

CONTROLE DINÂMICO ADAPTATIVO PARA VEÍCULOS AÉREOS NÃO-TRIPULADO

MILTON CESAR PAES SANTOS*, JORGE A. SARAPURA†, MÁRIO SARCINELLI-FILHO‡, RICARDO CARELLI†

**Instituto Federal do Espírito Santo, Santa Teresa - ES, Brasil*

†*Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina*

‡*Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, Brasil*

Emails: milton.santos@ifes.edu.br, jsarapura@inaut.unsj.edu.ar,
mario.sarcinelli@gmail.com, rcarelli@inaut.unsj.edu.ar

Abstract— This paper proposes an adaptive dynamic controller to guide an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) during trajectory tracking. Initially, the reference velocities are generated by a controller that is based only on kinematic model. Next, new velocities values are calculated to compensate for dynamic of the UAV. The model parameters that characterize the dynamics of the robot are updated during navigation, thus providing smaller errors and better flight performance in UAV applications. The stability of the controller is based on Lyapunov theory. Experimental results are also presented, which demonstrate the good performance of the proposed controller without any prior knowledge of the values of UAV dynamics parameters.

Keywords— Adaptive Controller, Dynamic Model, Trajectory Tracking

Resumo— Este trabalho propõe um controlador dinâmico adaptativo para um veículo aéreo não tripulado (VANT) navegar sobre uma trajetória desejada. Inicialmente, são geradas velocidades de referência por um controlador que se baseia apenas no modelo cinemático do VANT. Posteriormente, novas ações de controle são calculadas para compensar a dinâmica interna do robô. Os parâmetros do modelo que caracterizam a dinâmica do robô são atualizados durante a navegação. Dessa forma, melhora-se a performance das aplicações de voo com os VANTs, visto que os erros de controle são minimizados. A prova de estabilidade do controlador proposto é baseada na teoria de Lyapunov. Resultados experimentais são apresentados para demonstrar a boa performance do controlador sem qualquer conhecimento prévio dos valores dos parâmetros da dinâmica do VANT.

Palavras-chave— Controle Adaptativo, Modelo Dinâmico, Seguimento de Trajetória

1 Introdução

Os veículos aéreos não tripulados (VANTs) são sistemas com dinâmica não-linear, cujas características dinâmicas não são apenas difíceis de medir, mas também podem variar ao longo da tarefa de operação. A maioria das técnicas de controle de voo se baseiam em um determinado modelo do veículo que se deseja controlar. Portanto, muitos algoritmos precisam de uma boa identificação do modelo (Santana et al., 2016) ou métodos para atualizar o modelo dinâmico do VANT (Hatamleh et al., 2009) (Lin et al., 2013) (Ye et al., 2006). Essas técnicas são desejáveis nas aplicações com VANTs já que tornam a navegação autônoma do veículo mais estável.

Melhorar o desempenho e a qualidade do voo dos VANTs são objetivos interessantes para robótica aérea, visto que os VANTs podem ser usados em uma vasta área de aplicações como militares, civis, industrial, comercial e aplicações agrícolas, como a vigilância, rastreamento de objetos, voo de formação, avaliação de danos de batalha, resgate de vítimas, pulverização das culturas, de supressão de fogo, e inspeção da ponte, etc.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver e experimentalmente verificar um método para controlar um VANT sobre uma trajetória desejada e, concomitantemente, estimar os parâmetros do

modelo dinâmico. Em (Martins et al., 2008), os autores apresentam técnica similar, porém aplicada em um robô terrestre sendo controlado em um espaço 2D variando apenas a carga. Este trabalho aborda a utilização de uma lei de atualização dos parâmetros para ajustar os parâmetros do modelo e reduzir os erros de controle além de realizar o controle sobre a trajetória desejada, em todas as direções de controle (x, y, z) e orientação do VANT (ψ). Outros métodos de controle dinâmico (Felix, 2007) (Madani and Benallegue, 2006) (Efe, 2007) são apresentados na literatura para executar a mesma tarefa de controle aqui proposto, entretanto nossa abordagem não é necessária a identificação dos parâmetros do VANT antes da navegação.

Para tratar de tais temas, a Seção 2 apresenta o modelo e o controlador utilizados para controle de seguimento de trajetória do VANT. Prosseguindo, a Seção 3 apresenta os resultados obtidos durante o controle e atualização dos parâmetros do modelo e, por fim, algumas conclusões são mencionadas na Seção 4.

2 Modelos e Controladores

Neste trabalho é utilizado um VANT de pás rotativas do tipo quadrimotor, o AR.Drone 2.0 Power

Edition®, da Parrot, Inc. Tal VANT é apresentado na Figura 1, juntamente com os sistemas de coordenadas adotados.

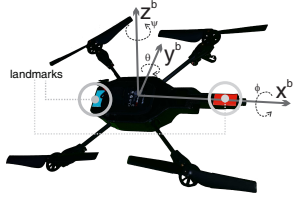


Figura 1: O quadrimotor AR.Drone 2.0 PowerEdition®, da Parrot, Inc., e os sistemas de coordenadas adotados ($\{w\}$ é o sistema global e $\{b\}$ é o do veículo).

O Ar.Drone é um veículo aéreo autônomo comercializado como brinquedo, originalmente desenvolvido para ser controlador por telefones ou *tablets*, por rede Wi-Fi com seu próprio protocolo de comunicação. Ele é equipado com um sistema de processamento baseado em um processador ARM Cortex-A8 e diversos sensores que auxiliam na estimação da posição e velocidades do veículo. Sensores barométricos, sonares, inerciais (IMU) com acelerômetros, giroscópios e magnetômetros são fundamentais para estimar os estados de posição, velocidade e aceleração do VANT no mundo. Na Seção 3, os dados mensurados por estes sensores serão utilizados em um sistema de fusão para a realização dos experimentos, conforme (Santos, Santana, Martins, Brandao and Sarcinelli-Filho, 2015). A seguir, cumpre-se apresentar a matemática e os métodos utilizados para o seguimento de trajetória utilizando um controlador dinâmico adaptativo.

O modelo cinemático do UAV utilizado para desenvolver o controlador é composto por um conjunto de quatro velocidades representadas no seu próprio sistema de referência $\langle b \rangle$, rotacionadas por ψ . Cada velocidade linear do UAV é direcionada conforme um dos eixos do referencial, por exemplo, u_z causa um deslocamento na direção do eixo z , enquanto que u_x e u_y causam um deslocamento frontal e lateral, respectivamente. Já a velocidade angular ω causa o giro em torno do eixo z , no sentido anti-horário. Assim, o movimento cartesiano pode ser descrito como $\dot{x} = f(x)u$, ou seja

$$\dot{\mathbf{x}}^w = \mathbf{F}\mathbf{u}_{ref}^b, \quad (1)$$

onde $\dot{\mathbf{x}} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \dot{\psi}]^T$ são as velocidades linear do UAV no espaço 3D e sua velocidade de rotação em torno do eixo z , $\mathbf{u}_{ref}^b = [u_{rx} \ u_{ry} \ u_{rz} \ u_{r\psi}]^T$ são os comandos de velocidade do UAV expressados em seu próprio marco de referência $\langle b \rangle$ e a matriz

$\mathbf{F}$ é dada por

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Aplicando a cinemática inversa na Equação (1), tem-se

$$\mathbf{u}_{ref}^b = \mathbf{F}^{-1}\dot{\mathbf{x}}^w. \quad (3)$$

2.1 Dinâmico

Considerando que o VANT possui uma dinâmica (Engel et al., 2012) (Santana et al., 2013), adotou-se

$$\mathbf{u}^b = \mathbf{A}\dot{\mathbf{x}}^w + \mathbf{B}\ddot{\mathbf{x}}^w, \quad (4)$$

sendo

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= (\mathbf{F}\mathbf{K}_u)^{-1} = \mathbf{K}_u^{-1}\mathbf{F}^1 \\ \mathbf{B} &= \mathbf{A}\mathbf{F}\mathbf{K}_v\mathbf{F}^{-1} = \mathbf{K}_u^{-1}\mathbf{K}_v\mathbf{F}^{-1} \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 Cinemático

Considerando os modelos citados acima, a lei de controle que se propõe para realizar o seguimento de uma trajetória é dada por

$$u_{ref}^c = \mathbf{F}^{-1} [\dot{\mathbf{x}}_d^w + \mathbf{K}_c \tanh(\mathbf{K}_\gamma \tilde{\mathbf{x}}^w)], \quad (6)$$

onde $\tilde{\mathbf{x}}^w = \mathbf{x}_d - \mathbf{x}$. Sendo $\dot{\mathbf{x}}_d^w$ e $\mathbf{x}_d^w$ são velocidade e posição desejadas em um determinado instante t , respectivamente. As matrizes

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_c &= \text{diag}(k_{cx} \ k_{cy} \ k_{cz} \ k_{c\psi}) \\ \mathbf{K}_\gamma &= \text{diag}(k_{\gamma x} \ k_{\gamma y} \ k_{\gamma z} \ k_{\gamma \psi}) \end{aligned} \quad (7)$$

são definidas positivas.

2.2.1 Análise de Estabilidade

Esta análise de estabilidade se supõe um seguimento perfeito de velocidade, permitindo igualar as equações (3) e (6), ou seja $\mathbf{u}_{ref}^b = \mathbf{u}_{ref}^c$. Isso implica que os efeitos dinâmicos do VANT são ignorados. Então, chamando $\tilde{\mathbf{x}}^w = \mathbf{x}_d - \mathbf{x}$ um vetor de erro de saída, a equação em malha fechada, em termos de erros de velocidade, é

$$\mathbf{F}^{-1} [\dot{\mathbf{x}}_d^w + \mathbf{K}_c \tanh(\mathbf{K}_\gamma \tilde{\mathbf{x}}^w)] - \mathbf{F}^{-1}\dot{\mathbf{x}}^w = 0 \quad (8)$$

ou

$$\tilde{\dot{\mathbf{x}}}^w = -\mathbf{K}_c \tanh(\mathbf{K}_\gamma \tilde{\mathbf{x}}^w). \quad (9)$$

Nesta equação, observa-se que o único ponto de equilíbrio é a origem. Para concluir sobre a estabilidade do ponto de equilíbrio, a seguinte função candidata de Lyapunov é proposta

$$\mathbf{V} = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{x}}^{wT} \tilde{\mathbf{x}}^w > 0, \quad (10)$$

cujas a primeira derivada temporal é

$$\dot{\mathbf{V}} = \tilde{\mathbf{x}}^{wT} \tilde{\dot{\mathbf{x}}}^w = -\tilde{\mathbf{x}}^{wT} \mathbf{K}_c \tanh(\mathbf{K}_\gamma \tilde{\mathbf{x}}^w). \quad (11)$$

e definida negativa. Portanto, o sistema tem um ponto de equilíbrio assintoticamente estável na origem, o qual implica que $\tilde{\mathbf{x}} \rightarrow 0$ quando $t \rightarrow \infty$.

2.3 Dinâmico Adaptativo

O modelo dinâmico da Equação (4), com

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\cos \psi}{k_1} & \frac{\sin \psi}{k_1} & 0 & 0 \\ -\frac{\sin \psi}{k_3} & \frac{\cos \psi}{k_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{k_5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{k_7} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{k_2 \cos \psi}{k_1} & \frac{k_2 \sin \psi}{k_1} & 0 & 0 \\ -\frac{k_4 \sin \psi}{k_3} & \frac{k_4 \cos \psi}{k_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_6}{k_5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{k_8}{k_7} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ u_\psi \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{x}^w \cos \psi + \dot{y}^w \sin \psi & 0 & 0 & 0 & \dot{x}^w \cos \psi + \dot{y}^w \sin \psi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\ddot{x}^w \sin \psi + \dot{y}^w \cos \psi & 0 & 0 & 0 & -\dot{x}^w \sin \psi + \dot{y}^w \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddot{z}^w & 0 & 0 & 0 & \ddot{z}^w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddot{\psi}^w & 0 & 0 & 0 & \ddot{\psi}^w \end{bmatrix}}_{\mathbf{G}} \underbrace{\begin{bmatrix} 1/k_1 \\ 1/k_3 \\ 1/k_5 \\ 1/k_7 \\ k_2/k_1 \\ k_4/k_3 \\ k_6/k_5 \\ k_8/k_7 \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{\theta}} \quad (14)$$

onde $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5 \ \theta_6 \ \theta_7 \ \theta_8]^T = [\frac{1}{k_1} \ \frac{1}{k_3} \ \frac{1}{k_5} \ \frac{1}{k_7} \ \frac{k_2}{k_1} \ \frac{k_4}{k_3} \ \frac{k_6}{k_5} \ \frac{k_8}{k_7}]^T$. A Equação (9) pode

Parametrizando a (2.3), obtém-se a seguinte forma

$$\mathbf{u}^b = \mathbf{A}\ddot{\mathbf{x}}^w + \mathbf{B}\dot{\mathbf{x}}^w = \mathbf{G}\boldsymbol{\theta}, \quad (13)$$

ser expressa em forma compacta como:

$$\mathbf{u}^b = \mathbf{D}(\mathbf{F}^{-1}\ddot{\mathbf{x}}^w) + \boldsymbol{\eta} = \mathbf{D}\ddot{\mathbf{x}}^b + \boldsymbol{\eta} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ u_\psi \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \theta_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \theta_4 \end{bmatrix}}_{\mathbf{D}} \underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{x}^w \cos \psi + \dot{y}^w \sin \psi \\ -\ddot{x}^w \sin \psi + \dot{y}^w \cos \psi \\ \ddot{z}^w \\ \ddot{\psi}^w \end{bmatrix}}_{\ddot{\mathbf{x}}^b} + \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{x}^w \cos \psi + \dot{y}^w \sin \psi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\dot{x}^w \sin \psi + \dot{y}^w \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{z}^w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dot{\psi}^w \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{\eta}} \underbrace{\begin{bmatrix} \theta_5 \\ \theta_6 \\ \theta_7 \\ \theta_8 \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{\theta}} \quad (16)$$

Baseado na dinâmica inversa, propõe-se a seguinte lei de controle

$$\mathbf{u}_{ref} = \mathbf{D}\boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\eta}, \quad (17)$$

sendo

$$\boldsymbol{\eta} = [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3 \ \sigma_4]^T = \mathbf{F}^{-1}\ddot{\mathbf{x}}_{ref}^w + \mathbf{K}_d\mathbf{F}^{-1}\dot{\mathbf{x}}^w, \quad (18)$$

onde $\mathbf{F}^{-1}\ddot{\mathbf{x}}_{ref}^w = \dot{\mathbf{u}}_{ref}^c$ e $\mathbf{F}^{-1}\dot{\mathbf{x}}_{ref}^w = \dot{\mathbf{u}}_{ref}^c - \mathbf{F}^{-1}\dot{\mathbf{x}}^w$. Logo, a Equação (11) pode ser reescrita como

$$\mathbf{u}_{ref} = \mathbf{G}\boldsymbol{\theta} \quad (19)$$

onde

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 & 0 & 0 & g_{15} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_{22} & 0 & 0 & 0 & g_{26} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{33} & 0 & 0 & 0 & g_{37} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{44} & 0 & 0 & 0 & g_{48} \end{bmatrix} \quad (20)$$

com

$$\begin{aligned} g_{48} &= \dot{\psi}^w \\ g_{44} &= \ddot{\psi}_{ref} + k_{d\psi}[\dot{\psi}_{ref} - \dot{\psi}^w] \\ g_{37} &= \dot{z}^w \\ g_{33} &= \ddot{z}_{ref} + k_{dz}[\dot{z}_{ref} - \dot{z}^w] \\ g_{26} &= -\dot{x}^w \sin \psi + \dot{y}^w \cos \psi \\ g_{22} &= \ddot{y}_{ref} + k_{dy}[\dot{y}_{ref} - (-\dot{x}^w \sin \psi + \dot{y}^w \cos \psi)] \\ g_{15} &= \dot{x}^w \cos \psi + \dot{y}^w \sin \psi \\ g_{11} &= \ddot{x}_{ref} + k_{dx}[\dot{x}_{ref} - (\dot{x}^w \cos \psi + \dot{y}^w \sin \psi)] \end{aligned} \quad (21)$$

Considerando incertezas nos parâmetros do VANT, considera-se a seguinte lei de controle

$$\mathbf{u}_{ref} = \mathbf{G}\hat{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{G}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{G}\tilde{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{D}\boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\eta} + \mathbf{G}\tilde{\boldsymbol{\theta}}, \quad (22)$$

onde $\boldsymbol{\theta}$ e $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ são os parâmetros reais e estimados do VANT, enquanto que $\tilde{\boldsymbol{\theta}} = \hat{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{\theta}$ é o vetor de erro dos parâmetros.

2.3.1 Análise de Estabilidade

Das Equações (10) e (16), obtém-se a equação em malha fechada

$$\mathbf{D}\ddot{\mathbf{x}}^b + \boldsymbol{\eta} = \mathbf{D}\boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\eta} + \mathbf{G}\tilde{\boldsymbol{\theta}} \quad (23)$$

que é equivalente a

$$\mathbf{D}(\boldsymbol{\sigma} - \ddot{\mathbf{x}}^b) = -\mathbf{G}\tilde{\boldsymbol{\theta}}. \quad (24)$$

Considerando

$$\boldsymbol{\sigma} - \ddot{\mathbf{x}}^b = \ddot{\mathbf{x}}^b + \mathbf{K}\dot{\mathbf{x}}^b, \quad (25)$$

onde $\ddot{\mathbf{x}}^b = \mathbf{u}_{ref}^c - \dot{\mathbf{x}}^b$ e $\mathbf{K} = \text{diag}(k_{e1}, k_{e2}, k_{e3}, k_{e4})$ é uma matriz definida positiva. Logo

$$\mathbf{D}(\ddot{\mathbf{x}}^b + \mathbf{K}\dot{\mathbf{x}}^b) = -\mathbf{G}\tilde{\boldsymbol{\theta}} \quad (26)$$

ou

$$\ddot{\mathbf{x}}^b = -\mathbf{D}^{-1}\mathbf{G}\tilde{\boldsymbol{\theta}} - \mathbf{K}\dot{\mathbf{x}}^b. \quad (27)$$

A Equação (23) representa a equação de erro do sistema de controle. Considera-se a seguinte função candidata de Lyapunov

$$\mathbf{V} = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{x}}^b{}^T \mathbf{D} \dot{\mathbf{x}}^b + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \gamma \tilde{\theta}, \quad (28)$$

onde $\gamma \in \mathbb{R}^{8 \times 8}$ é uma matriz diagonal definida positiva. Usando $\dot{\tilde{\theta}} = \dot{\hat{\theta}}$ (considerando constante o vetor de parâmetros reais $\dot{\hat{\theta}} = 0$), a derivada da função candidata de Lyapunov pode ser escrita como

$$\dot{\mathbf{V}} = -\dot{\mathbf{x}}^b{}^T \mathbf{D} \mathbf{K} \dot{\mathbf{x}}^b - \dot{\mathbf{x}}^b{}^T \mathbf{G} \tilde{\theta} + \tilde{\theta}^T \gamma \dot{\tilde{\theta}}. \quad (29)$$

Definem-se as seguintes leis de adaptação dos parâmetros para o controlador proposto,

$$\dot{\tilde{\theta}} = \gamma^{-1} \mathbf{G}^T \tilde{\mathbf{x}}^b \quad (30)$$

Substituindo a Equação (26) em (25), tem-se

$$\dot{\mathbf{V}} = -\dot{\mathbf{x}}^b{}^T \mathbf{D} \mathbf{K} \dot{\mathbf{x}}^b \leq 0. \quad (31)$$

Dessa forma, garante-se apenas que os sinais $\dot{\mathbf{x}}^b$ e $\tilde{\theta}$ são sinais limitados. Integrando a Equação (27), obtém-se

$$\mathbf{V}(T) - \mathbf{V}(0) = - \int_0^T \dot{\mathbf{x}}^b{}^T \mathbf{D} \mathbf{K} \dot{\mathbf{x}}^b dt. \quad (32)$$

Ignorando $\mathbf{V}(T)$, tem-se a seguinte condição

$$\mathbf{V}(0) \geq \int_0^T \dot{\mathbf{x}}^b{}^T \mathbf{D} \mathbf{K} \dot{\mathbf{x}}^b dt \quad (33)$$

se verifica.

Como $\mathbf{D} \mathbf{K}$ é simétrica e definida positiva, seja $\lambda_{\min}(\mathbf{D} \mathbf{K})$ e $\lambda_{\max}(\mathbf{D} \mathbf{K})$ os autovalores mínimo e máximo da matriz, então:

$$\lambda_{\min}(\mathbf{D} \mathbf{K}) \|\dot{\mathbf{x}}^b\|^2 \leq \dot{\mathbf{x}}^b{}^T \mathbf{D} \mathbf{K} \dot{\mathbf{x}}^b \leq \lambda_{\max}(\mathbf{D} \mathbf{K}) \|\dot{\mathbf{x}}^b\|^2. \quad (34)$$

Da equação (29) e (30), obtém-se

$$\int_0^T \|\dot{\mathbf{x}}^b\|^2 dt \leq \frac{\mathbf{V}(0)}{\lambda_{\min}(\mathbf{D} \mathbf{K})}, \forall T. \quad (35)$$

Portanto, $\dot{\mathbf{x}}^b$ é quadrado integrável. Logo, como $\dot{\mathbf{x}}^b$, $\tilde{\theta}$ e $\mathbf{G}$ são todos limitados, de acordo com a expressão $\ddot{\mathbf{x}}^b = -\mathbf{D}^{-1} \mathbf{G} \tilde{\theta} - \mathbf{K} \dot{\mathbf{x}}^b$ verifica-se que $\ddot{\mathbf{x}}^b$ também é limitado. Portanto, usando o teorema de Barbalat, conclui-se que $\dot{\mathbf{x}}^b \rightarrow 0$ quando $t \rightarrow \infty$, garantindo a convergência assintótica dos erros de controle.

3 Resultados Experimentais

Para validar os controladores apresentados na Seção 2, foi realizado experimento de seguimento de trajetória com um VANT real. O experimento é inicializado sem o conhecimento prévio dos parâmetros da dinâmica do VANT. Assim, optou-se por inicializá-los com $[\theta_1 \theta_2 \theta_3 \theta_4 \theta_5 \theta_6 \theta_7 \theta_8]^T = 1$.

Os resultados apresentam os dados obtidos com o controlador adaptativo, juntamente com o método de fusão dos dados dos sensores internos e de uma câmera *Xtion Pro Live*. O método de fusão, sistema de captura e técnica de detecção do VANT são apresentados em (Santos, Santana, Martins, Brandao and Sarcinelli-Filho, 2015) e (Santos, Santana, Brandao and Sarcinelli-Filho, 2015).

As Figuras 2 e 3 ilustram as posições e velocidades do VANT durante o seguimento da trajetória. O objetivo é realizar o seguimento da trajetória e minimizar os erros de controle.

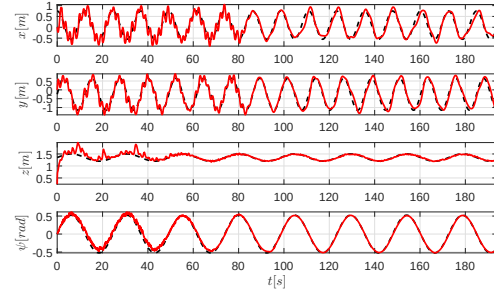


Figura 2: Posição do VANT durante o experimento.

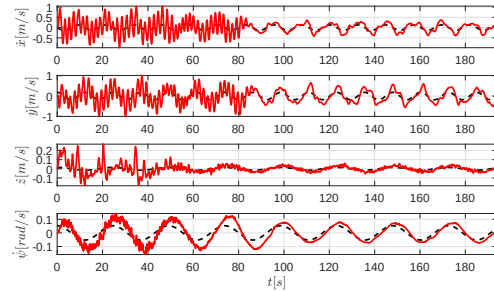


Figura 3: Velocidades del VANT durante o experimento.

É importante observar que os dados iniciais dos parâmetros do modelo dinâmico são inicializados com 1. Inicialmente, o controlador utilizado é um controlador adaptativo, porém não se utiliza a lei de atualização de parâmetros ($\dot{\hat{\theta}} = 0$), apresentada em (30). Após decorrer 37.64 segundos, a lei de atualização de parâmetros é acionada. A evolução dos parâmetros pode ser visualizada na Figura 4. Assim, pode-se observar a melhora na navegação quando há atualização dos parâmetros.

Para facilitar a visualização na redução dos erros de controle, as Figuras 5 e 6 apresentam a evolução dos erros de posição e de velocidade, respectivamente.

Conforme os resultados apresentam, o sistema de controle adaptativo reduz satisfatoriamente os

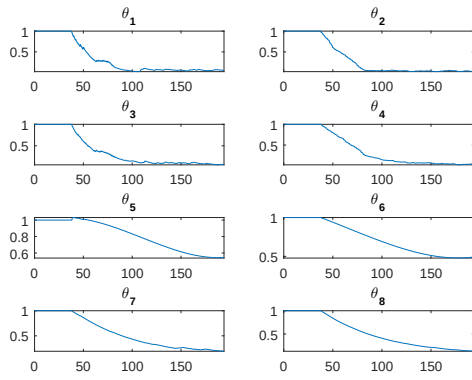


Figura 4: Evolução dos parâmetros do modelo dinâmico.

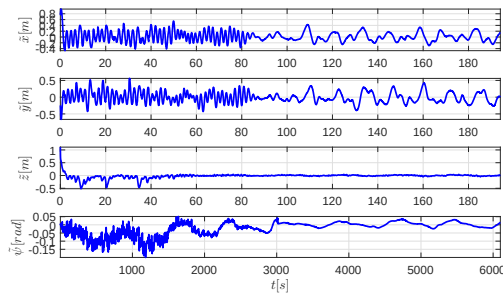


Figura 5: Erros de posição do VANT em relação à trajetória.

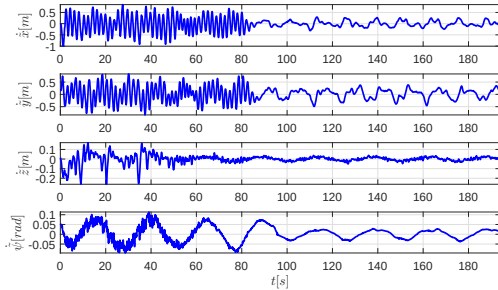


Figura 6: Erros de velocidade do VANT em relação à velocidade desejada sobre a trajetória.

erros provenientes de uma má identificação dos parâmetros do modelo. Os resultados de distribuição de dados apresentados na Figura 7, demonstram que a variância e dispersão dos erros reduzem e estão muito próximos do 0, quando a atualização de parâmetros está acionada.

Na Figura 3 observa-se que as velocidades desejadas são alcançadas ($\dot{x} \rightarrow \dot{x}_d, \dot{y} \rightarrow \dot{y}_d, \dot{z} \rightarrow \dot{z}_d$). Os erros de controle também alcançam o objetivo, acercando-se à zero (ou seja, $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, \tilde{\psi}) \rightarrow 0$ e $(\dot{\tilde{x}}, \dot{\tilde{y}}, \dot{\tilde{z}}, \dot{\tilde{\psi}}) \rightarrow 0$).

Para obter mais detalhes, o leitor deve acessar o *link* <https://goo.gl/PYbnTG>.

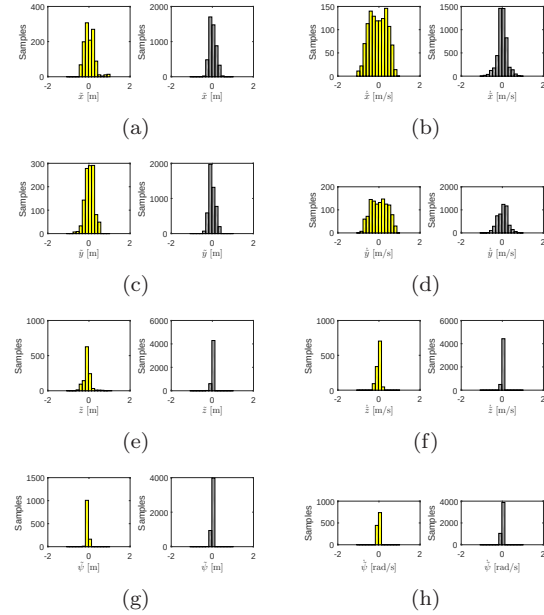


Figura 7: Distribuição dos erros obtidos ao longo do experimento. Em amarelo, são os dados obtidos sem a lei de atualização ($\dot{\hat{\theta}} = 0$). Já os dados cinzas foram obtidos com a lei de atualização ($\dot{\hat{\theta}} = \gamma^{-1} \mathbf{G}^T \hat{\mathbf{x}}^b$). Em (a), (c), (d) e (f) são erros de posicionamento, respectivamente, em (x, y, z, ψ) . Demais são referentes aos erros de velocidades.

4 Conclusões

Neste trabalho, apresentou-se um controle dinâmico adaptativo para compensar os erros de parametrização do modelo do VANT. Os parâmetros do modelo foram inicializados com um valor inicial padrão. Apesar do modelo ser simplificado, o sistema de controle adaptativo, além de minimizar os erros de controle, obteve uma estimativa dos parâmetros do modelo que servem como dados iniciais para outras tarefas de navegação.

Em teoria, pode-se afirmar que essa estratégia de controle adaptativo para veículos aéreos agiliza a tarefa de navegação, já que não é necessário realizar a identificação do modelo. Ao contrário dos demais trabalhos que executam, primeiramente, diversas manobras e movimentos para realizar a identificação dos parâmetros. Este trabalho propõe um sistema que realiza ambas as tarefas: navegação e identificação.

Por fim, os resultados com um VANT concluem que o algoritmo proposto funciona de acordo com a teoria reduzindo os erros de controle e melhorando o desempenho de navegação.

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 ao projeto. Eles também agradecem à UFES (Universidade Federal do Espírito Santo), ao IFES (Instituto Federal do Espírito Santo) e à Universidad Nacional de San Juan - UNSJ, da Argentina, por viabilizarem sua participação neste trabalho. Milton Cesar Paes Santos também agradece à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de estudos concedida para custear seu estágio sanduíche no Instituto de Automática da Universidad Nacional de San Juan, Argentina, durante o qual esta pesquisa foi desenvolvida.

Referências

- Efe, M. O. (2007). Robust low altitude behavior control of a quadrotor rotorcraft through sliding modes, *Control Automation, 2007. Mediterranean Conference on*, pp. 1–6.
- Engel, J., Sturm, J. and Cremers, D. (2012). Camera-based navigation of a low-cost quadcopter, *Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- Felix, M. C. (2007). A two level non linear inverse control structure for rotorcraft trajectory tracking, *2007 Chinese Control Conference*, pp. 321–325.
- Hatamleh, K. S., Ma, O. and Paz, R. (2009). A uav model parameter identification method: a simulation study., *International Journal of Information Acquisition* **06**(04): 225–238.
- Lin, Q., Cai, Z., Wang, Y., Yang, J. and Chen, L. (2013). Adaptive flight control design for quadrotor uav based on dynamic inversion and neural networks, *Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 2013 Third International Conference on*, pp. 1461–1466.
- Madani, T. and Benallegue, A. (2006). Control of a quadrotor mini-helicopter via full state backstepping technique, *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 1515–1520.
- Martins, F. N., Celeste, W. C., Carelli, R., Sarcinelli-Filho, M. and Bastos-Filho, T. F. (2008). An adaptive dynamic controller for autonomous mobile robot trajectory tracking, *Control Engineering Practice* **16**(11): 1354 – 1363.
- 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* pp. 1–24.
- Santana, L. V., Sarcinelli-Filho, M. and Carelli, R. (2013). Estimation and control of the 3d position of a quadrotor in indoor environments, *Proceedings of the 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR'13)*, Montevideo, Uruguay.
- Santos, M., Santana, L., Brandao, A. and Sarcinelli-Filho, M. (2015). Uav obstacle avoidance using rgb-d system, *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2015 International Conference on*, pp. 312–319.
- Santos, M., Santana, L., Martins, M., Brandao, A. and Sarcinelli-Filho, M. (2015). Estimating and controlling uav position using rgb-d/imu data fusion with decentralized information/kalman filter, *Industrial Technology (ICIT), 2015 IEEE International Conference on*, pp. 232–239.
- Ye, Z., Bhattacharya, P., Mohamadian, H., Majlasein, H. and Ye, Y. (2006). Equational dynamic modeling and adaptive control of uav, *2006 IEEE/SMC International Conference on System of Systems Engineering*, pp. 5 pp.–.