DOI: 10.48011/asba.v2i1.1478

Seguimento de Caminho Usando Espaço Nulo para uma Formação VANT-VTNT

Vinícius Pacheco Bacheti * **Alexandre Santos Brandão** ** **Mário Sarcinelli-Filho** ***

* *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, (e-mail: vinicius.bacheti@gmail.com).*
** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Viçosa, MG (e-mail: alexandre.brandao@ufv.br)*
*** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, (e-mail: mario.sarcinelli@ufes.br)*

Abstract: This paper addresses the control of a formation composed of an unmanned ground vehicle (VTNT) and an unmanned aerial vehicle (VANT) using the concepts of Null Space. The formation navigates in a coordinated way, with the VANT following the VTNT while keeping a relative pose with respect to it while the VTNT follows a specified path, so that the VANT can land on it at any desired instant. In this sense, Null Space techniques are used in order to improve the relative pose between the robots, increasing the landing operation reliability. Experimental results are presented, which validate this paper approach to accomplish the proposed task.

Resumo: Neste artigo é discutido o controle de uma formação composta por um veículo terrestre não tripulado (VTNT) e um veículo aéreo não tripulado (VANT) utilizando conceitos de Espaço Nulo. A formação navega de maneira coordenada, com o VANT seguindo o VTNT, mantendo uma pose relativa em relação a ele, enquanto o VTNT segue um caminho especificado, para que o VANT possa pousar nele a qualquer momento desejado. Neste sentido, as técnicas de Espaço Nulo são utilizadas para melhorar a pose relativa entre os robôs e, consequentemente, aumentar a confiabilidade do pouso. São apresentados resultados experimentais, os quais validam a abordagem adotada para realizar tal tarefa.

Keywords: Mobile Robotics; Robot Formation; Unmanned Aerial Vehicle; Unmanned ground Vehicle; Path Following; Null Space.

Palavras-chaves: Robótica Móvel; Formação de Robôs; Veículo Aéreo Não Tripulado; Veículo Terrestre Não Tripulado; Seguimento de Caminho; Espaço Nulo.

1. INTRODUÇÃO

Entre as aplicações de robótica, há casos em que um time de robôs permite uma maior eficiência no cumprimento da tarefa, seja pela redução do tempo requerido ou pela redução do custo, uma vez que um time de robôs genéricos pode ser mais barato para a execução da tarefa do que um robô altamente especializado, como citado em (Parker, 2016) e (Rabelo et al., 2020).

Tais aplicações podem incluir transporte de cargas, como em (Meissen et al., 2017), (Shirani et al., 2019) e (Villa et al., 2019), em que a própria forma da carga pode ser determinante para o uso de um grupo de robôs (Villa et al., 2019), e mapeamento de áreas, como em (Kim et al., 2014), (Lyu et al., 2015) e (Qin et al., 2019), entre outras. Além disso, o uso de grupos de robôs viabiliza a redundância de informação, garantindo a execução da tarefa mesmo diante da falha de algum robô, como é o caso em (Ernandes-Neto et al., 2019), ou da diversidade no ambiente de atuação, como em (Sharma and Kumar, 2015). Por fim, a interação de veículos aéreos e terrestres permite a superação de algumas limitações de cada robô, aumentando as possibilidades de novas aplicações (Tokekar et al., 2016; Rabelo et al., 2020).

De maneira geral, as aplicações de robôs que atuam de forma coordenada, ou seja, de formações de robôs, podem ser as mais diversas, como busca de um ponto objetivo, seguimento de uma trajetória pré-definida ou seguimento de um caminho pré-definido. Em qualquer desses casos podem-se citar duas tarefas parciais básicas, que são mover a formação para um ponto desejado (Moreira et al., 2019), fazê-la seguir uma trajetória desejada (Ernandes-Neto et al., 2019), ou fazê-la seguir um caminho, que é o caso deste trabalho. Mais ainda, o paradigma a ser usado no controle da formação, neste trabalho, é o da estrutura virtual (Lewis and Tan, 1997), a qual consiste em uma figura geométrica que descreve a forma da formação e sua dimensão. Exemplos de tais estruturas são um triângulo, como em (Kitts and Mas, 2009) e uma reta, como em (Rabelo et al., 2020).

Para a navegação da formação adota-se um ponto de referência, que pode ser o centroide da estrutura virtual

⋆ Trabalho financiado pelo CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e pela FAPES - Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo.

(Kitts and Mas, 2009) ou mesmo uma extremidade de tal estrutura, como em Rabelo et al. (2020) e neste trabalho. Neste último caso um ponto conveniente é a extremidade da linha reta que coincide com o robô terrestre (se consideram um robô terrestre e um aéreo). Um robô pontual e sem massa é colocado em tal ponto, o qual, ao mover-se, move toda a formação. Portanto, a tarefa de mover a formação, neste trabalho, consiste em fazer o robô virtual que a caracteriza seguir um caminho no mundo, ao mesmo tempo que mantém a forma da estrutura virtual, a qual é um reflexo das posições dos robôs que a compõem. Portanto, podem-se considerar, basicamente, duas tarefas parciais (Moreira et al., 2019).

Quando diferentes tarefas entram em contradição, faz-se necessário o uso de técnicas que permitam hierarquizá-las, via as prioridades a elas atribuídas. O uso do Espaço Nulo, como visto em (Antonelli et al., 2008), permite tal hierarquização de maneira analítica, evitando a comutação entre diferentes controladores.

Em tal contexto, este artigo utiliza a técnica de espaço nulo e define diferentes prioridades para as tarefas de mover a formação e manter a forma da formação, considerando uma formação composta por um Veículo aéreo não tripulado (VANT) e um veículo terrestre não tripulado (VTNT).

A tarefa de navegação considerada é o seguimento de caminho (Resende et al., 2013), onde o robô virtual que corresponde à formação deve seguir um caminho específico, sendo que sua velocidade pode ser definida livremente, já que o caminho é estático. Isto difere das tarefas de posicionamento, onde a velocidade desejada é nula, e de seguimento de trajetória, onde a velocidade desejada é uma função da trajetória. Ao se discutir aplicações em condições reais, onde podem existir obstáculos, sinais vermelhos, outros veículos na pista, a possibilidade de alteração da velocidade é essencial, o que torna o seguimento de caminho vantajoso em relação às outras estratégias citadas, usadas por Moreira et al. (2019) e Ernandes-Neto et al. (2019), respectivamente.

Para discussão destes tópicos, o artigo, a partir deste ponto, é dividido em seis seções, começando com a Seção 2, que define a relação entre o espaço dos robôs e o espaço da formação composta pelos mesmos, e a Seção 3, onde a estratégia de seguimento de caminho é descrita. Na sequência, a Seção 4 mostra de que maneira os conceitos de espaço nulo serão usados para o cumprimento da tarefa, enquanto a Seção 5 formaliza os controladores que serão utilizados. Por fim, a Seção 6 mostra os resultados de experimentos conduzidos utilizando-se o VANT *Bebop 2* e o VTNT *Pioneer-3DX* e a Seção 7 discute as conclusões do trabalho.

2. CARACTERIZAÇÃO DA FORMAÇÃO

A formação se caracteriza por uma linha reta virtual no espaço 3D, que interliga o robô terrestre e o robô aéreo, conforme mostra a Figura 1. Portanto, a estrutura virtual que será controlada é a reta imaginária que interliga os dois veículos, com o robô virtual usado para guiar a formação coincidindo com o VTNT, ou seja, numa extremidade da reta, assim como ocorre em (Rabelo et al., 2020).

Portanto, se definem dois espaços de variáveis, a saber, o espaço da formação, correspondente às variáveis da formação, que descrevem a estrutura virtual (posição e forma), e o espaço dos robôs, caracterizado pelas variáveis dos robôs, que são suas posições no espaço 3D. As variáveis de formação são $(x_f,\ y_f,\ z_f)$, a posição no espaço 3D do robô virtual, a distância ρ_f entre o VTNT e o VANT, o ângulo α_f entre a projeção da estrutura virtual no plano XY e o eixo X, e o ângulo β_f entre a estrutura virtual e o eixo Z, que são agrupadas no vetor

$$\mathbf{q} = [x_f\ y_f\ z_f\ \rho_f\ \alpha_f\ \beta_f]^T. \tag{1}$$

Já as variáveis dos robôs, ou seja, as posições $\mathbf{h}_1 = [x_1\ y_1\ z_1]^T$ do VTNT e $\mathbf{h}_2 = [x_2\ y_2\ z_2]^T$ do VANT, são agrupadas no vetor

$$\mathbf{x} = \left[\mathbf{h}_1^T\ \mathbf{h}_2^T\right]^T = [x_1\ y_1\ z_1\ x_2\ y_2\ z_2]^T. \tag{2}$$

As relações entre as variáveis da formação e as variáveis dos robôs se definem por duas transformações, a saber, $\mathbf{q} = f(\mathbf{x})$ e $\mathbf{x} = f^{-1}(\mathbf{q})$, as quais são obtidas a partir da geometria da formação. Em particular,

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} x_f = x_1 \\ y_f = y_1 \\ z_f = z_1 \\ \rho_f = \sqrt{(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2 + (z_2-z_1)^2} \\ \alpha_f = \arctan\left(\dfrac{y_2-y_1}{x_2-x_1}\right) \\ \beta_f = \arctan\left(\dfrac{z_2-z_1}{\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2}}\right) \end{bmatrix}. \tag{3}$$

Por sua vez, o movimento da formação se relaciona ao movimento dos robôs através de $\dot{\mathbf{q}} = \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial \mathbf{x}}\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{x})\dot{\mathbf{x}}$, onde $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ é a matriz Jacobiana de (3).

3. SEGUIMENTO DE CAMINHO

O objetivo de uma tarefa de seguimento de caminho é alcançar e seguir um caminho definido no ambiente de trabalho, sem restrições de tempo. Ou seja, neste tipo de tarefa a magnitude da velocidade desejada do robô pode ser definida livremente. Entretanto, esta deve ser sempre tangencial ao caminho, para assegurar que o robô não saia dele.

Define-se $c_n = \left[c_{n_x}\ c_{n_y}\ c_{n_z}\right]^T$ como o ponto do caminho mais próximo de $[x_f\ y_f\ z_f]^T$, e $\tilde{n}$ como a distância entre

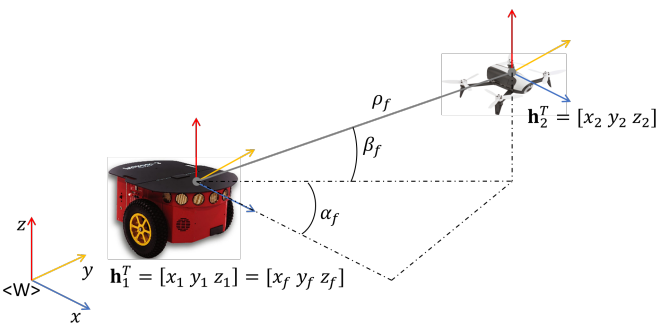


Figura 1. Descrição da formação VTNT-VANT usada.

estes pontos. Além disso, $\mathbf{t}$ é o vetor unitário tangente à c_n e $\psi_{\mathbf{t}}$ é a orientação deste vetor no sistema inercial de referência. As posições e velocidades desejadas do robô

$$\mathbf{q}_d = [x_{f_d}\ y_{f_d}\ z_{f_d}\ \rho_{f_d}\ \alpha_{f_d}\ \beta_{f_d}]^T \text{ e}$$
$$\dot{\mathbf{q}}_d = \left[\dot{x}_{f_d}\ \dot{y}_{f_d}\ \dot{z}_{f_d}\ \dot{\rho}_{f_d}\ \dot{\alpha}_{f_d}\ \dot{\beta}_{f_d}\right]^T, \quad (4)$$

respectivamente, devem então assumir valores que cumpram as características mencionadas no parágrafo anterior.

Como em (Bacheti et al., 2020), pode-se definir estes valores como

$$\begin{bmatrix} x_{f_d} \\ y_{f_d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{n_x} \\ c_{n_y} \end{bmatrix} \quad (5)$$

e

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{f_d} \\ \dot{y}_{f_d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_e \cos\psi_T \\ V_e \sin\psi_T \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde z_{f_d} e $\dot{z}_{f_d}$ foram omitidos pois, neste trabalho, o robô virtual é coincidente com o VTNT, que sempre navega no plano XY, e $[\rho_{f_d}\ \alpha_{f_d}\ \beta_{f_d}]^T$ e $\left[\dot{\rho_{f_d}}\ \dot{\alpha_{f_d}}\ \dot{\beta_{f_d}}\right]^T$ também foram omitidos, pois as variáveis responsáveis pela forma da estrutura virtual não têm influência no seguimento de caminho do robô virtual. A referência de velocidade para o caminho é V_e, definida por

$$V_e = \begin{cases} 0 & \text{for } \tilde{n} > e_c, \\ V_d & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (7)$$

sendo e_c um valor de limiar selecionado para o erro de posição e V_d a velocidade desejada do robô virtual ao longo do caminho.

Estes valores de $\mathbf{q}_d$ e $\dot{\mathbf{q}}_d$ serão utilizados no controlador discutido na Seção 5 como referências para garantir o cumprimento da tarefa de seguimento de caminho.

4. ESPAÇO NULO

O controle da formação discutida pode ser entendido como uma tarefa única onde os robôs que a compõem buscam ao mesmo tempo posicioná-la no mundo e manter a forma desejada para a mesma. Por outro lado, existem situações onde pode ser mais vantajoso priorizar o posicionamento do robô virtual em detrimento da forma da estrutura, ou vice-versa. Desta forma, busca-se uma maneira de separar uma tarefa única de controle em duas tarefas, além de se garantir uma hierarquia desejada de cumprimento de tais tarefas.

O método escolhido neste trabalho, Controle Baseado em Espaço Nulo, é apresentado em (Antonelli et al., 2008), onde além de haver uma separação analítica entre as tarefas, o que pretere a necessidade de comutação de controladores, existe a garantia do cumprimento da tarefa de mais alta prioridade, enquanto o cumprimento das tarefas de menor prioridade é realizado apenas quando não houver conflito com tarefas de maior prioridade. Entretanto, esta técnica requer uma expressão analítica diferenciável para cada tarefa.

As variáveis de formação, como definidas em (1), podem ser reescritas como $\mathbf{q} = \left[\mathbf{q}_p^T\ \mathbf{q}_s^T\right]^T$, onde $\mathbf{q}_p^T = [x_f\ y_f\ z_f]$ representa as variáveis de posição do robô virtual em relação ao mundo, e $\mathbf{q}_s^T = [\rho_f\ \alpha_f\ \beta_f]$ representa as variáveis de forma, ou *shape*, da estrutura virtual no espaço 3D.

Esta estratégia permite a separação da Jacobiana $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ de (3) em duas, a saber,

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_p(\mathbf{x}) \\ \mathbf{J}_s(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

em que $\mathbf{J}_p(\mathbf{x})$ mapeia o efeito que as velocidades dos dois robôs tem nas velocidades do robô virtual, e $\mathbf{J}_s(\mathbf{x})$ mapeia o efeito destas mesmas velocidades nas variações temporais da forma da estrutura virtual. Desta maneira, se caracterizam duas tarefas diferentes, com expressões analíticas diferenciáveis.

Considerando $\dot{\mathbf{q}}_r$ o sinal de controle fornecido pelo controlador de formação, discutido na Seção 5, a expressão

$$\dot{\mathbf{x}}_r = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}_r \quad (9)$$

define o mapeamento dos sinais de controle da formação para sinais de controle para os robôs (passando do espaço da formação para o espaço dos robôs). Para a aplicação da técnica de espaço nulo tal equação é modificada, separando-se a matriz Jacobiana original em seus elementos formadores. Daí, enquanto a tarefa de maior prioridade é tratada da mesma forma, apenas usando a submatriz Jacobiana correspondente, a tarefa com menor prioridade é projetada no espaço nulo da submatriz Jacobiana correspondente à tarefa de maior prioridade. Por exemplo, considerando a tarefa de posicionamento do robô virtual como aquela de maior prioridade altera-se (9) para

$$\dot{\mathbf{x}}_r = \mathbf{J}_p^\dagger \dot{\mathbf{q}}_{p_r} + (\mathbf{I} - \mathbf{J}_p^\dagger \mathbf{J}_p)\mathbf{J}_s^\dagger \dot{\mathbf{q}}_{s_r}, \quad (10)$$

onde $\dot{\mathbf{q}}_{p_r}$ e $\dot{\mathbf{q}}_{s_r}$ são os sinais de controle da formação referentes ao seu posicionamento e forma, respectivamente, $\mathbf{I}$ é uma matriz identidade de dimensão apropriada, e $\mathbf{J}_p^\dagger$ e $\mathbf{J}_s^\dagger$ são as pseudo inversas de $\mathbf{J}_p$ e $\mathbf{J}_s$ (tratam-se de matrizes não quadradas).

Por outro lado, caso a tarefa de manutenção da forma da estrutura virtual seja considerada como prioritária (9) se torna

$$\dot{\mathbf{x}}_r = \mathbf{J}_s^\dagger \dot{\mathbf{q}}_{s_r} + (\mathbf{I} - \mathbf{J}_s^\dagger \mathbf{J}_s)\mathbf{J}_p^\dagger \dot{\mathbf{q}}_{p_r}. \quad (11)$$

Tais equações serão utilizadas na estrutura de controle, após a definição de qual tarefa a formação deve priorizar.

5. CONTROLADORES

Nesta seção serão discutidos os controladores utilizados neste trabalho. O principal, o controlador da formação, é o responsável por reduzir os erros de seguimento do caminho pela formação a zero. Além disso, um bloco de compensação dinâmica é introduzido para compensar os efeitos dinâmicos do movimento no VANT *Bebop 2*. Por último, um controlador de orientação para o VANT, e uma estratégia de redução de velocidade em curvas acentuadas são apresentadas e discutidas.

5.1 Controlador da Formação

Este controlador é o mesmo utilizado em (Rabelo et al., 2020), e é caracterizado pela lei de controle

$$\dot{\mathbf{q}}_r = \dot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{L}_1 \tanh(\mathbf{L}_2 \tilde{\mathbf{q}}) \quad (12)$$

onde $\mathbf{L}_1$ e $\mathbf{L}_2$ matrizes diagonais positivas definidas de saturação e ganho, respectivamente. Quanto às velocidades desejadas $\dot{\mathbf{q}}_d$ e os erros de formação $\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q}$, tem-se

$$\dot{\mathbf{q}}_d = \begin{bmatrix} \dot{x}_{f_d} & \dot{y}_{f_d} & \dot{z}_{f_d} & \dot{\rho}_{f_d} & \dot{\alpha}_{f_d} & \dot{\beta}_{f_d} \end{bmatrix}^T \text{ e}$$
$$\tilde{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_f & \tilde{y}_f & \tilde{z}_f & \tilde{\rho}_f & \tilde{\alpha}_f & \tilde{\beta}_f \end{bmatrix}^T, \quad (13)$$

respectivamente. Nota-se que o lado direito da igualdade em (12) tem dois termos, o primeiro correspondente à velocidade desejada ao longo do caminho, selecionada independentemente do caminho, e o segundo correspondente ao erro de posição do robô virtual em relação ao caminho. Portanto, supondo o robô virtual sobre o caminho $\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{0}$, e se a velocidade $\dot{\mathbf{q}}_d$ for definida como em (6) e em (7), o robô virtual navegará sempre sobre o caminho desejado.

Neste trabalho, se definiu que a tarefa de maior prioridade é manter a forma da formação, visando assegurar que o VANT sempre esteja adequadamente posicionado em relação ao VTNT, para pousar sobre ele. O contexto considerado é que o VANT volta de uma entrega de pacote e deve pousar sobre uma plataforma móvel, que é o VTNT, a qual está seguindo um caminho determinado. Assim sendo, definiu-se que a tarefa de manter a forma da formação terá maior prioridade que mover a formação, e para isso o sinal de controle considerado, conforme discutido na Seção 4, será aquela em (11). Portanto, a estrutura de controle será similar àquela em (Bacheti et al., 2020), com a modificação correspondente à inserção da modificação do cálculo de $\dot{\mathbf{x}}_r$ (ver Figura 2).

5.2 Cinemática Inversa

A velocidade de referência $\dot{\mathbf{x}}_r$ que é utilizada para definir como cada um dos dois robôs da formação deve se mover

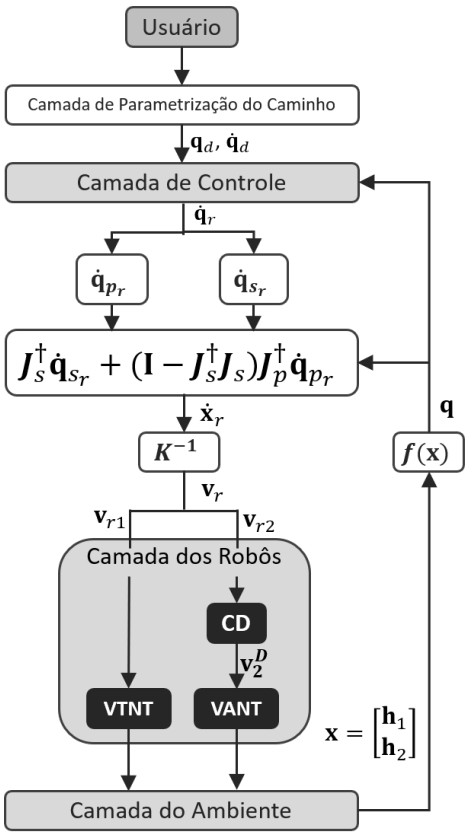


Figura 2. Estrutura de controle adotada, incluindo o uso da técnica de espaço nulo.

ainda está em coordenadas globais, enquanto os sinais de controle recebidos pelos veículos devem estar em seus próprios sistemas de referência. Portanto, como mostra a figura 2, $\dot{\mathbf{x}}_r$ deve ser convertida para os referidos sistemas de coordenadas, através da multiplicação pela matriz $\mathbf{K}^{-1}$, que é uma matriz bloco diagonal cujos blocos são as matrizes de cinemática inversa dos dois veículos. Portanto,

$$\mathbf{K}^{-1} = \begin{bmatrix} c_{\psi_1} & s_{\psi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -s_{\psi_1} & c_{\psi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{\psi_2} & s_{\psi_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -s_{\psi_2} & c_{\psi_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

onde $c_x = cos(x)$ e $s_x = sen(x)$, ψ_1 é a orientação do VTNT e ψ_2 é a orientação do VANT. Por sua vez, $\mathbf{v}_r$ é separada em duas partes, $\mathbf{v}_{r_1}$ e $\mathbf{v}_{r_2}$, que são os vetores de velocidades de referência para para o VTNT e o VANT, respectivamente, nos seus próprios sistemas de coordenadas.

Um detalhe que merece comentário é que o VANT é um veículo omnidirecional. Portanto, não há necessidade de controlar sua orientação, pois o mesmo pode seguir em formação mesmo quando o VTNT se orienta de forma diferente, pois este precisa fazê-lo para manter-se com velocidade linear tangente ao caminho. Porém, também é possível controlar a orientação do VANT, independentemente do seu controle de deslocamento mostrado na Figura 2. Isso é feito neste trabalho, pois já que o VANT vai pousar sobre o VTNT optou-se por fazer com que ele tenha a mesma orientação do VTNT.

Para isso é usado um controlador baseado em cinemática inversa, cuja lei de controle é

$$\dot{\psi}_{r_2} = \dot{\psi}_{d_2} + L_3 \tanh\left(L_4 \tilde{\psi}_2\right) \quad (15)$$

onde L_3 e L_4 são constantes escalares positivas de saturação e ganho, respectivamente, $\dot{\psi}_{d_2}$ é a velocidade de rotação desejada ao redor do eixo Z, e $\tilde{\psi}_2$ é o erro de orientação, ambos para o VANT. Observe-se que tal controlador é similar àquele em (12), embora seja unidimensional, pois controla apenas a orientação do VANT. Para o VANT se orientar exatamente como o VTNT, a velocidade rotacional desejada e o erro de orientação são definidos como $\dot{\psi}_{d_2} = \dot{\psi}_1$, e $\tilde{\psi}_2 = \psi_{d_2} - \psi_2$, com $\psi_{d_2} = \psi_1$, de forma que ambos os veículos se orientarão tangencialmente ao caminho sendo seguido.

Por fim, $\mathbf{v}_{r_2}$ é definido como um vetor representando as velocidades Cartesianas de referência para o VANT, ao longo dos três eixos. Agora, a velocidade de referência rotacional em (15) é incluída em tal vetor, de forma que se passa a ter $\mathbf{v}_{r_2} = \begin{bmatrix} v_{x_{r_2}} & v_{y_{r_2}} & v_{z_{r_2}} & v_{\psi_{r_2}} \end{bmatrix}^T$.

5.3 Compensador Dinâmico

Durante a realização dos experimentos verificou-se que o VTNT se comportava bem usando-se apenas o controlador da formação, seguido da cinemática inversa, enquanto que o VANT não. Daí, decidiu-se adotar um compensador dinâmico para o VANT, visando fazer com que o mesmo siga as velocidades comandadas ($\mathbf{v}_{r2}$ na Figura 2) com menor erro. O compensador dinâmico adotado é o mesmo

proposto em (Santos et al., 2019) para o qual a lei de controle adotada é

$$\mathbf{v}_2^D = \mathbf{K}_u^{-1}(\dot{\mathbf{v}}_{r_2} + \mathbf{L}_d(\mathbf{v}_{r_2} - \mathbf{v}_2) + \mathbf{K}_v\mathbf{v}_2), \qquad (16)$$

onde $\mathbf{v}_2^D$ é o vetor que contém os comandos de velocidade efetivamente enviados ao VANT, $\mathbf{L}_d$ é uma matriz diagonal positiva definida de ganhos, $\dot{\mathbf{v}}_{r_2}$ é a derivada de $\mathbf{v}_{r_2}$ no tempo, e $\mathbf{K}_u = \text{diag}(K_1,\ K_3,\ K_5,\ K_7)$ e $\mathbf{K}_v = \text{diag}(K_2,\ K_4,\ K_6, K_8)$ são matrizes diagonais contendo os coeficientes do modelo do VANT proposto em (Santana et al., 2016), cujos valores, identificados em (Pinto et al., 2020), são $K_1 = 0,8417$, $K_2 = 0,1823$, $K_3 = 0,8354$, $K_4 = 0,1710$, $K_5 = 3,966$, $K_6 = 4,001$, $K_7 = 9,8524$, e $K_8 = 4,7295$.

Utilizando tal compensador (bloco CD na Figura 2) a dinâmica do erro de velocidade é convertida em uma nova dinâmica, linear e assintoticamente estável, usando a técnica de linearização por realimentação (Khalil, 2002), garantindo-se assim que o erro entre as velocidades $\mathbf{v}_{r_2}$ (a desejada) e $\mathbf{v}_2$ (a efetivamente desenvolvida pelo VANT) converge para zero assintoticamente.

5.4 Estratégia de Redução de Velocidade

A viabilidade da tarefa é um conceito fundamental quando se discute robótica. Ao se mencionar que a velocidade do caminho pode ser definida livremente existe um entendimento implícito que esta é na verdade limitada pelas capacidades físicas do robô. Ao mesmo tempo, é natural que o robô consiga atingir velocidades maiores em retas e curvas suaves do que em curvas acentuadas. Ou seja, ao se definir a velocidade desejada em um caminho, se essa for constante, é importante se atentar se o robô consegue manter tal velocidade em todos os tipos de curva.

O texto presente em (Bacheti et al., 2020) apresenta uma estratégia de redução da velocidade desejada em curvas acentuadas que consiste em reduzir a velocidade V_d quando o angulo da tangente ao caminho está acima de um certo limiar. Para estimar tal angulo, utiliza-se a velocidade angular do VTNT $\dot{\psi}_1$, que coincide com a velocidade angular do robô virtual. Considera-se

$$V_d = \begin{cases} \dfrac{V_{d_{max}}}{1 + |\dot{\psi}_1|} & \text{for } |\dot{\psi}_1| > 0.5, \\ V_{d_{max}} & \text{otherwise,} \end{cases} \qquad (17)$$

e não mais um V_d constante, o que significa que o controlador vai reduzir a velocidade do robô dependendo das características do caminho.

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os experimentos realizados para validar o sistema de controle aqui proposto se referem a voos em ambiente interior, sendo que os dados relativos às posições dos robôs foram obtidos usando-se uma configuração com 8 câmeras do sistema de captura de movimento *OptiTrack* [1] , o qual fornece as coordenadas do ponto de interesse para controle em cada um dos veículos, ou seja, os valores de $\mathbf{h}_1$ e $\mathbf{h}_2$. Tal sistema também fornece as orientações dos dois veículos, ψ_1 e ψ_2. Por sua vez, as velocidades necessárias são obtidas por diferenciação numérica dos dados de posição e orientação obtidos com o *OptiTrack*.

A Figura 3 dá uma visão geral da estrutura montada para realizar os experimentos. O sistema de controle roda em um computador portátil específico, sob Windows 10, enquanto o segundo computador portátil é uma máquina Linux contendo os nós ROS necessários para enviar/receber dados do *bebop 2*. Já o terceiro computador, um computador de mesa à base do Windows 10, é onde se executa o software relativo ao sistema de captura de movimento. Já a Figura 4 mostra os dois robôs utilizados, o VTNT *Pioneer 3-DX* e o VANT *Bebop 2*, ambos com os marcadores de alta refletância utilizados para melhorar a captura de imagens pelas câmaras do *OptiTrack*. Note-se que o *Pionner 3-DX* tem uma plataforma sobre sua parte superior, que é utilizada para pouso do VANT.

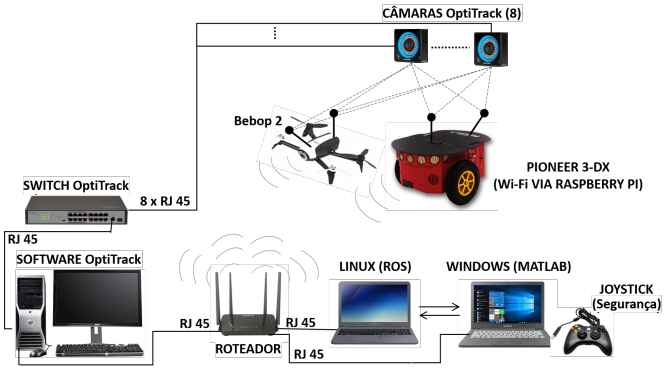


Figura 3. Plataforma experimental utilizada.

Os experimentos a seguir ilustram as diferenças entre o seguimento de caminho pela formação e o pouso do VANT sobre o VTNT quando as tarefas parciais, a saber, mover a formação e manter a forma da estrutura virtual, são realizadas conjuntamente e quando a tarefa parcial de manter a forma da estrutura virtual tem maior prioridade.

O caminho a ser seguido é definido como

$$\begin{bmatrix} x(s) \\ y(s) \\ z(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8sen(\dfrac{2\pi s}{100})\ m \\ 1.2sen(\dfrac{\pi s}{100})\ m \\ 0\ m \end{bmatrix},$$

enquanto a formação desejada, durante a navegação, é

$$\mathbf{q}_{d_n} = \begin{bmatrix} c_{n_x}\ c_{n_y}\ c_{n_z}\ 1.2\ m\ 0\ rad\ \dfrac{\pi}{2}\ rad \end{bmatrix}^T,$$

mudando para

$$\mathbf{q}_{d_l} = \begin{bmatrix} c_{n_x}\ c_{n_y}\ c_{n_z}\ 0.75\ m\ (\psi_1 + \pi)\ rad\ \dfrac{4\pi}{9}\ rad \end{bmatrix}^T$$

quando vai ser iniciado o procedimento de pouso, o que é feito para assegurar que o VANT está centralizado sobre a plataforma em cima do VTNT. A formação navega seguindo o caminho determinado por 60 segundos, com $V_{d_{max}} = 0.5\ m/s$, e, após decorrido esse tempo, o VANT deve pousar sobre o VTNT. Um detalhe importante é que todos os experimentos foram realizados utilizando-se os mesmos ganhos, que são $\mathbf{L}_1 = \text{diag}\,[1,2\ 1,2\ 1\ 3\ 1,5\ 1,5]$, $\mathbf{L}_2 = \mathbf{I} \in \mathbb{R}^{6\times 6}$, $L_3 = L_4 = 1$ e $\mathbf{L}_d = \text{diag}\,[2\ 2\ 1,8\ 5]$.

Os resultados da navegação com o uso do Espaço Nulo para hierarquização de tarefas priorizando manter a forma da

[1] Ver https://optitrack.com/motion-capture-robotics/



Figura 4. Robôs utilizados nos experimentos.

estrutura virtual são mostrados nas são apresentados nas Figuras 5, 6 e 7. O vídeo deste experimento está disponível em `https://youtu.be/qwzQiWxGOCM`.

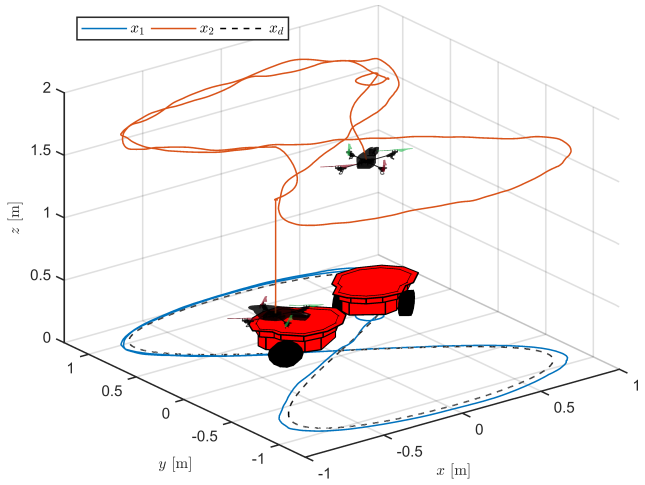


Figura 5. Caminho percorrido pela formação quando há prioridade de forma.

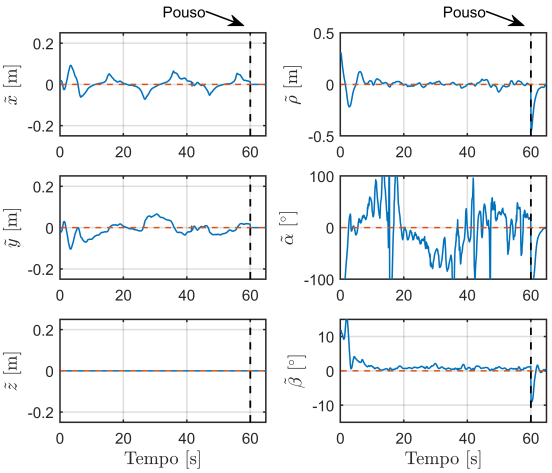


Figura 6. Erros de Formação quando há prioridade de forma.

Observando-se os erros de formação associados ao posicionamento do robô virtual percebe-se que são pequenos, ou seja, mesmo sendo priorizada a forma da estrutura virtual a tarefa de posicionamento também é cumprida. Enquanto isso, os erros de forma, especialmente $\tilde{\rho}$ e $\tilde{\beta}$,

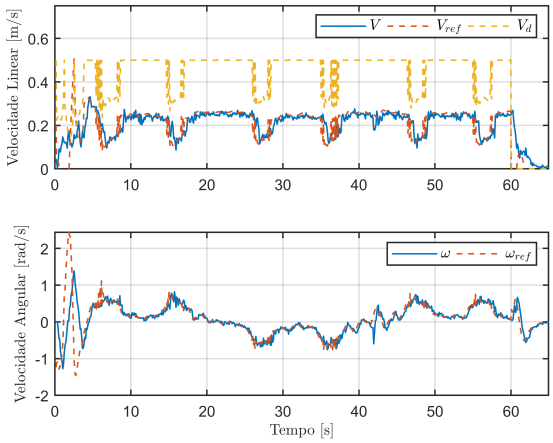


Figura 7. Velocidades do VTNT quando há prioridade de forma.

mostram bom comportamento, ficando próximos de zero. Em relação ao erro de forma $\tilde{\alpha}$, fica evidente seus altos valores. Isto ocorre quando $\beta_f = \frac{\pi}{2}$, como é o caso quando a formação desejada é $\mathbf{q}_{d_n}$, pois o VANT se posiciona em um ponto de singularidade, onde pequenos movimentos causam uma grande variação de α_f, mesmo que o veículo esteja aproximadamente no mesmo lugar. Isso significa que quando o VANT se encontra neste ponto de singularidade o valor de α_f é, essencialmente, inexpressivo para a formação, já que qualquer valor é valido para o cumprimento da tarefa. Observe-se que, quando é considerado o momento de pouso, onde a formação desejada é descrita por $\mathbf{q}_{d_l}$, o VANT não se encontra mais no ponto de singularidade e a Figura 6 mostra que, após a linha indicando o pouso, os valores de $\tilde{\alpha}_f$ convergem para próximo de zero.

Por último, a análise da Figura 7 revela que o robô terrestre não atinge V_d, ainda que siga seu padrão. Isto se deve ao fato de que as equações de Espaço Nulo obrigam os robôs, em primeiro lugar, a manter a forma da estrutura virtual, o que conflita com qualquer tentativa de atingir a velocidade desejada e mantê-la, pois a cada momento pequenas correções têm que ser feitas, para a manutenção da forma da estrutura virtual. Observe-se que, como dito no parágrafo anterior, os erros de formação relativos à posição são pequenos, ou seja, o robô não deixa em nenhum momento de seguir o caminho, ao priorizar a forma da estrutura virtual, mas existe um custo no seguimento de velocidade. Qual estratégia deve ser usada depende, então, da aplicação desejada para a formação.

O próximo experimento mostra uma tarefa de navegação da formação envolvendo a decolagem do VANT de cima de um VTNT estático, seguida por uma navegação da formação durante alguns segundos e o pouso enquanto o VTNT segue o caminho. Após algum tempo, o robô aéreo volta a decolar, desta vez enquanto o robô terrestre se move e, finalmente, após mais um tempo, o VTNT fica estático enquanto o VANT faz seu pouso final.

Para fazer isto, as formações desejadas $\mathbf{q}_{d_n}$ e $\mathbf{q}_{d_l}$ do experimento anterior foram utilizadas, com $V_{d_{max}} = 0.50\ m/s$ para a parte de navegação e $V_{d_{max}} = 0.0\ m/s$ para a parte estática da missão.

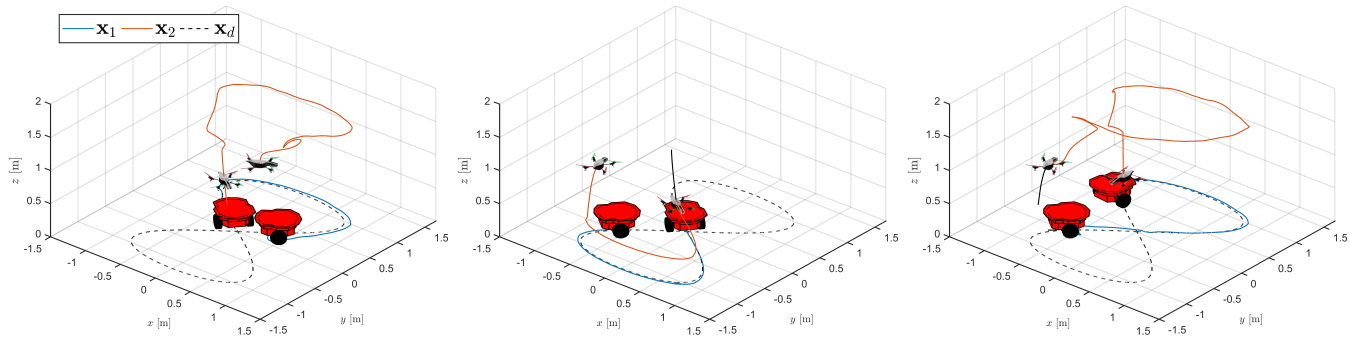


Figura 8. Caminho percorrido pela formação durante o experimento, dividido em três partes.

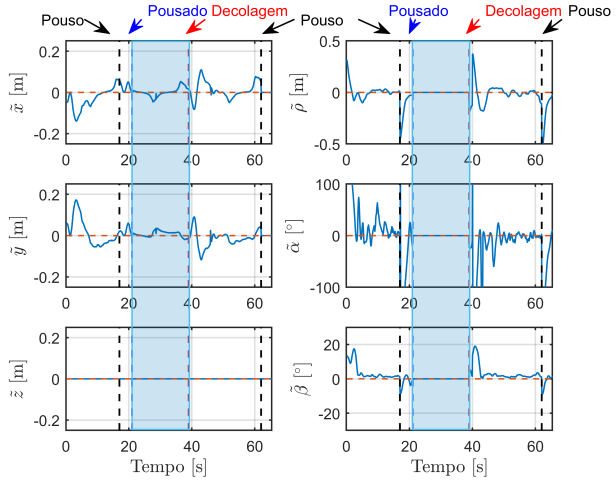


Figura 9. Erros de Formação para prioridade de forma.

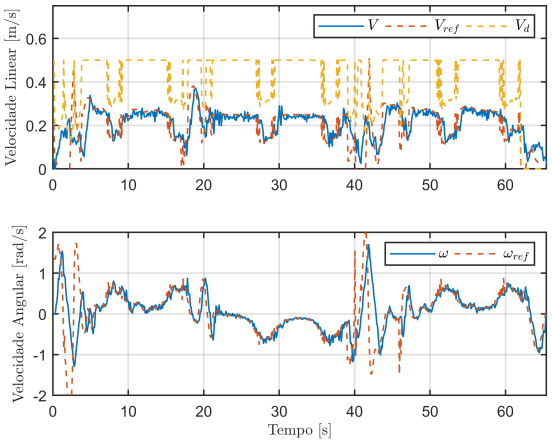


Figura 10. Velocidades do VTNT com prioridade de forma.

A Figura 8 mostra a navegação da formação durante o experimento, separada em três fases para uma apresentação mais clara dos resultados. A primeira parte consiste do início da navegação até o momento do pouso em movimento. É possível observar nos robôs um ajuste inicial, onde o VTNT inicialmente segue fora do caminho. Isto acontece pois nestes momentos a formação está sendo corrigida, dada a maior prioridade em relação ao seguimento do caminho. Esses movimentos podem ser melhor observados no vídeo `https://youtu.be/qwzQiWxGOCM?t=87`.

A segunda parte mostra desde o pouso até o momento da segunda decolagem. Como na primeira parte, os desenhos dos robôs são mostrados nos momentos inicial e final de cada parte. Além disso, uma linha preta contínua ilustra o último segundo da fase anterior, para melhor contextualizar a navegação. Esta parte mostra que o pouso do VANT foi bem sucedido e o VTNT, por sua parte, continuou o seguimento do caminho.

Por último, a terceira parte mostra a navegação a partir da segunda decolagem até o pouso final. Novamente, um rastro representado por uma linha preta mostra o último segundo da fase anterior. Observe-se que devido à decolagem do VANT aumentar consideravelmente os erros de forma, que são prioritários, os dois robôs se organizam para diminuir estes erros o mais rápido possível. O resultado é que o VTNT escapa momentaneamente do caminho seguido, mas fica evidente que após o estabelecimento da forma desejada o robô terrestre volta ao caminho sendo seguido, onde permanece até o pouso final.

Finalmente, as Figuras 9 e 10 mostram os erros de formação e as velocidades do VTNT, que coincide com o robô virtual da formação. Os retângulos azul claro na Figura 9 correspondem ao VANT pousado, situação em que não existem erros associados à forma da estrutura virtual, como mostrado na parte mais à direita da figura.

7. CONCLUSÃO

É proposto um controlador para conduzir uma formação heterogênea composta por um VTNT e um VANT em uma tarefa de seguimento de caminho. A tarefa é considerada em duas partes, a saber, manter a forma da estrutura virtual que descreve a formação, a linha reta que une os dois veículos, e mover a formação ao longo do caminho. Prioridades diferentes são dadas a essas duas tarefas parciais, sendo que a tarefa de manter a forma da estrutura virtual tem a maior prioridade. A razão para isso é que se considera que o VANT vai pousar sobre o VTNT, o que exige que ele esteja muito bem posicionado em relação ao VTNT, para assegurar um pouso sem problemas. Isso quer dizer que é necessário manter a forma da estrutura virtual a qualquer custo, mesmo perdendo eficiência no seguimento do caminho. Este contexto corresponde, por exemplo, ao caso em que o VANT realizou a entrega de um pacote e deve pousar de volta numa plataforma, que pode ser um veículo em movimento, numa rua ou estrada (o caminho). Por essa razão, e pelo fato de se poder definir a velocidade do veículo livremente, é que se considerou o

seguimento de caminho, e não o seguimento de trajetória, por exemplo, em que a velocidade do veículo não pode ser escolhida livremente, assim como não pode ser nula, ou seja o VTNT não poderia estar parado. Para definir a sequência de prioridades para as tarefas parciais é utilizada a técnica de espaço nulo, em que a tarefa de menor prioridade é projetada no espaço nulo da matriz Jacobiana correspondente à tarefa de maior prioridade.

Experimentos realizados com um *Pioneer 3-DX* e um *Bebop 2* são também apresentados, e seus resultados, junto com a análise teórica desenvolvida ao longo do texto, validam o sistema de controle proposto.

Como continuação desta pesquisa se prevê inserir uma terceira tarefa parcial na estrutura baseada em espaço nulo, o desvio de obstáculos, de forma que a formação possa seguir o caminho especificado quando não houver obstáculo, e desviar-se do caminho para evitar um obstáculo, voltando ao mesmo após deixar o obstáculo para trás.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, agência brasileira que apoia o desenvolvimento científico e tecnológico, pelo apoio financeiro a este trabalho, e à FAPES - Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo, agência do Estado do Espírito Santo que apoia o desenvolvimento científico e tecnológico, que também apoiou financeiramente este trabalho e que concedeu bolsa de estudos ao primeiro autor. Eles também agradecem à Universidade Federal do Espírito Santo e à Universidade Federal de Viçosa, pelo suporte dado a esta 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.

Bacheti, V.P., Brandão, A.S., and Sarcinelli-Filho, M. (2020). Path-following with a ugv-uav formation considering that the uav lands on the ugv (aceito para publicação). In *Proceedings of the 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. Athens, Greece.

Ernandes-Neto, V., Sarcinelli-Filho, M., and Brandão, A.S. (2019). Trajectory-tracking of a heterogeneous formation using null space-based control. In *Proceedings of the 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 187–195. IEEE.

Khalil, H. (2002). *Nonlinear Systems*. Pearson Education. Prentice Hall.

Kim, J.H., Kwon, J.W., and Seo, J. (2014). Multi-uav-based stereo vision system without gps for ground obstacle mapping to assist path planning of ugv. *Electronics Letters*, 50(20), 1431–1432.

Kitts, C.A. and Mas, I. (2009). Cluster space specification and control of mobile multirobot systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 14(2), 207–218.

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.

Lyu, Y., Pan, Q., Zhang, Y., Zhao, C., Zhu, H., Tang, T., and Liu, L. (2015). Simultaneously multi-uav mapping and control with visual servoing. In *Proceedings of the 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 125–131. IEEE.

Meissen, C., Klausen, K., Arcak, M., Fossen, T.I., and Packard, A. (2017). Passivity-based formation control for uavs with a suspended load. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 13150–13155.

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 *Proceedings of the 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 1389–1397. IEEE.

Parker, L.E. (2016). *Multiple Robot Systems*, 1335–1384. Springer Handbooks. Springer International Publishing, 2nd edition.

Pinto, A.O., Marciano, H.N., Bacheti, V.P., Moreira, M.S.M., Brandão, A.S., and Sarcinelli-Filho, M. (2020). High-level modeling and control of the *Bebop 2* micro aerial vehicle. In *To appear in the Proceedings of the 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems*. Athens, Greece.

Qin, H., Meng, Z., Meng, W., Chen, X., Sun, H., Lin, F., and Ang, M.H. (2019). Autonomous exploration and mapping system using heterogeneous uavs and ugvs in gps-denied environments. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(2), 1339–1350.

Rabelo, M.F.S., Brandão, A.S., and Sarcinelli-Filho, M. (2020). Landing a uav on static or moving platforms using a formation controller. *IEEE Systems Journal*, 1–9. doi:10.1109/JSYST.2020.2975139.

Resende, C.Z., Carelli, R., Bastos-Filho, T.F., and Sarcinelli-Filho, M. (2013). A new positioning and path following controller for unicycle mobile robots. In *Proceedings of the 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, 1–6. Montevideo, Uruguay.

Santana, L.V., Brandão, A.S., and Sarcinelli-Filho, M. (2016). Navigation and cooperative control using the ar.drone quadrotor. *Journal of Intelligent Robotic Systems*, 84(1), 327–350. doi:10.1007/s10846-016-0355-y.

Santos, M.C.P., Rosales, C.D., Sarapura, J.A., Sarcinelli-Filho, M., and Carelli, R. (2019). An adaptive dynamic controller for quadrotor to perform trajectory tracking tasks. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 93(1-2), 5–16.

Sharma, V. and Kumar, R. (2015). A cooperative network framework for multi-uav guided ground ad hoc networks. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 77(3-4), 629–652.

Shirani, B., Najafi, M., and Izadi, I. (2019). Cooperative load transportation using multiple uavs. *Aerospace Science and Technology*, 84, 158–169.

Tokekar, P., Hook, J.V., Mulla, D., and Isler, V. (2016). Sensor planning for a symbiotic uav and ugv system for precision agriculture. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(6), 1498–1511.

Villa, D.K.D., Brandão, A.S., and Sarcinelli-Filho, M. (2019). Rod-shaped payload transportation using multiple quadrotors. In *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 1036–1040. IEEE.