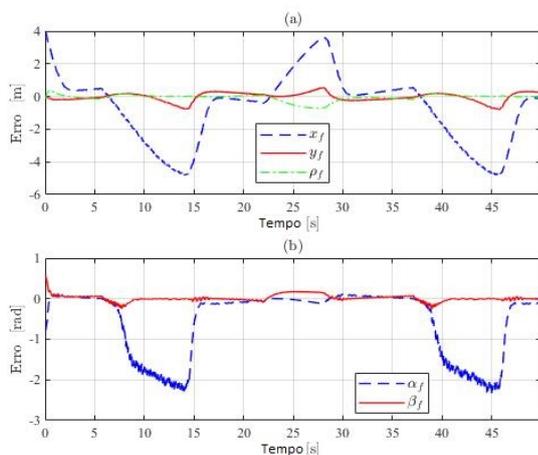


Figura 6. Erros nas variáveis da formação.

é abaixo do valor desejado. Tal comutação de tarefas introduz um ligeiro comportamento oscilatório, que é observado especialmente quando o robô terrestre entra em uma região de potencial acima do limite estabelecido. No entanto, após iniciar a manobra para evitar o obstáculo, quanto mais distante do obstáculo estiver o VTNT, menos evidente é esse comportamento oscilatório, e a navegação torna-se mais suave, pois a função potencial não influencia mais os sinais de controle do VTNT. Uma estratégia para evitar grandes oscilações é associar um alto valor de ganho a ω_o (60, neste trabalho), comparado ao ganho associado a u_o (5, neste trabalho). Assim, quando o VTNT enfrenta

um alto valor de potencial e o controlador de desvio de obstáculos começa a funcionar, mais ênfase é colocada em girar a direção do robô, ao invés de seguir em frente.

Em outras palavras, o controlador proposto é efetivo em guiar a formação no cumprimento da tarefa desviando de eventuais obstáculos que obstruam o movimento do VTNT.

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um sistema de controle para guiar uma formação composta por um VTNT e um VANT cooperando para realizar uma tarefa de seguir uma trajetória elíptica desejada. Ao longo do percurso a posição desejada para a formação é obstruída por um obstáculo, emulando uma aplicação em que a formação navega em áreas não estruturadas com obstáculos estáticos, como caixas e prateleiras em armazéns, por exemplo. A ideia é que o VANT mantenha uma certa posição em relação ao VTNT em toda a trajetória percorrida por eles, mesmo quando mediante a presença de um obstáculo no caminho. A abordagem proposta consiste em controlar a formação VTNT-VANT associando-a a uma estrutura virtual, neste caso a linha reta imaginária que une os dois veículos. Para evitar um obstáculo é utilizado um segundo controlador, e esses dois controladores configuram um sistema de controle baseado na abordagem comportamental de espaço nulo, em que há alternância entre essas duas sub-tarefas que são representadas como mover a formação mantendo sua forma e evitar obstáculos próximos.

Resultados de simulação, considerando dois obstáculos posicionados na trajetória elíptica, são mostrados e discutidos no artigo, os quais validam o sistema de controle proposto. Para dar continuidade a esta pesquisa, pretende-se realizar experimentos reais, aplicar o controlador proposto em tarefas de seguimento de caminho, e incluir também obstáculos aéreos, que afetariam apenas o VANT, visando mostrar a generalidade do sistema de controle proposto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e à FAPES - Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo, órgão do Estado do Espírito Santo, por financiarem este trabalho. O doutorando também agradece ao CNPq pela bolsa de estudos a ele concedida, por permitir-lhe trabalhar integralmente em sua pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Antonelli, G., Arrichiello, F., and Chiaverini, S. (2008). The null-space-based behavioral control for autonomous robotic systems. *Intelligent Service Robotics*, 1(1), 27–39. doi:10.1007/s11370-007-0002-3.
- Antonelli, G., Arrichiello, F., and Chiaverini, S. (2009). Stability analysis for the null-space-based behavioral control for multi-robot systems. 2463 – 2468. doi: 10.1109/CDC.2008.4738697.
- Antonelli, G. and Chiaverini, S. (2006). Kinematic control of platoons of autonomous vehicles. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(6), 1285–1292. doi:10.1109/TRO.2006.886272.

- Bacheti, V.P., Brandão, A.S., and Sarcinelli-Filho, M. (2021). A path-following controller for a uav-ugv formation performing the final step of last-mile-delivery. *IEEE Access*, 9, 142218–142231. doi:10.1109/ACCESS.2021.3120347.
- Bai, X., Cao, M., Yan, W., and Ge, S.S. (2020). Efficient routing for precedence-constrained package delivery for heterogeneous vehicles. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17(1), 248–260. doi:10.1109/TASE.2019.2914113.
- Boel, R.K., Marinica, N.E., and Sarlette, A. (2015). Leader-follower cooperative control paradigm, with applications to urban traffic coordination control. In *2015 European Control Conference (ECC)*, 2208–2215.
- Brandão, A.S., Rampinelli, V.T.L., Martins, F.N., Sarcinelli-Filho, M., and Carelli, R. (2015). The multilayer control scheme: A strategy to guide n -robots formations with obstacle avoidance. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 26(3), 201–214.
- 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. Malaga, Spain.
- Brooks, R. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 2(1), 14–23. doi:10.1109/JRA.1986.1087032.
- Cai, Y. and Kousuke, S. (2015). Geometric relation matching based object identification for uav and ugv cooperation. In *Technologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAI), 2015 Conference on*, 478–483. IEEE.
- Chen, S., Laefer, D.F., and Mangina, E. (2016). State of technology review of civilian uavs. *Recent Patents on Engineering*, 10(3), 160–174. doi:10.2174/1872212110666160712230039.
- Harik, E.H.C., Guérin, F., Guinand, F., Brethé, J.F., and Pelvillain, H. (2016). Towards an autonomous warehouse inventory scheme. In *2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, 1–8. doi:10.1109/SSCI.2016.7850056.
- Jiang, B.W., Kuo, C.H., Peng, K.J., Peng, K.C., Hsiung, S.H., and Kuo, C.M. (2019). Thrust vectoring control for infrastructure inspection multirotor vehicle. In *2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, 209–213. doi:10.1109/IEA.2019.8714892.
- Jordan, S., Moore, J., Hovet, S., Box, J., Perry, J., Kirsche, K., Lewis, D., and Tse, Z.T.H. (2018). State-of-the-art technologies for UAV inspections. *IET Radar, Sonar Navigation*, 12(2), 151–164. doi:10.1049/iet-rsn.2017.0251.
- Khaleghi, A.M., Xu, D., Minaeian, S., Yuan, Y., Liu, J., and Son, Y.J. (2015). Analysis of UAV/UGV control strategies in a DDDAMS-based surveillance system. In *IIE Annual Conference. Proceedings*, 2283. Institute of Industrial and Systems Engineers (IIE).
- Kitts, C. and Mas, I. (2009). Cluster space specification and control of mobile multirobot systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 14(2), 207–218. doi:10.1109/TMECH.2009.2013943.
- Lewis, M.A. and Tan, K.H. (1997). High precision formation control of mobile robots using virtual structures. *Autonomous Robots*, 4(4), 387–403. doi:10.1023/A:1008814708459.
- Moreira, M.S.M., Brandão, A.S., and Sarcinelli-Filho, M. (2019). Null space based formation control for a uav landing on a ugv. In *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 1389–1397. doi:10.1109/ICUAS.2019.8797820.
- Nguyen, T. and Garone, E. (2016). Control of a uav and a ugv cooperating to manipulate an object. In *American Control Conference (ACC), 2016*, 1347–1352. IEEE.
- Parker, L.E., Rus, D., and Sukhatme, G.S. (2016). Multiple mobile robot systems. In B. Siciliano and O. Khatib (eds.), *Springer Handbook of Robotics*, chapter 53, 1335–1384. Springer, Oxford.
- Pizetta, I.H.B., ao, A.S.B., and Sarcinelli-Filho, M. (2019). Avoiding obstacles in cooperative load transportation. *ISA Transactions (online acces)*. doi:https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.01.019.
- Rabelo, M.F.S., Brandão, A.S., and Sarcinelli-Filho, M. (2021). Landing a uav on static or moving platforms using a formation controller. *IEEE Systems Journal*, 15(1), 37–45. doi:10.1109/JSYST.2020.2975139.
- Rice, M. and Horgan, B. (February 10, 2022). Nasa Perseverance rover's first major successes on Mars – an update from mission scientists. ScitechDaily. URL <https://scitechdaily.com/nasa-perseverance-rover-first-major-successes-on-mars-an-update-from-mission-scientists/>.
- Rosales, C., Leica, P., Sarcinelli-Filho, M., Scaglia, G., and Carelli, R. (2016). 3d formation control of autonomous vehicles based on null-space. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 84(1-4), 453–467.
- Santos, M.C.P., Rosales, C.D., Sarcinelli-Filho, M., and Carelli, R. (2017). A novel null-space-based uav trajectory tracking controller with collision avoidance. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(6), 2543–2553. doi:10.1109/TMECH.2017.2752302.
- Schneider, D. (2020). The delivery drones are coming. *IEEE Spectrum*, 57(1), 28–29. doi:10.1109/MSPEC.2020.8946304.
- Villa, D.K.D., Brandão, A.S., and Sarcinelli-Filho, M. (2020). A survey on load transportation using multirotor UAVs. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 98(2), 267–296. doi:10.1007/s10846-019-01088-w.
- Villa, D.K.D., Brandão, A.S., Carelli, R., and Sarcinelli-Filho, M. (2021). Cooperative load transportation with two quadrotors using adaptive control. *IEEE Access*, 9, 129148–129160. doi:10.1109/ACCESS.2021.3113466.
- Zhang, C. and Kovacs, J.M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision agriculture*, 13(6), 693–712. doi:10.1007/s11119-012-9274-5.
- Zhang, D., Xu, Z., Srinivasan, D., and Yu, L. (2017). Leader-follower consensus of multiagent systems with energy constraints: A markovian system approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47(7), 1727–1736. doi:10.1109/TSMC.2017.2677471.