

TÉCNICAS DE CONTROLE APLICADAS A QUADRIMOTORES NAVEGANDO EM AMBIENTES EXTERIORES

LUCAS VAGO SANTANA*, ALEXANDRE SANTOS BRANDÃO†, MÁRIO SARCINELLI-FILHO‡

*Coordenadoria de Automação Industrial, Instituto Federal do Espírito Santo, Linhares, ES, Brasil

†Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa - MG, Brasil

‡Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil

Emails: lucas@ifes.edu.br, alexandre.brandao@ufv.br, mario.sarcinelli@ufes.br

Abstract— Automatic control techniques applied to a commercial quadrotor navigating in outdoor environments are presented and tested in this work. The objective is to allow a general view of the application of methods commonly used in the literature, but adopting a more didactic approach, using simplifications and practical interpretations of the mathematic models involved in the design of the controllers for autonomous flight. This way, the contribution of this paper is focused on the formation of readers interested in to understand and to reproduce simplified methods with proven efficiency, allowing developing research using commercial equipments of easy access. The control applications here addressed include positioning and trajectory tracking, using a ground computer as auxiliary equipment to the quadrotor.

Keywords— AR.Drone, Autonomous Navigation, Outdoor Environments, UAV Control.

Resumo— Neste trabalho são apresentadas e testadas técnicas de controle automático aplicadas a um quadrimotor comercial navegando em ambientes exteriores. O objetivo é proporcionar uma visão geral da aplicação de métodos comumente utilizados na literatura, porém com uma abordagem mais didática, usando simplificações e interpretações práticas dos modelos matemáticos envolvidos no projeto dos controladores. Dessa forma, este artigo contribui para formação dos leitores interessados em entender e reproduzir métodos simplificados com eficiência prática consolidada, que permitem o desenvolvimento de pesquisas utilizando equipamentos comerciais de fácil acesso. As aplicações de controle contempladas incluem posicionamento e seguimento de trajetória, utilizando-se como equipamento auxiliar ao quadrimotor uma estação computadorizada em solo.

Palavras-chave— AR.Drone, Navegação Autônoma, Ambientes Exteriores, Controle de VANTs.

1 Introdução

A aplicação de técnicas de controle para veículos aéreos não tripulados (VANTs) é um assunto interessante e bastante explorado na literatura há algum tempo em trabalhos como os de Castillo et al. (2004), Hoffmann et al. (2007), Michael et al. (2010) e Engel et al. (2014), que representam alguns dos resultados públicos utilizando este tipo de veículo. Por se tratar de uma estrutura com mecanismos complexos, a descrição matemática e os controladores usados nos VANTs são usualmente de difícil compreensão, principalmente para o leitor iniciante.

Neste trabalho, uma abordagem diferenciada acerca destes temas é realizada, buscando simplificar a descrição matemática de um quadrimotor e propor controladores automáticos de voo baseados nesta simplificação. Durante a discussão das próximas seções, aspectos relevantes do estado da arte são usados para dar sustentação teórica aos métodos apresentados e, além disso, realizam-se voos experimentais que validam as suposições propostas. Dessa forma, a contribuição do trabalho consiste, principalmente, na validação experimental do método de simplificação matemática proposto através dos experimentos em ambientes exteriores.

Na sequência do artigo, a Seção 2 apresenta brevemente o equipamento utilizado no desenvol-

vimento deste trabalho, assim como informações úteis sobre o VANT escolhido, enquanto a Seção 3 discute uma representação matemática para o VANT, assim como sua simplificação, para tornar o modelo mais didático. Na sequência, a Seção 4 apresenta os controladores automáticos de voo propostos. Continuando, a Seção 5 discute brevemente a organização do software utilizado, seguida pela Seção 6, onde se apresentam os resultados experimentais obtidos neste artigo. Por fim, a Seção 7 conclui o texto, com algumas observações sobre o desenvolvimento deste trabalho.

2 O hardware utilizado

O hardware utilizado neste trabalho é composto por um computador portátil, funcionando como estação de controle em solo onde os algoritmos são implementados. A outra parte é um quadrimotor comercial da marca Parrot, modelo AR.Drone 2.0, que pode ser visto na Figura 1. Este equipamento foi considerado para este trabalho principalmente por ter custo moderado (cerca de US\$ 450) e ser de fácil aquisição no mercado. Além disso, este VANT possui características importantes que facilitam o desenvolvimento de códigos de computador para seu comando, conforme Bristeau et al. (2011) e no manual contido em (Piskorski et al., 2012). Há no veículo um computador de

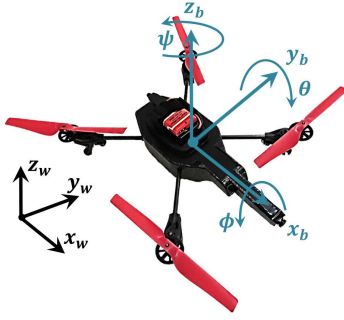


Figura 1: O quadrimotor Parrot AR.Drone 2.0 e seu módulo de GPS. Os sistemas de coordenadas adotados são o global ($\{w\}$) e aquele fixado no corpo do VANT ($\{b\}$).

bordo que auxilia em manobras importantes tais como decolagem, pouso e controle da atitude (ângulos de orientação).

2.1 Comunicação do VANT com um computador

Através de protocolos de comunicação detalhados em (Piskorski et al., 2012), é possível criar uma rede wi-fi e assim estabelecer a comunicação entre um computador e o VANT. Assim, é possível requisitar dados dos sensores embarcados no veículo e enviar sinais de movimento para o drone. Os dados sensoriais disponíveis ficam organizados como

$$\mathbf{q} = [z \ v_x \ v_y \ v_z \ \phi \ \theta \ \psi \ lat \ lng]^T,$$

onde z é a altitude (em m) relativa ao referencial global, v_x , v_y e v_z são as velocidades lineares (em m/s) relativas ao referencial do corpo, e ϕ , θ e ψ são os ângulos de Euler (em rad) relativos referencial global. Os valores lat e lng são a latitude e a longitude (em $^\circ$), relativos a um referencial geográfico não representado na Figura 1.

Para execução de movimentos, o computador de bordo do AR.Drone recebe quatro sinais de controle, normalizados e arranjados como

$$\mathbf{u} = [u_\phi \ u_\theta \ u_z \ u_\psi]^T \in [-1.0, +1.0],$$

onde u_ϕ representa um comando de modificação da orientação ϕ , u_θ representa um comando de modificação da orientação θ , u_z representa um comando de modificação da altitude z e u_ψ representa um comando para modificação da orientação ψ (Piskorski et al., 2012).

3 O modelo simplificado do VANT

O modelo matemático de quadrimotores é bastante conhecido na literatura, possuindo desde versões mais detalhadas, que incluem equações para os motores, efeitos aerodinâmicos nos atuadores e no corpo do veículo, como aqueles detalhados em (Hoffmann et al., 2007) e em (Michael

et al., 2010), até versões mais simplificadas, que consideram os veículos como corpos rígidos no espaço controlados por sinais de alto nível definidos como forças e torques, conforme descrito em (Castillo et al., 2004) e (Kendoul et al., 2010).

Neste trabalho busca-se produzir uma representação simplificada e eficaz (do ponto de vista prático) do veículo, a fim de facilitar o projeto de controladores. Neste contexto, a inspiração vem da ideia primeiramente apresentada por Castillo et al. (2004), onde o veículo é modelado em função de sinais de controle de alto nível, gerando as equações diferenciais

$$\ddot{x} = F(\sin \psi \sin \phi + \cos \psi \cos \phi \sin \theta)/m \quad (1)$$

$$\ddot{y} = F(-\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \cos \phi \sin \theta)/m \quad (2)$$

para a dinâmica translacional, e

$$\ddot{\phi} = \tilde{\tau}_\phi \quad (3)$$

$$\ddot{\theta} = \tilde{\tau}_\theta \quad (4)$$

para a dinâmica rotacional, onde x e y são as posições globais, ϕ e θ são ângulos de Euler, m é a massa do veículo. Os sinais de controle de alto nível do modelo são definidos como F , representando a força de propulsão total gerada pelos motores, $\tilde{\tau}_\phi$ e $\tilde{\tau}_\theta$, representando sinais de entrada virtuais do modelo, obtidos de uma transformação matemática envolvendo os sinais de torque produzidos pela combinação das ações dos propulsores do veículo (Kendoul et al., 2010). Chama-se atenção para a omissão neste modelo das equações referentes ao movimento do VANT nos graus de liberdade z e ψ , a razão para isso é o controlador projetado para eles na Seção 4.

As equações (1) a (4) se aplicam bem para VANTs modernos, como o AR.Drone, os quais possuem um computador de bordo responsável por realizar o controle de baixo nível dos rotores, ajustando automaticamente a propulsão e também a orientação do veículo a partir dos comandos de movimento ($\mathbf{u}$) enviados pelo usuário. Neste contexto, pode-se propor simplificações interessantes ao modelo, considerando que, na prática, os voos serão realizados em condições de orientação próximas ao voo pairado, com $\phi \approx 0.0 \ rad$ e $\theta \approx 0.0 \ rad$ (há, inclusive, um parâmetro configurável no computador de bordo do AR.Drone limitando sua inclinação máxima). Nesta condição, numericamente é possível considerar uma equivalência entre a propulsão gerada pelos rotores e o peso do veículo ($F \approx mg$, com g sendo a aceleração da gravidade) como verdadeira, caso o veículo não modifique sua altitude. Vale lembrar, também, que para pequenos ângulos $\sin(\lambda) \approx \lambda$.

Incluindo tais relações nas equações (1) e (2), pode-se reescrevê-las como

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = g \begin{bmatrix} \sin \psi & \cos \psi \\ -\cos \psi & \sin \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

onde se percebe que as orientações ϕ e θ modificam as posições x e y do veículo, esclarecendo o acoplamento existente entre as dinâmicas translacional e rotacional.

Na dinâmica rotacional, representada nas equações (3) e (4), também é possível estabelecer algumas simplificações. Porém, é relevante dizer que a relação entre os sinais $\tilde{\tau}_\phi$ e $\tilde{\tau}_\theta$ e os comandos reais de orientação u_ϕ e u_θ é bastante complexa. Da perspectiva da literatura, é claramente explicado por Michael et al. (2010), Kendoul et al. (2010), Brandão et al. (2014) e muitos outros autores, que o equacionamento tradicional para esta relação usa parâmetros físicos do veículo (momentos de inércia, distância entre os eixos dos motores, etc.) para estabelecer fórmulas relacionando o comando eletrônico dos motores e as forças e torques produzidos por eles no corpo do veículo. Entretanto, um fator dificulta o uso deste método com o AR.Drone, pois neste veículo não é normal comandar individualmente cada um dos motores, e sim enviar um comando u_ϕ ou u_θ , o qual é interpretado como referência no computador de bordo do veículo, que se responsabiliza por modificar as velocidades dos motores, movimentando o VANT até uma orientação comandada. Tal observação indica a existência de um controlador de baixo nível implementado no veículo, controlando sua atitude (ângulos de orientação).

Sendo assim, neste trabalho se propõe considerar que a resposta dinâmica do veículo aos comandos de orientação u_ϕ e u_θ já é controlada, retirando tal suposição da arquitetura interna do veículo descrita em (Bristeau et al., 2011), cuja representação matemática é aproximada pelas equações diferenciais lineares de segunda ordem

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_\phi^2 u_\phi - 2\zeta_\phi \omega_\phi \dot{\phi} - \omega_\phi^2 \phi \\ \omega_\theta^2 u_\theta - 2\zeta_\theta \omega_\theta \dot{\theta} - \omega_\theta^2 \theta \end{bmatrix}, \quad (6)$$

onde ω_ϕ , ζ_ϕ , ω_θ e ζ_θ são parâmetros de desempenho do controlador de atitude implementado no computador de bordo do VANT.

4 Os controladores de voo

Para o AR.Drone, é possível regular os movimentos relativos à z e ψ em valores desejados fixos utilizando um algoritmo linear, como um controlador Proporcional-Derivativo (PD). Esta ideia já foi consolidada para este veículo em alguns trabalhos, tais como (Krajník et al., 2011) e (Engel et al., 2014), onde os autores mostram a eficiência de algoritmos similares nesta tarefa. Sendo assim, utiliza-se para estas variáveis

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_z \\ \dot{u}_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_z^p \tilde{z} - k_z^d \dot{\tilde{z}} \\ k_\psi^p \tilde{\psi} - k_\psi^d \dot{\tilde{\psi}} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

onde $k_P^z = 0.5$ e $k_D^z = 0.8$ são ganhos proporcionais, $k_P^z = 0.3$ e $k_D^z = 0.3$ são ganhos derivativos, obtidos através de ajustes experimentais,

$\tilde{z} = z_d - z$ é o erro de altitude, com z_d sendo a altitude desejada e z aquela lida dos sensores, $\tilde{\psi} = \psi_d - \psi$ é o erro de orientação, com ψ_d sendo a orientação desejada e ψ aquela lida dos sensores.

Para controlar a dinâmica translacional, a explicação é um pouco mais complexa. Neste trabalho, aplica-se uma estrutura hierárquica de controle, similar àquelas defendidas por Kendoul et al. (2010) e Bertrand et al. (2011). Nesta estratégia um loop externo de controle é usado para controlar as posições x e y , gerando como resultado sinais de orientações desejadas, que por sua vez representam referências de ângulo para um loop interno de controle de ϕ e θ . As Notas 1 e 2 formalizam esta ideia.

Nota 1 (Controladores Independentes A)

*Bertrand et al. (2011) comprova que é possível projetar controladores independentes para as dinâmicas translacional e rotacional de VANTs, utilizando um princípio denominado **Time-Scale Separation**, explicando que em malha-fechada se a convergência da orientação for mais rápida que a da posição, o sistema de controle anula os erros em regime permanente.*

Nota 2 (Controladores Independentes B)

*Kendoul et al. (2010) demonstra a mesma situação, porém oferecendo uma análise da estabilidade global do sistema em cascata (dinâmicas acopladas), através da propriedade denominada **Input-to-State-Stability**.*

Aplicando a proposta de controladores independentes, primeiro se estabelece o loop externo de controle. Para isto, define-se ϕ_d e θ_d como sinais auxiliares de controle, representando as orientações desejadas para o loop interno. Logo a equação (5) é reescrita como

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = g \begin{bmatrix} \sin \psi & \cos \psi \\ -\cos \psi & \sin \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_d \\ \theta_d \end{bmatrix}, \quad (8)$$

de onde se pode projetar os sinais auxiliares como a inversão

$$\begin{bmatrix} \phi_d \\ \theta_d \end{bmatrix} = \frac{1}{g} \begin{bmatrix} \sin \psi & -\cos \psi \\ \cos \psi & \sin \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_x \\ \eta_y \end{bmatrix}, \quad (9)$$

com

$$\begin{bmatrix} \eta_x \\ \eta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_d + k_P^x \tilde{x} + k_D^x \dot{\tilde{x}} \\ \ddot{y}_d + k_P^y \tilde{y} + k_D^y \dot{\tilde{y}} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

onde $\tilde{x} = x_d - x$ e $\tilde{y} = y_d - y$ representam os erros de posição, com x_d e y_d sendo os valores desejados e x e y os valores obtidos dos sensores, $k_P^x = 2.0$ e $k_P^y = 2.0$ são ganhos proporcionais, e, finalmente, $k_D^x = 2.0$ e $k_D^y = 2.0$ são ganhos derivativos.

Substituindo (9) e (10) em (8), a dinâmica do erro translacional, em malha-fechada, se torna

$$\begin{bmatrix} \ddot{\tilde{x}} \\ \ddot{\tilde{y}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_P^x \tilde{x} - k_D^x \dot{\tilde{x}} \\ -k_P^y \tilde{y} - k_D^y \dot{\tilde{y}} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

concluindo que $\{\tilde{x}, \tilde{y}\} \rightarrow \mathbf{0}$ com $t \rightarrow \infty$, desde que $k_P^x > 0$, $k_D^x > 0$, $k_P^y > 0$ e $k_D^y > 0$.

Agora, (9) é usada para determinar valores para as entradas de controle auxiliares como

$$\phi_d = \text{sat}_{\phi, \theta} \left(\frac{1}{g} [\sin \psi \eta_x - \cos \psi \eta_y] \right), \quad (12)$$

$$\theta_d = \text{sat}_{\phi, \theta} \left(\frac{1}{g} [\cos \psi \eta_x + \sin \psi \eta_y] \right), \quad (13)$$

onde

$$\text{sat}_{\phi, \theta}(\alpha) = \begin{cases} \alpha, & \text{se } |\alpha| \leq 0.175 \text{ rad} \\ 0.175 \text{sign}(\alpha), & \text{de outra forma} \end{cases}$$

é uma função de saturação limitando a inclinação até a norma de 0.175 rad (valor escolhido por testes práticos).

Assumindo que o loop interno de regulação da orientação seja capaz de seguir as referências dadas por (12) e (13), o efeito prático da função de saturação é truncar a inclinação do veículo, que por sua vez irá assumir momentaneamente uma orientação limite constante, movendo-se em direção à posição desejada. Tal comportamento, eventualmente, modifica a região de operação do controlador para fora da zona de saturação, mantendo a estabilidade, garantida pela análise da equação (11).

Finalmente, as referências das orientações são passadas ao loop de controle interno como

$$\begin{bmatrix} u_\phi \\ u_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_d \\ \theta_d \end{bmatrix}, \quad (14)$$

pois neste caso substituindo estes sinais na equação (6), a dinâmica rotacional torna-se

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_\phi^2 \phi_d - 2\zeta_\phi \omega_\phi \dot{\phi} - \omega_\phi^2 \phi \\ \omega_\theta^2 \theta_d - 2\zeta_\theta \omega_\theta \dot{\theta} - \omega_\theta^2 \theta \end{bmatrix}, \quad (15)$$

a qual sugere que o controlador do loop interno será capaz de seguir uma referência de orientação desejada, com o desempenho determinado pelos parâmetros do modelo. Tal conclusão pode ser obtida com uma breve análise, feita considerando apenas o ângulo ϕ , cuja função de transferência no domínio de Laplace aparece como

$$\Phi(s) = \frac{\omega_\phi^2}{s^2 + 2\zeta_\phi \omega_\phi s + \omega_\phi^2} \Phi_d(s). \quad (16)$$

Utilizando-se a ideia de Bertrand et al. (2011), supõe-se que as referências de ângulo serão constantes durante todo o período de execução do loop externo de controle. Logo, o comportamento da referência (ϕ_d) neste intervalo de tempo é similar a um degrau. Pelo teorema do valor final, é simples concluir para o degrau em (16) que $\phi \rightarrow \phi_d$ em um tempo t finito. Em relação à Nota 1, se este tempo de convergência for menor do que o

período do loop externo de controle, a estrutura hierárquica funcionará corretamente. De fato, isto é compatível com a realidade, conforme se comprova nos experimentos da Seção 6. Além disso, o computador de bordo do AR.Drone controla sua orientação (loop interno) a uma frequência de 200 Hz (Bristeau et al., 2011), enquanto o loop externo de controle está configurado para rodar a 50 Hz. Assim, considera-se que nestas configurações as Notas 1 e 2 são válidas para ϕ e também para θ , de forma análoga.

5 Arquitetura desenvolvida para os experimentos

Para execução dos experimentos, na estação de solo foram programados alguns algoritmos representados por blocos no diagrama da Figura 2. No bloco *Gerador de Referências* declara-se os valores desejados para a navegação do veículo. Tais valores são fixos para z e ψ e controlados pelo bloco *Controlador PD* correspondente à equação (7). A saída deste bloco é enviada ao computador de bordo do AR.Drone, por sua vez modifica os atuadores de acordo com o requisitado.

Para x e y os valores desejados podem variar no tempo, e são controlados pela estrutura hierárquica da Seção 4. O bloco *Controlador de Posição* se refere ao loop externo de controle, e significa a implementação das equações (9) até (14). A saída deste bloco é enviada ao AR.Drone, que executa tanto seu loop interno de controle da orientação quanto o controle dos atuadores através de códigos implementados no computador de bordo do VANT, aos quais não se tem acesso.

Finalmente, o bloco denominado *Filtro de Kalman* se refere a uma implementação baseada em (Santana et al., 2015), onde o código de um estimador de estados é detalhado, mostrando um método para fornecer dados sensoriais de realimentação para os controladores, tais como posições e velocidades do VANT no referencial global. Na implementação deste bloco, os cálculos são realizados através da fusão dos dados de GPS e dos sensores inerciais, usando as variáveis fornecidas pelo computador de bordo do veículo em q . Para maiores informações, recomenda-se leitura de (Santana et al., 2015).

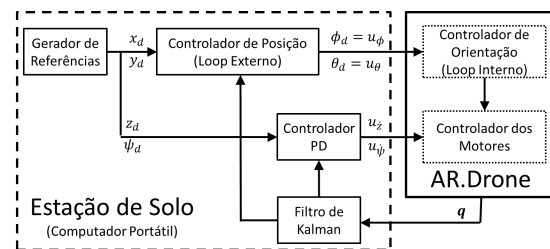


Figura 2: Arquitetura de software em diagrama de blocos.

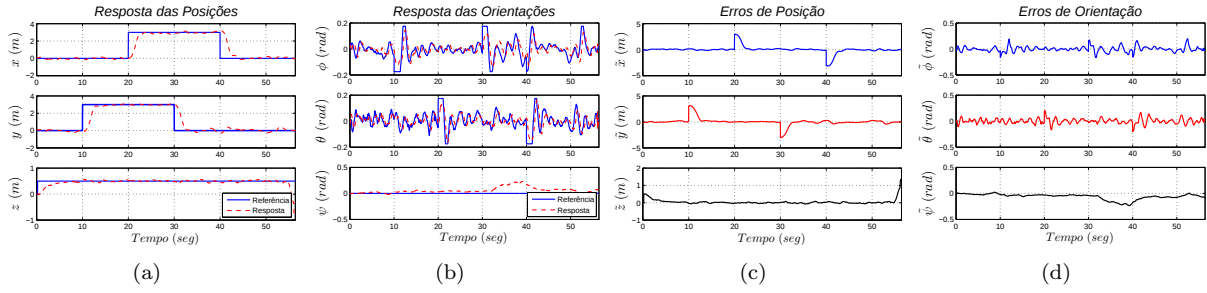


Figura 3: Experimento de navegação entre vértices de um quadrado.

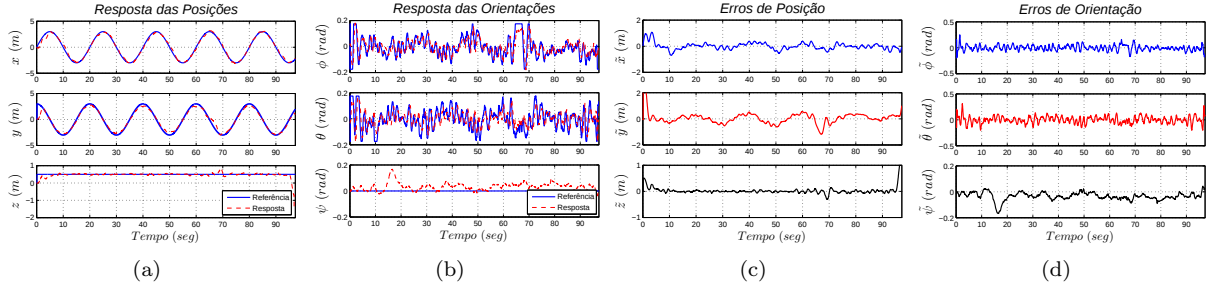


Figura 4: Experimento de seguimento de trajetória circular.

6 Resultados experimentais

Nesta Seção são apresentados dois experimentos envolvendo os conceitos discutidos neste trabalho, comprovando a eficácia prática das suposições feitas anteriormente. Nos gráficos desta seção, considerem-se os sinais $\tilde{\phi} = \phi_d - \phi$, $\tilde{\theta} = \theta_d - \theta$ e $\tilde{\psi} = \psi_d - \psi$ como erros de orientação em radianos.

6.1 Navegação entre pontos

O primeiro experimento é ilustrado na Figura 3, e corresponde a uma navegação entre pontos distintos definidos como os vértices de um quadrado com lado de 3 m. Para um melhor entendimento, um video deste experimento está disponível em <https://youtu.be/36AoFZthfKU>. O objetivo deste experimento é averiguar a capacidade do sistema em controlar a posição do veículo no espaço, bem como avaliar a sua resposta em situações de saturação, introduzidas através dos erros de posição desejada. A altitude desejada é $z_d = 0.5$ m, e a orientação desejada é $\psi_d = 0.0$ rad, enquanto os valores de x_d e y_d são modificados a cada $t = 10$ s, de acordo com a sequência

$$\begin{cases} x_d = 0.0 \text{ m}, y_d = 0.0 \text{ m} \\ x_d = 0.0 \text{ m}, y_d = 3.0 \text{ m} \\ x_d = 3.0 \text{ m}, y_d = 3.0 \text{ m} \\ x_d = 3.0 \text{ m}, y_d = 0.0 \text{ m} \end{cases}$$

Nas Figuras 3(a) e 3(b) é possível observar os dados do experimento, em termos dos valores de referência (desejados) comparados com os valores capturados dos sensores do veículo, para variáveis de

interesse no controle. Observe-se que a cada mudança de x_d e y_d grandes erros de posição (ver Figura 3(c)) e de orientação (ver Figura 3(d)) são introduzidos. Nestes casos, é introduzida uma saturação forçada, e mesmo assim é possível notar a capacidade do sistema de recuperar os valores desejados, tanto de posição como de orientação. Fica claro que mesmo enfrentando falhas no seguimento das referências, todos os erros em regime permanente tendem para zero. As imperfeições e ruídos presentes nos gráficos das curvas são atribuídos a erros numéricos oriundos dos dados sensoriais e dos cálculos numéricos envolvidos no sistema de controle. Também é provável que erros de modelagem influenciem nestas curvas, principalmente em relação às imperfeições notadas no rastreamento dos valores desejados de orientação. Entretanto, como pode ser visto na Figura 3, a resposta real do veículo no experimento acompanha o que se esperava, a partir das análises nas seções anteriores, tornando as suposições e simplificações teóricas coerentes com o voo prático.

6.2 Seguimento de trajetória circular

O segundo experimento é ilustrado na Figura 4, e corresponde ao seguimento de uma trajetória circular. O objetivo deste experimento é averiguar a capacidade do sistema em controlar a navegação do veículo em posições que variam no tempo. A altitude desejada é $z_d = 0.5$ m, e a orientação desejada é $\psi_d = 0.0$ rad, enquanto os valores de x_d e y_d variam de acordo com

$$\begin{cases} x_d = 3.0 \sin\left(\frac{2\pi}{20.0} t\right) \text{ m} \\ y_d = 3.0 \cos\left(\frac{2\pi}{20.0} t\right) \text{ m} \end{cases}$$

Nas Figuras de 4(a) até 4(d) uma análise similar à do experimento anterior pode ser feita pelo leitor. Observe-se que para esta trajetória os valores desejados de orientação não ultrapassam o limite estabelecido de 0.175 rad , apresentando saturação pequenos intervalos deste experimento. É possível ainda notar a capacidade do sistema de guiar o veículo sobre a trajetória, minimizando os erros em regime, mantendo-os próximos de zero, concluindo a eficiência prática da técnica de controle. Supondo uma situação ideal, onde não houvesse ruído nem erro de modelagem e nem forças externas (como a influência do vento no voo), o seguimento seria perfeito. Entretanto, na prática os sinais sempre são imperfeitos, o que leva as curvas a possuírem a característica observada na Figura 4. Para uma melhor análise do desempenho do sistema, um vídeo deste experimento está disponível em <https://youtu.be/BbGa7DiBbvU>.

7 Conclusões

Neste trabalho apresentou-se uma abordagem para modelagem e projeto de controladores automáticos para um VANT do tipo quadrimotor. Os controladores foram testados em ambientes exteriores, utilizando-se realimentação com dados inerciais e de GPS. Verificou-se a possibilidade de dar uma interpretação mais prática a um equacionamento tradicional da literatura deste veículo, tornando o projeto de controladores uma tarefa simplificada e didática. Os testes práticos foram exibidos em vídeo, proporcionando uma melhor interpretação dos assuntos abordados, concluindo as suposições e simplificações acerca do modelo do veículo e seu computador de bordo como válidas nos experimentos, onde claramente os comportamentos esperados foram observados.

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, pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa. Eles também agradecem à UFES, ao IFES, à UFV e à FAPEMIG, por viabilizarem sua participação neste trabalho.

Referências

Bertrand, S., Guénard, N., Hamel, T., Piet-Lahanier, H. and Eck, L. (2011). A hierarchical controller for miniature {VTOL} uavs: Design and stability analysis using singular perturbation theory, *Control Engineering Practice* **19**(10): 1099 – 1108.

Brandão, A. S., Gandolfo, D., Sarcinelli-Filho, M. and Carelli, R. (2014). Pvtol maneuvers guided by a high-level nonlinear controller applied to a rotorcraft machine, *European Journal of Control* **20**(4): 172 – 179.

Bristeau, P.-J., Callou, F., Vissiere, D. and Petit, N. (2011). The navigation and control technology inside the ar.drone micro uav, *Proceedings of the 18th IFAC World Congress*, Vol. 18, Milan, Italy.

Castillo, P., Dzul, A. and Lozano, R. (2004). Real-time stabilization and tracking of a four-rotor mini rotorcraft, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **12**(4): 510–516.

Engel, J., Sturm, J. and Cremers, D. (2014). Scale-aware navigation of a low-cost quadrocopter with a monocular camera, *Robotics and Autonomous Systems* **62**(11): 1646–1656.

Hoffmann, G. M., Huang, H., Wasl, S. L. and Tomlin, E. C. J. (2007). Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment, *In Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*.

Kendoul, F., Yu, Z. and Nonami, K. (2010). Guidance and nonlinear control system for autonomous flight of minirotorcraft unmanned aerial vehicles, *Journal of Field Robotics* **27**(3): 311–334.

Krajník, T., Vonasek, V., Fiser, D. and Faigl, J. (2011). Ar-drone as a platform for robotic research and education, *Research and Education in Robotics*, Vol. 161, Springer.

Michael, N., Mellinger, D., Lindsey, Q. and Kumar, V. (2010). The grasp multiple micro-uav testbed, *Robotics Automation Magazine, IEEE* **17**(3): 56–65.

Piskorski, S., Brulez, N., Eline, P. and DHaeyer, F. (2012). *AR.Drone Developer Guide*, Parrot. SDK Version 2.0.

Santana, L. V., Brandão, A. S. and Sarcinelli-Filho, M. (2015). An automatic flight control system for the ar.drone quadrotor in outdoor environments, *2015 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems*, pp. 401–410.