

Navegação em ambientes externos com quadrimotores em formação utilizando controle por modo deslizante adaptativo^{*}

Daniel K. D. Villa^{*} Alexandre S. Brandão^{**}
Mario Sarcinelli-Filho^{***}

^{*} Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, ES (e-mail: danielkdv@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: In this work, a method for outdoor navigation using quadrotors in formation is presented. The unmanned aerial vehicles (UAVs) navigate as a leader-follower formation, where the position of the leader is estimated using its onboard sensors, and the position of the follower is estimated using position-based visual servoing. To handle the real-world perturbations (e.g., wind gusts) and unmodeled dynamics, a robust sliding mode controller is used. The proposal was experimentally validated using two *Parrot Bebop 2* quadrotors in an outdoor scenario. The obtained results show that the proposed control system is able to perform trajectory-tracking tasks under parametric uncertainties and outdoor disturbances.

Resumo: Neste trabalho se propõe uma solução para a navegação externa de quadrimotores em formação. Os veículos aéreos não tripulados (VANTs) navegam como uma formação líder-seguidor, em que a posição do líder é estimada utilizando os sensores a bordo do veículo, enquanto a posição do seguidor é estimada por servo-visão baseada em posição. Para lidar com as perturbações do ambiente externo (por exemplo, rajadas de vento) e dinâmicas não modeladas do veículo, um controle robusto por modo deslizante é utilizado. A proposta foi validada experimentalmente utilizando dois quadrimotores *Parrot Bebop 2* em um ambiente externo. Os resultados obtidos permitem concluir que o sistema de controle proposto é capaz de cumprir tarefas de seguimento de trajetória em formação mesmo com incerteza nos parâmetros dinâmicos e distúrbios externos.

Keywords: UAV applications; robust control; trajectory tracking; leader-follower formation; wind disturbance

Palavras-chaves: Aplicações com VANTs; controle robusto; seguimento de trajetória; formação líder-seguidor; distúrbios por vento

1. INTRODUÇÃO

O entusiasmo que a sociedade vê nas aplicações utilizando VANTs tem motivado grandes esforços na indústria e academia para o desenvolvimento de melhores algoritmos de controle para a navegação autônoma de tais veículos. Em específico, estudos envolvendo quadrimotores ganharam relevância devido à ampla aplicabilidade desses robôs, que são capazes de realizar voos pairados, carregar e manipular

cargas (Palunko et al., 2012; Pizetta et al., 2019; Villa et al., 2020), e de realizar manobras impressionantes com grande agilidade (Castillo et al., 2019; Mellinger et al., 2012). Não obstante, esses robôs possuem baixo custo e são capazes de realizar tarefas utilizando somente seus sensores a bordo e processamento interno.

A cooperação entre múltiplos robôs, gerando o que se convencionou chamar sistemas multirrobôs, i.e., uma formação de vários robôs, estende as aplicabilidades de um único veículo, uma vez que a ação cooperativa aumenta a eficiência no cumprimento das missões (Parker, 2016). O mesmo se aplica a veículos aéreos, isto é, uma formação de vários VANTs provê também soluções que um único robô não seria capaz de atender (por exemplo transportar uma carga mais pesada do que a capacidade de carga de apenas um veículo, como em (Wu and Sreenath, 2014)), e oferece maior autonomia ao sistema contra o mau funcionamento de um robô. Nessa hipótese, mesmo que um agente falhe, os

^{*} Os autores agradecem ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, agência de fomento do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações que apoia o desenvolvimento científico e tecnológico, e à FAPES - Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo, uma agência do Estado do Espírito Santo que apoia o desenvolvimento científico e tecnológico, pelo suporte financeiro que permitiu desenvolver este trabalho. O autor Daniel K. D. Villa também agradece à CAPES pela bolsa de estudos a ele concedida, a qual lhe permitiu dedicar-se exclusivamente aos estudos para obtenção do Doutorado.

demais robôs podem ser capazes de compensar essa falta e cooperar para ainda assim cumprir a missão (Parker, 1998).

Como discutido na revisão de Villa et al. (2020), grandes avanços foram obtidos no projeto de algoritmos de controle aplicados a quadrimotores. No entanto, na maioria das vezes esses resultados só podem ser replicados utilizando um sistema de captura de movimentos para estimar a postura dos veículos, o que só é possível em ambientes internos e com um alto custo financeiro. Assim, este trabalho apresenta uma estratégia cooperativa multirobôs baseada em formação líder-seguidor (Brandao et al., 2009; Boel et al., 2015), utilizando apenas os sensores a bordo e a câmera monocular dos veículos para estimar sua postura. Dessa forma tarefas de seguimento de trajetória podem ser realizadas em um ambiente externo, utilizando um controle que é robusto o bastante para superar distúrbios do ambiente e incertezas paramétricas do modelo.

1.1 Trabalhos relacionados

A literatura sobre navegação, planejamento de missões e controle de quadrimotores é bastante extensa e repleta de resultados experimentais impressionantes, tal como exposto em (Tang and Kumar, 2018). Tratando especificamente de voos em ambientes externos, as estimativas dos estados de um veículo são normalmente obtidas por combinação de algoritmos de visão computacional, que tratam as imagens de uma ou mais câmeras a bordo, somado aos dados da unidade de medida inercial (sigla IMU, do inglês *inertial measurement unit*). Em geral, as imagens das câmeras são usadas para estimativas de posição e velocidade linear, enquanto os dados da IMU entregam informações sobre a velocidade rotacional e a aceleração linear. Ademais, referindo-se à navegação cooperativa, os erros acumulados por integração de sensores levam ao problema adicional da destruição da formação, uma vez que esse erro estocástico não pode ser corrigido sem que haja um sistema de referência global para posição. Em diversos artigos de revisão, como em (Li et al., 2016; Kanellakis and Nikolakopoulos, 2017; Máthé and Buşoniú, 2015), é possível encontrar comparações entre os métodos de odometria visual-inercial, bem como os resultados experimentais acerca desses métodos.

Além do desafio de obter uma informação de postura confiável para os robôs, a navegação externa é afetada também pela presença de incertezas nos parâmetros do modelo dinâmico do veículo, obtidos normalmente em um ambiente controlado, e pela presença de distúrbios ambientais, como ventos ou campos magnéticos. Assim, controladores PID convencionais baseados em dinâmica inversa ou linearização por realimentação não operam bem sob essas circunstâncias, de forma que soluções utilizando controle adaptativo ou robusto são preferidas. Nesse sentido, os controles adaptativos são fáceis de implementar e são eficientes contra distúrbios não variantes e incertezas paramétricas. Por exemplo, em (Beul et al., 2019) um controle por modelo preditivo adaptativo foi implementado, sendo capaz de reagir a variações no momento de inércia e forças de arraste por adaptação. Um resultado similar a esse pode ser observado em (Santos et al., 2019). Por outro lado, controladores robustos têm melhor desempenho que os

adaptativos quando submetidos a distúrbios variantes no tempo (Slotine et al., 1991), uma vez que sua estabilidade é garantida se estes distúrbios variam dentro de limites preestabelecidos.

Uma proposta de controle robusto muito utilizada são os controles por modo deslizante (sigla SMC, do inglês *sliding mode controller*), dado que esses possuem rápida resposta dinâmica, são pouco sensíveis a distúrbios e são simples de ser implementados (Zhao et al., 2019). Uma desvantagem conhecida dos SMCs, porém, é a alta taxa chaveamento e, portanto, alta atividade dos atuadores, gerando um efeito conhecido como *chattering*, e consumindo bastante energia. Concepções aprimoradas da versão tradicional de um SMC são capazes de atenuar o *chattering*, seja por modificar as ações de chaveamento (González et al., 2014), ou por combinar o SMC com realimentação adaptativa e observadores de distúrbios (Rajappa et al., 2016), limitando a ação de chaveamento apenas para tratar as dinâmicas não modeladas.

1.2 Contribuições

O objetivo principal que motivou essa pesquisa é o transporte de cargas suspensas por cabo utilizando uma formação de quadrimotores em um ambiente externo. No entanto, neste primeiro trabalho, a carga a ser transportada ainda não foi incluída: apenas os paradigmas de controle que considerariam a carga como um distúrbio foram implementados e testados. Para garantir a robustez necessária contra distúrbios presentes em um ambiente externo, um controle por modo deslizante adaptativo foi utilizado, sendo essa a contribuição principal deste primeiro artigo. Desse modo, a proposta aqui apresentada não depende de: (i) um sistema dispendioso de captura de movimentos, (ii) de modelos matemáticos ou conhecimento prévio a respeito do comportamento dos distúrbios externos, e (iii) comunicação explícita entre os veículos aéreos.

Para validar nossa proposta, experimentos com voo a céu aberto foram conduzidos utilizando dois quadrimotores *Parrot Bebop 2* navegando segundo o paradigma de formação líder-seguidor (ver Figura 1), sob influência de vento e condições de iluminação variantes. A posição do quadrimotor líder foi estimada usando apenas seus sensores internos, enquanto que a posição do quadrimotor seguidor em relação ao líder foi estimada usando técnicas de visão computacional. Para tanto, um marcador em forma de alvo foi montado sobre a carcaça do líder, e o seguidor usou sua câmera frontal para localizar e perseguir esse alvo.

Para discutir os tópicos relacionados a essa aplicação, esse artigo foi dividido da seguinte forma: inicialmente, uma visão geral da estratégia de controle utilizada nessa proposta é apresentada na Seção 2, enquanto a Seção 3 traz a descrição da modelagem matemática dos veículos. Na sequência, a Seção 4 apresenta o controlador dinâmico robusto utilizado para os voos externos, e a Seção 5 discute as estimativas das posturas do líder e do seguidor. Prosseguindo, a Seção 6 mostra a configuração experimental adotada para executar os experimentos de validação, a Seção 7 exhibe e discute os resultados obtidos. Por fim, a Seção 8 destaca as conclusões principais deste trabalho.



Figura 1. Os dois quadrimotores *Parrot Bebop 2* navegando em um ambiente externo utilizando apenas os sensores a bordo e câmera monocular (esq.); bem como um *snapshot* do algoritmo de visão utilizado no robô seguidor (dir.).

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Os veículos cooperam entre si mantendo-se em uma formação líder-seguidor, como mostra a Figura 2, em que o quadrimotor líder segue as referências de trajetória inseridas pelo operador no planejador de trajetórias. O líder estima sua postura utilizando somente seus sensores a bordo, e age como se estivesse navegando sozinho, o que faz parte da formação líder-seguidor (Santana et al., 2016). Já o quadrimotor seguidor usa seus sensores a bordo para estabilização e navegação, mantendo uma distância \mathbf{t} em relação ao líder, estimada por um sistema de servo-visão baseado em posição. A distância \mathbf{t}_{des} desejada entre o líder e o seguidor também é especificada pelo planejador de trajetórias, uma vez que os agentes não trocam nenhum tipo de informação via seus canais de comunicação.

3. MODELAGEM

O modelo matemático de quadrimotores é um assunto extensivamente abordado na literatura (Muñoz et al., 2019). Sendo assim, somente uma breve descrição do modelo

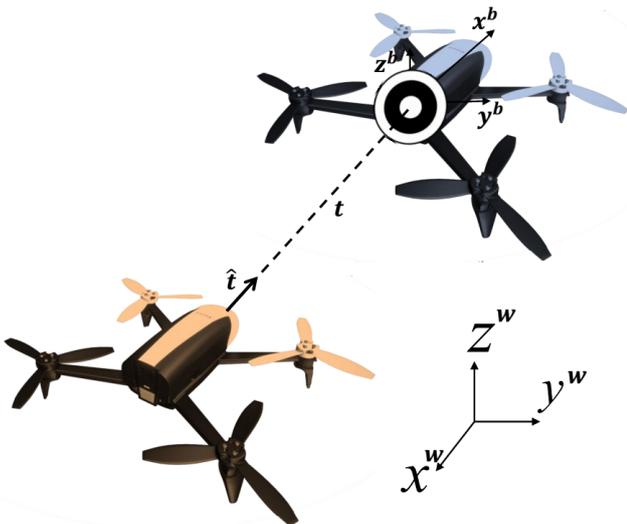


Figura 2. A formação líder-seguidor. A distância instantânea entre os agentes, \mathbf{t} , é estimada através de visão computacional.

matemático será apresentada aqui. As coordenadas de um quadrimotor no espaço 3D são $\boldsymbol{\xi} = [x \ y \ z]^T$ indicando os deslocamentos longitudinal, lateral, e normal, em relação ao referencial inercial global $\langle w \rangle$. Já $\boldsymbol{\eta} = [\phi \ \theta \ \psi]^T$ é o vetor que contém os ângulos de orientação para rolagem, arfagem e guinada do veículo, também em relação a $\langle w \rangle$. Em outras palavras, $\boldsymbol{\xi}$ e $\boldsymbol{\eta}$ representam, respectivamente, as variáveis de translação e de atitude associadas ao quadrimotor. A Figura 3 exibe essas variáveis de postura, os sinais de entrada, e os sistemas de referência. Como pode ser visto em tal figura, a soma das forças f_i , $i = 1, \dots, 4$, geradas pelas hélices é dada por

$$u_1 = \sum_{i=1}^4 f_i.$$

O resultado da ação de tal propulsão no veículo aéreo é o vetor de forças generalizadas $\mathbf{F}_\xi = {}^w\mathbf{R}_b[0 \ 0 \ u_1]^T$, sendo

$${}^w\mathbf{R}_b = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta - s_\psi s_\phi s_\theta & -s_\psi c_\phi & c_\psi s_\theta + s_\psi c_\theta s_\phi \\ s_\psi c_\theta + c_\psi s_\phi s_\theta & -c_\psi c_\phi & s_\psi s_\theta - c_\psi c_\theta s_\phi \\ -c_\phi s_\theta & s_\phi & c_\phi c_\theta \end{bmatrix},$$

em que $s(\cdot)$ e $c(\cdot)$ representam $\text{sen}(\cdot)$ e $\text{cos}(\cdot)$, respectivamente.

A ação dos quatro propulsores também gera o vetor de torques generalizados atuando no veículo, que é dado por

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{2,\phi} \\ u_{2,\theta} \\ u_{2,\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L[(f_1 + f_4) - (f_2 + f_3)] \\ L[(f_1 + f_2) - (f_3 + f_4)] \\ M_2 - M_1 + M_4 - M_3 \end{bmatrix},$$

em que L é a distância desde as hélices até o centro de massa do quadrimotor, e $u_{2,\phi}$, $u_{2,\theta}$ e $u_{2,\psi}$ são os comandos gerados pelo controle de baixo nível a bordo do veículo, em seu piloto automático, responsável por estabilizar a atitude do quadrimotor, e não abordado neste trabalho.

Utilizando a formulação de Newton-Euler, como em (Loianno et al., 2016), tem-se

$$m\ddot{\boldsymbol{\xi}} = \mathbf{F}_\xi - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\Omega}} = \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{I}\boldsymbol{\Omega},$$

em que g é a aceleração gravitacional, m é a massa do quadrimotor,

$$\mathbf{I} \approx \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix},$$

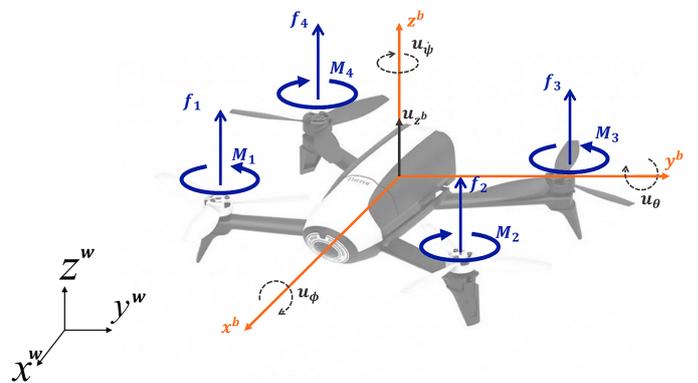


Figura 3. Os sistemas de referência e as entradas de controle abstratas f_i , $i = 1, \dots, 4$, para um quadrimotor.

é a matriz de momentos de inércia, e

$$\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} c_\psi 0 -c_\phi s_\theta \\ 0 1 s_\phi \\ s_\theta 0 c_\phi c_\theta \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\eta}}.$$

Assim, o modelo dinâmico de um quadrimotor pode ser escrito como

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= (c_\psi s_\theta + s_\psi c_\theta s_\phi)u_1 - d_1\dot{x}, \\ m\ddot{y} &= (s_\psi s_\theta - c_\psi c_\theta s_\phi)u_1 - d_2\dot{y}, \\ m\ddot{z} &= (c_\phi c_\theta)u_1 - mg - d_3\dot{z}, \\ I_{xx}\ddot{\phi} &= u_{2,\phi} + (I_{zz} - I_{yy})\dot{\theta}\dot{\psi} - d_4\dot{\phi}, \\ I_{yy}\ddot{\theta} &= u_{2,\theta} + (I_{xx} - I_{zz})\dot{\phi}\dot{\psi} - d_5\dot{\theta}, \\ I_{zz}\ddot{\psi} &= u_{2,\psi} + (I_{yy} - I_{xx})\dot{\phi}\dot{\theta} - d_6\dot{\psi}, \end{aligned} \quad (2)$$

sendo $\mathbf{d} = [d_1, \dots, d_6]^\top$ o vetor de coeficientes de arrasto do ar.

4. CONTROLE

Como explicado em Santana et al. (2016), quadrimotores com pilotos automáticos embutidos (i.e., *embedded autopilots*) usam (2) para realizar o controle de atitude e obter a resposta a sinais de comando translacionais de movimento. Esses sinais translacionais de alto nível são o ângulo de rolagem desejado u_ϕ , o ângulo de arfagem desejado u_θ , a taxa de variação de altitude desejada u_z , e a taxa de variação de guinada desejada u_ψ , estes agrupados em um vetor de comandos de alto nível definidos como $\mathbf{u} = [u_\theta \ u_\phi \ u_z \ u_\psi]^\top$, cujos valores estão todos dentro do intervalo $[-1.0, +1.0]$. Dessa forma, é possível tirar proveito dos pilotos automáticos embutidos, deixando a ação de estabilização, i.e., o controle baixo nível, como uma responsabilidade do *firmware* do veículo, tornando o modelo dinâmico apenas em função dos sinais de controle translacionais de alto nível.

Usando essa característica, já que o quadrimotor aqui utilizado tem seu piloto automático, e considerando voos apenas em velocidades baixas ou moderadas, uma linearização ao redor do estado *quase-pairado* pode ser aplicada à dinâmica do quadrimotor em (2), resultando em $\sin(\theta) \approx \theta$, $\sin(\phi) \approx \phi$, $\cos(\theta) \approx \cos(\phi) \approx 1$, e $u_1 \approx mg$. Com isso a dinâmica translacional em (2) pode ser reescrita como

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= (c_\psi K_\theta u_\theta + s_\psi K_\phi u_\phi)g - \frac{d_1}{m}\dot{x} \\ \ddot{y} &= (s_\psi K_\theta u_\theta - c_\psi K_\phi u_\phi)g - \frac{d_2}{m}\dot{y} \\ \ddot{z} &= \frac{K_z u_z}{m} - g - \frac{d_3}{m}\dot{z} \end{aligned} \quad (3)$$

Dessa forma, o modelo *quase-pairado* para um quadrimotor pode ser escrito na forma linear

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}\mathbf{K}_u \mathbf{u} - \mathbf{K}_x \dot{\mathbf{x}}, \quad (4)$$

em que \mathbf{F} é uma matriz de rotação relacionando $\langle w \rangle$ e $\langle b \rangle$, dependente apenas de ψ , $\mathbf{x} = [x \ y \ z \ \psi]^\top$ são os estados no referencial $\langle w \rangle$, e $\mathbf{u} = [u_\theta \ u_\phi \ u_z \ u_\psi]^\top$ é um vetor de comandos de alto nível para o quadrimotor. As matrizes \mathbf{K}_u e \mathbf{K}_x são matrizes diagonais contendo, respectivamente, os parâmetros dinâmicos e os coeficientes de arrasto para o modelo.

Um importante aspecto deste trabalho é projetar um controlador com resposta rápida e robusta o suficiente para suportar os distúrbios dos ambiente externos. Para cumprir esse objetivo, é proposto um controlador dinâmico por modo deslizante adaptativo (ASMC, de *adaptive sliding mode controller*), similar ao proposto em Utkin and Poznyak (2013).

Apesar do controle ASMC ser suficiente para realizar tarefas de seguimento de trajetória com veículos aéreos, foi decidido combiná-lo com um controlador de realimentação contínua por dinâmica inversa, de forma que este cancele de forma aproximada a dinâmica do veículo, deixando apenas os distúrbios e incertezas paramétricas para serem compensados pelo ASMC.

Dessa forma, o sinal de controle é descrito por

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{DI} + \mathbf{u}_{ASMC}. \quad (5)$$

Para obter o sinal de controle por dinâmica inversa, (4) é descrito em coordenadas $\langle w \rangle$ por

$$\mathbf{u}_{DI} = (\mathbf{F}\mathbf{K}_u)^{-1}(\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_x \dot{\mathbf{x}}). \quad (6)$$

Utilizando realimentação PD, (6) assume a forma final

$$\mathbf{u}_{DI} = (\mathbf{F}\mathbf{K}_u)^{-1}(\ddot{\mathbf{x}}_{des} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_p \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_x \dot{\mathbf{x}}), \quad (7)$$

em que $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_{des} - \mathbf{x}$, com \mathbf{K}_d e \mathbf{K}_p sendo matrizes de ganho positivas definidas.

Para completar o sinal de controle (5), \mathbf{u}_{ASMC} pode ser proposto da seguinte forma. Assumindo que (4) considera também as dinâmicas não modeladas ou distúrbios, descritos por $f_d(\cdot)$, este modelo toma a forma $\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{K}_u \mathbf{u} - \mathbf{K}_x \dot{\mathbf{x}} + f_d(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)$. Assumindo também que o sistema é desacoplado e $|f_d(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)| \leq \mathbf{L}$, em que \mathbf{L} é uma matriz 4×1 de constantes positivas representando limites preestabelecidos para os distúrbios, somente convergência assintótica limitada pode ser obtida com uma lei de controle como a descrita em (7). A fim de obter convergência assintótica dos erros para zero, um novo estado σ é proposto, cuja dinâmica é descrita pela superfície deslizante

$$\sigma = \dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \mathbf{K}_\sigma \tilde{\mathbf{x}} \quad \text{and} \quad \dot{\sigma} = \ddot{\tilde{\mathbf{x}}} + \mathbf{K}_\sigma \dot{\tilde{\mathbf{x}}} \quad (8)$$

Assim, para fazer com que $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}, \tilde{\mathbf{x}} = 0$ na presença de distúrbios limitados, $f_d(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)$, é necessário fazer com que σ e $\dot{\sigma}$ tenda a zero em (8). Como descrito em Shtessel et al. (2014), isso é possível de ser obtido tomando a lei de controle

$$\mathbf{u}_{ASMC} = \boldsymbol{\rho}(t) \text{sign}(\sigma) \quad (9)$$

em que $\boldsymbol{\rho}(t)$ é uma função estritamente positiva representando a ação de controle adaptativa na direção de $\sigma \rightarrow 0$. Desse modo, como $\boldsymbol{\rho}(t)$ é adaptativo, essa lei de controle provê convergência assintótica para o erro mesmo na presença de funções para o distúrbio desconhecidas $f_d(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)$ (Utkin and Poznyak, 2013).

A estrutura que foi utilizada para controlar a formação líder-seguidor pode ser observada na Figura 4. Como mostrado, o planejador de trajetórias é responsável por entregar os estados desejados para o líder (e.g., uma posição, uma trajetória), e a distância desejada entre veículos para o seguidor, \mathbf{t}_{des} . Assumindo que o controlador (5) seja implementado nos veículos, e seja capaz de realizar o seguimento de estados desejados mesmo sob distúrbios causados pelo ambiente externo, o sistema proposto pode, enfim, realizar missões de navegação em formação.

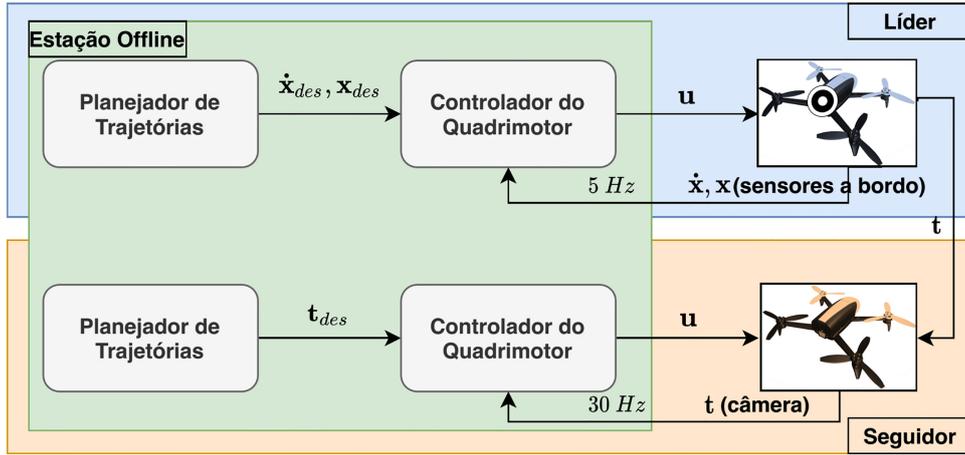


Figura 4. Diagrama de blocos representando a estratégia de controle líder-seguidor para a formação de quadrimotores.

5. ESTIMATIVA DA POSTURA



Figura 5. Marcador preto e branco acoplado ao líder para ser usado pelo seguidor para manter a distância desejada t_{des} .

Em relação aos sensores a bordo, os quadrimotores *Parrot Bebop 2* possuem uma unidade de medida inercial (IMU), uma câmera apontada para baixo, responsável por estimar velocidades nos eixos x^b e y^b por meio de fluxo óptico, um GPS, e sensores de pressão e ultrassom para estimar a altitude do veículo. Esses sensores são então combinados e utilizados para estimar a postura do líder nessa aplicação.

Já para o seguidor, um sistema visual-inercial baseado em posição fornece as estimativas de $\xi_{follower}$ no referencial $\langle b \rangle$, dado por $\xi_{follower} = \xi_{leader} - t$. Para estimar t , uma solução por visão computacional utiliza um marcador preto e branco circular, como pode ser visto na Figura 5. Esse marcador é detectado pela câmera frontal do quadrimotor seguidor, é reconhecido por meio de um detector de código aberto, descrito em Krajińik et al. (2014), e por meio da estimativa do diâmetro do círculo é possível estimar sua distância. A saber, esse sistema é robusto à variações de luminosidade e requer pouco tempo de processamento.

Com o intuito de ilustrar a abordagem proposta, um vídeo disponível em https://youtu.be/KYvjn_P1bCI exibe o quadrimotor seguidor mantendo uma distância desejada do marcador que é manuseado por um operador. Neste exemplo, uma carga de 180 g ($\sim \frac{1}{3}$ da massa do quadrimotor) está presa ao veículo por uma corda flexível.

A ideia principal neste teste é mostrar que essa carga pendurada atua como um distúrbio não modelado, sendo esse distúrbio tratado pelo controlador ASMC proposto, exibindo a robustez do controlador.

6. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

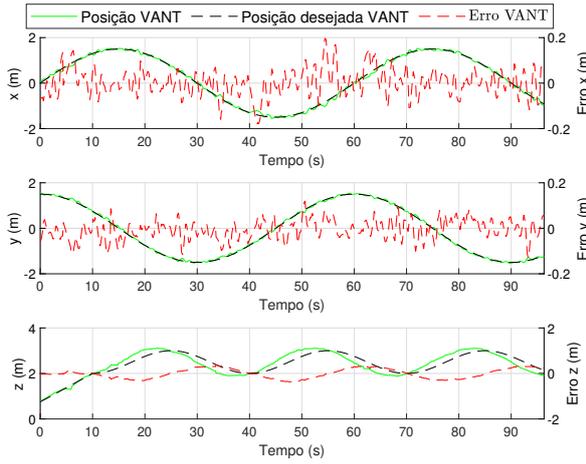
Os algoritmos propostos foram validados experimentalmente utilizando dois quadrimotores *Parrot Bebop 2* realizando tarefas de seguimento de trajetória em um ambiente externo. Os algoritmos foram executados em uma estação *offline* que enviava os dados do planejador de trajetórias na frequência de 30 Hz. Como o *firmware* dos *Bebop 2* entrega os sinais de odometria apenas a uma taxa de 5 Hz, o controle do quadrimotor líder foi subamostrado para essa frequência. A comunicação entre os agentes e a estação *offline* foi estabelecida utilizando o ROS¹ (Robot Operating System) e o pacote *bebop_autonomy*.

Para o controle dos quadrimotores *Bebop 2*, os parâmetros do modelo descrito em (4) foram obtidos por um método de identificação similar ao adotado em Santana et al. (2016); Santos et al. (2017). Assim, os parâmetros obtidos foram $\mathbf{K}_u = \text{diag}([0.8417 \ 0.8354 \ 3.966 \ 9.8524])$ e $\mathbf{K}_x = \text{diag}([0.18227 \ 0.17095 \ 4.001 \ 4.7295])$.

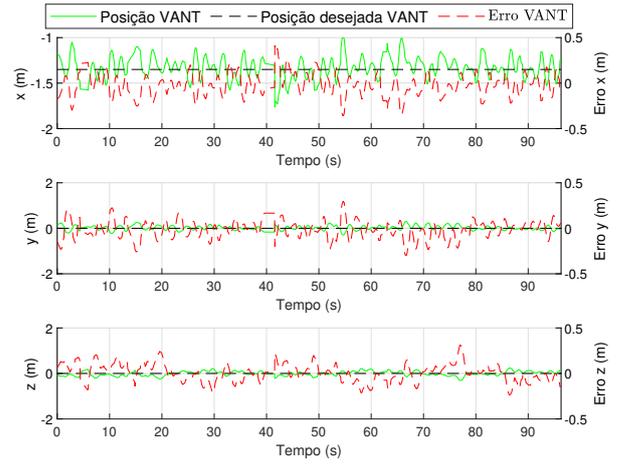
A tarefa de seguimento de trajetória planejada para o líder tem a forma de um paraboloide hiperbólico, parametrizado como

$$\mathbf{x}_{des} = \left[r_x \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \ r_y \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \ z_0 - r_z \cos\left(\frac{4\pi t}{T}\right) \ 0 \right]^\top,$$

em que $r_x = r_y = 1.5\text{m}$, $r_z = 0.5\text{m}$, $z_0 = 2.5\text{m}$, e $T = 60\text{s}$. Para o seguidor, a distância desejada planejada é dada por $t_{des} = [-1.35 \ 0 \ 0 \ 0]^\top \text{m}$, o que significa que o quadrimotor seguidor deve estar 1.35m atrás do quadrimotor líder, com a mesma altitude e a mesma orientação. Para verificar a robustez e ação adaptativa do controlador descrito em (5), os ganhos utilizados na tarefa de seguimento de trajetória foram os mesmos da demonstração de seguimento do marcador com carga pendurada apresentada na Seção 5.



(a) Quadrimotor 1



(b) Quadrimotor 2

Figura 6. Desempenho dos dois quadrimotores para a tarefa de seguimento de trajetória. São mostradas as posições reais e desejadas e o erro de seguimento.

7. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção, estão apresentados os resultados que validaram nossas propostas. Para melhor entendimento do experimento realizado, descrito na Seção 6, recomendamos o vídeo do experimento disponível em <https://youtu.be/XgHrcf>

A Figura 6 exibe o desempenho no cumprimento da missão de seguimento de trajetória para o líder e seguidor. É possível verificar pelos gráficos um erro em torno de 10 cm para o líder no seguimento em xy^w , e em torno de 20 cm para o seguimento 3D do seguidor. Note, sobre o seguimento em z^w para o líder, é possível observar um atraso no rastreamento da referência, causando um erro elevado em valor absoluto. Depurando nossos algoritmos encontramos um engano na implementação do código do quadrimotor líder, entregando a este somente a realimentação de posição, e não a realimentação de posição e de velocidade. A falta da realimentação de velocidade é a causa para o atraso de seguimento em z^w , um equívoco que será corrigido em uma futura versão deste trabalho. Na Figura 7, uma vista em 2D e em 3D exibe a performance de navegação do líder, reforçando a capacidade do sistema em realizar a tarefa proposta.

8. CONCLUSÃO

O objetivo principal que motivou essa pesquisa é o transporte de cargas suspensas por cabo utilizando uma formação de quadrimotores em um ambiente externo. Embora aqui apresentamos somente um compilado dos resultados iniciais para os paradigmas de controle a serem utilizados, estes já estão sob testes para que sejam aplicados para o transporte de cargas. Esta capacidade pode ser observada nos vídeos apresentados nas Seções 5 e 7, bem como neste teste carregando uma carga em forma de barra, com link para visualização em <https://youtu.be/mArtQ43VUF8>.

Como trabalhos futuros, buscaremos finalizar os testes e análises de controle aqui iniciados, na busca por uma solução que seja simples de implementar, que apresente

¹ See <https://www.ros.org/>

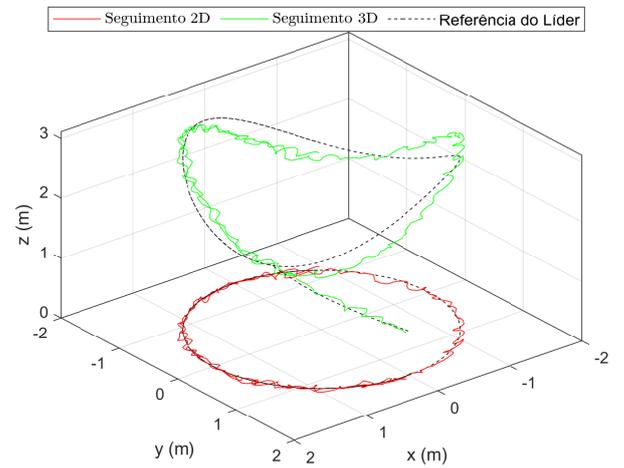


Figura 7. Vistas 2D e 3D da trajetória seguida pelo VANT líder.

robustez contra distúrbios, e que não seja dependente de um sistema custoso de captura de movimentos. Em adição, uma solução para o planejamento da guinada dos agentes será desenvolvido, uma vez que líder e seguidor devem estar alinhados em guinada para o funcionamento da estratégia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a João Vasconcelos, Vinicius Bacheti e Alexandre Caldeira, pelo suporte durante os experimentos realizados. Eles também agradecem à Universidade Federal do Espírito Santo (LAI - Laboratório de Automação Inteligente) e a Universidade Federal de Viçosa (NERO - Núcleo de Especialização em Robótica), pelo suporte experimental oferecido.

REFERÊNCIAS

Beul, M., Nieuwenhuisen, M., Quenzel, J., Rosu, R.A., Horn, J., Pavlichenko, D., Houben, S., and Behnke, S.

- (2019). Team nimbro at mbzirc 2017: Fast landing on a moving target and treasure hunting with a team of micro aerial vehicles. *Journal of Field Robotics*, 36(1), 204–229.
- 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. Linz, Austria,.
- Brandao, 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. doi:10.1109/ICMECH.2009.4957167.
- Castillo, A., Sanz, R., Garcia, P., Qiu, W., Wang, H., and Xu, C. (2019). Disturbance observer-based quadrotor attitude tracking control for aggressive maneuvers. *Control Engineering Practice*, 82, 14–23.
- González, I., Salazar, S., and Lozano, R. (2014). Chattering-free sliding mode altitude control for a quadrotor aircraft: Real-time application. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 73(1-4), 137–155.
- Kanellakis, C. and Nikolakopoulos, G. (2017). Survey on computer vision for UAVs: Current developments and trends. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 87(1), 141–168.
- Krajník, T., Nitsche, M., Faigl, J., Vaněk, P., Saska, M., Přeučil, L., Duckett, T., and Mejail, M. (2014). A practical multirobot localization system. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 76(3-4), 539–562.
- Li, A.Q., Coskun, A., Doherty, S.M., Ghasemlou, S., Jagtap, A.S., Modasshir, M., Rahman, S., Singh, A., Xanthidis, M., O’Kane, J.M., et al. (2016). Experimental comparison of open source vision-based state estimation algorithms. In *International Symposium on Experimental Robotics*, 775–786. Springer.
- Loianno, G., Brunner, C., McGrath, G., and Kumar, V. (2016). Estimation, control, and planning for aggressive flight with a small quadrotor with a single camera and imu. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(2), 404–411.
- Máthé, K. and Buşoniu, L. (2015). Vision and control for UAVs: A survey of general methods and of inexpensive platforms for infrastructure inspection. *Sensors*, 15(7), 14887–14916.
- Mellinger, D., Michael, N., and Kumar, V. (2012). Trajectory generation and control for precise aggressive maneuvers with quadrotors. *The International Journal of Robotics Research*, 31(5), 664–674.
- Muñoz, F., Espinoza, E.S., González-Hernández, I., Salazar, S., and Lozano, R. (2019). Robust trajectory tracking for unmanned aircraft systems using a non-singular terminal modified super-twisting sliding mode controller. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 93(1-2), 55–72.
- Palunko, I., Cruz, P., and Fierro, R. (2012). Agile load transportation : Safe and efficient load manipulation with aerial robots. *IEEE Robotics Automation Magazine*, 19(3), 69–79.
- Parker, L.E. (1998). Alliance: an architecture for fault tolerant multirobot cooperation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(2), 220–240.
- Parker, L.E. (2016). *Multiple Robot Systems*, 1335–1384. Springer Handbooks. Springer International Publishing, 2nd edition.
- Pizetta, I.H.B., Brandão, A.S., and Sarcinelli-Filho, M. (2019). Avoiding obstacles in cooperative load transportation. *ISA Transactions*, 91, 253 – 261. doi:https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.01.019.
- Rajappa, S., Masone, C., Bühlhoff, H.H., and Stegagno, P. (2016). Adaptive super twisting controller for a quadrotor UAV. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2971–2977. IEEE.
- Santana, L.V., Brandão, A.S., and Sarcinelli-Filho, M. (2016). Heterogeneous leader-follower formation based on kinematic models. In *2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 342–346. Arlington, VA, USA. doi:10.1109/ICUAS.2016.7502637.
- 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., 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.
- 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.
- Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L., and Levant, A. (2014). *Sliding mode control and observation*. Springer.
- Slotine, J.J.E., Li, W., et al. (1991). *Applied nonlinear control*, volume 199. Prentice hall Englewood Cliffs, NJ.
- Tang, S. and Kumar, V. (2018). Autonomous flight. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 1, 29–52.
- Utkin, V.I. and Poznyak, A.S. (2013). Adaptive sliding mode control. In *Advances in sliding mode control*, 21–53. Springer.
- Villa, D.K., Brandão, A.S., and Sarcinelli-Filho, M. (2020). A survey on load transportation using multirotor UAVs. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 98, 267–296. doi:10.1007/s10846-019-01088-w.
- Wu, G. and Sreenath, K. (2014). Geometric control of multiple quadrotors transporting a rigid-body load. In *53rd IEEE Conference on Decision and Control*, 6141–6148. Los Angeles, CA, USA.
- Zhao, Z., Li, C., Yang, J., and Li, S. (2019). Output feedback continuous terminal sliding mode guidance law for missile-target interception with autopilot dynamics. *Aerospace Science and Technology*, 86, 256–267.