

FORMAÇÃO LÍDER-SEGUIDOR COM 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— A strategy to autonomously guide two commercial quadrotors when navigating as a leader-follower formation in outdoor environments is proposed in this work. The objective is to provide a general view of the applied methods, using simplifications and practical considerations about the mathematical models involved in the design of the automatic controllers. This way, the contribution of the paper is to enhance the formation of the interested readers in terms of the understanding and reproduction of efficient methods, allowing developing research with equipments easily accessible. The application here reported is implemented in a computerized ground station which allows manual or automatic control of the leader in formation with a follower vehicle.

Keywords— Leader-Follower, Autonomous Navigation, Outdoor Environments, Formation Control.

Resumo— Neste trabalho é apresentada e testada uma estratégia de controle automático para navegação entre dois quadrimotores comerciais em ambiente exterior em formação líder-seguidor. O objetivo é proporcionar uma visão geral dos métodos aplicados, 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 com eficiência prática consolidada, permitindo o desenvolvimento de pesquisas com equipamentos comerciais de fácil acesso. A aplicação é implementada em uma estação computadorizada em solo que permite o controle manual ou automático do líder enquanto mantém formação com o veículo seguidor.

Palavras-chave— Líder-Seguidor, Navegação Autônoma, Ambientes Exteriores, Controle de Formação.

1 Introdução

Neste trabalho, apresenta-se a implementação de uma aplicação de controle para veículos aéreos não tripulados (VANTs) do tipo quadrimotor navegando em formação líder-seguidor em ambientes exteriores. A técnica apresentada é baseada em uma estrutura virtual (Oh et al., 2015) e contribui, principalmente, para a validação experimental dessa arquitetura de controle junto a técnicas de simplificação dos modelos matemáticos para quadrimotores. Durante a discussão das próximas seções, aspectos relevantes do estado da arte são apontados para dar sustentação teórica aos métodos desenvolvidos, assim como voos reais são apresentados para validar a estrutura de controle proposta.

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 são dois quadrimotores comerciais da Parrot, modelo AR.Drone 2.0, cada um como o da Figura 1. Este equipamento foi escolhido 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 (Piskorski et al., 2012). Há no veículo um computador de bordo, que auxilia em manobras importantes, tais como decolagem, pouso e controle da atitude (ângulos de orientação).

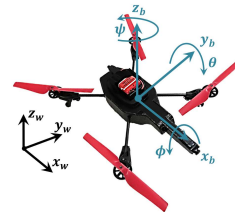


Figura 1: O quadrimotor Parrot AR.Drone 2.0 e os sistemas de coordenadas: global ($\{w\}$) e do corpo do VANT ($\{b\}$).

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 comandos de movimento a ele. 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 ao 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 Os controladores de voo

Nesta seção, os controladores de voo serão propostos a partir do modelo do VANT inspirado no trabalho de 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, e 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 $\tilde{\tau}_\theta$, envolvendo os sinais de torque produzidos pela combinação das ações dos propulsores do veículo (Kendoul et al., 2010).

Nota 1 Neste modelo, as equações referentes ao movimento do VANT nos graus de liberdade z e ψ são omitidas, pois neste trabalho estas variáveis serão mantidas em valor constante por um algoritmo PD, semelhante àquele validado por Engel et al. (2014) para o AR.Drone. Dessa forma o foco será apenas nos deslocamentos lateral e longitudinal do veículo.

Aproximando (1) e (2) para pequenos valores angulares e assumindo que a propulsão gerada pelos motores é aproximadamente o peso do veículo ($F \approx mg$), tem-se

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

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.

Neste trabalho se propõe considerar que a resposta dinâmica do veículo aos comandos de orientação u_ϕ e u_θ já é controlada, e que a representação matemática deste controlador pode ser 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.

Para controlar a dinâmica translacional 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 (não transparente ao usuário). A Nota 2 formaliza esta ideia.

Nota 2 (Controladores Independentes)

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.

3.1 Controlador de voo do líder

Aplicando esta proposta de controladores independentes, primeiramente será projetado um controlador útil para o VANT líder. Assim, estabelece-se o loop externo de controle definindo ϕ_{d1} e θ_{d1} como sinais auxiliares de controle, representando as orientações desejadas para seu loop interno. Logo a equação (5) é reescrita como

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{y}_1 \end{bmatrix} = g \begin{bmatrix} \sin \psi_1 & \cos \psi_1 \\ -\cos \psi_1 & \sin \psi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{d1} \\ \theta_{d1} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

onde o subscrito 1 identifica os dados do veículo líder. Reescrevendo em uma notação compacta, usando vetores e matrizes, obtém-se

$$\mathbf{X}_1 = g\mathbf{R}_{\psi_1}\mathbf{U}_{d1}, \quad (8)$$

de onde se pode projetar os sinais auxiliares de controle como a inversão

$$\mathbf{U}_{d1} = \frac{1}{g}\mathbf{R}_{\psi_1}^{-1}(\ddot{\mathbf{X}}_{1d} + \kappa_{D1}\dot{\mathbf{X}}_1 + \kappa_{P1}\mathbf{X}_1), \quad (9)$$

onde $\mathbf{X}_{1_d} = [x_{1_d} \ y_{1_d}]^T$ representa o vetor contendo as posições desejadas, $\mathbf{X}_1 = [x_1 \ y_1]^T$ representa um vetor contendo as posições reais (lidas dos sensores), $\tilde{\mathbf{X}}_1 = \mathbf{X}_{1_d} - \mathbf{X}_1$ representa um vetor contendo os erros de posição, $\kappa_{D_1} = \text{diag}(2.0, 2.0)$ e $\kappa_{P_1} = \text{diag}(2.0, 2.0)$ são matrizes diagonais representando os ganhos derivativo e proporcional do controlador, respectivamente.

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

$$\ddot{\tilde{\mathbf{X}}}_1 + \kappa_{D_1} \dot{\tilde{\mathbf{X}}}_1 + \kappa_{P_1} \tilde{\mathbf{X}}_1 = \mathbf{0}, \quad (10)$$

caracterizando o equilíbrio $\mathbf{0}$ como assintoticamente estável, permitindo concluir que $\tilde{\mathbf{X}}_1 \rightarrow \mathbf{0}$ quando $t \rightarrow \infty$. Sobre o resultado calculado no controlador (9) é aplicada uma delimitação definida como

$$\begin{bmatrix} \phi_{d_1} \\ \theta_{d_1} \end{bmatrix} = \text{sat}_{\phi, \theta}(\mathbf{U}_{d_1}), \quad (11)$$

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, garantindo um limite da inclinação requerida (previne inclinações bruscas devido à presença de grandes erros de controle no sistema) até a norma de 0.175 *rad* (valor escolhido após vários experimentos). Nesta condição, é assumido que o loop interno de controle da orientação é capaz de seguir qualquer referência dada por (11). O efeito prático da função de saturação (caso seja acionada), é o de truncar a inclinação desejada 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 do sistema garantida teoricamente pela análise de (10), e experimentalmente comprovada nos resultados apresentados na Seção 5. Finalmente, as referências das orientações são passadas ao loop de controle interno como

$$\begin{bmatrix} u_{\phi_1} \\ u_{\theta_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{d_1} \\ \theta_{d_1} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Neste caso, substituindo estes sinais em (6), a dinâmica rotacional torna-se

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi}_1 \\ \ddot{\theta}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_\phi^2 \phi_{d_1} - 2\zeta_\phi \omega_\phi \dot{\phi}_1 - \omega_\phi^2 \phi_1 \\ \omega_\theta^2 \theta_{d_1} - 2\zeta_\theta \omega_\theta \dot{\theta}_1 - \omega_\theta^2 \theta_1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

a qual sugere que o controlador do loop interno que está implementado no computador de bordo do AR.Drone será capaz de seguir uma referência de orientação desejada, com o desempenho determinado pelos parâmetros do modelo.

3.2 Controlador de voo do seguidor (Formação)

Nesta seção o controlador usado para guiar o seguidor é projetado, funcionando como um controlador da formação. Primeiramente, a formação é definida como uma estrutura virtual cartesiana. Dessa forma, define-se a estrutura desejada da formação como $\mathbf{X}_f = \mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2$, onde $\mathbf{X}_1 = [x_1 \ y_1]^T$ representa um vetor contendo as posições x e y globais do líder no espaço e $\mathbf{X}_2 = [x_2 \ y_2]^T$ as do seguidor. Tomando a derivada segunda desta estrutura, aparece $\ddot{\mathbf{X}}_f = \ddot{\mathbf{X}}_1 - \ddot{\mathbf{X}}_2$, que pode ser reescrita, utilizando a mesma notação de (8), como

$$\ddot{\mathbf{X}}_f = g\mathbf{R}_{\psi_1}\mathbf{U}_{d_1} - g\mathbf{R}_{\psi_2}\mathbf{U}_{d_2}, \quad (14)$$

de onde se obtém o controlador da formação escolhendo a inversão

$$\mathbf{U}_{d_2} = \frac{1}{g}\mathbf{R}_{\psi_2}^{-1}(-\boldsymbol{\mu} + g\mathbf{R}_{\psi_1}\mathbf{U}_{d_1}), \quad (15)$$

sendo $\boldsymbol{\mu} = \ddot{\mathbf{X}}_{f_d} + \kappa_{D_f}\dot{\tilde{\mathbf{X}}}_f + \kappa_{P_f}\tilde{\mathbf{X}}_f$ um sinal auxiliar de controle, onde $\mathbf{X}_{f_d}$ representa um vetor contendo a estrutura da formação desejada, $\mathbf{X}_f$ representa um vetor contendo a formação real (lida dos sensores), $\tilde{\mathbf{X}}_f = \mathbf{X}_{f_d} - \mathbf{X}_f$ é um vetor que contém o erro de formação, e $\kappa_{D_f} = \text{diag}(2.0, 2.0)$ e $\kappa_{P_f} = \text{diag}(2.0, 2.0)$ são matrizes diagonais representando os ganhos derivativo e proporcional do controlador de formação, respectivamente. Substituindo o controlador (15) em (14), obtém-se a dinâmica do erro de formação, em malha-fechada, como

$$\ddot{\tilde{\mathbf{X}}}_f + \kappa_{D_f}\dot{\tilde{\mathbf{X}}}_f + \kappa_{P_f}\tilde{\mathbf{X}}_f = \mathbf{0}, \quad (16)$$

caracterizando o equilíbrio $\mathbf{0}$ como assintoticamente estável, permitindo concluir que $\tilde{\mathbf{X}}_f \rightarrow \mathbf{0}$ quando $t \rightarrow \infty$. Para finalizar, deve-se lembrar que o resultado da equação do controlador da formação, (15), representa as orientações desejadas para o veículo seguidor. Logo,

$$\begin{bmatrix} u_{\phi_2} \\ u_{\theta_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{d_2} \\ \theta_{d_2} \end{bmatrix} = \text{sat}_{\phi, \theta}(\mathbf{U}_{d_2}). \quad (17)$$

4 Arquitetura desenvolvida para os experimentos

Para execução dos experimentos, na estação de solo foram programados os algoritmos representados por blocos no diagrama da Figura 2. Os veículos são representados por AR.Drone 1 (Líder) e AR.Drone 2 (Seguidor).

Para o veículo líder, deve-se informar ao sistema se este VANT será controlado manualmente por um operador ou se será guiado de forma automática. Em caso manual, os comandos $\mathbf{U}_{d_1}$ são enviados diretamente ao AR.Drone 1 pelo operador. Em caso automático, no bloco *Gerador de Trajetória* são declarados os valores desejados para a navegação deste veículo no espaço, como

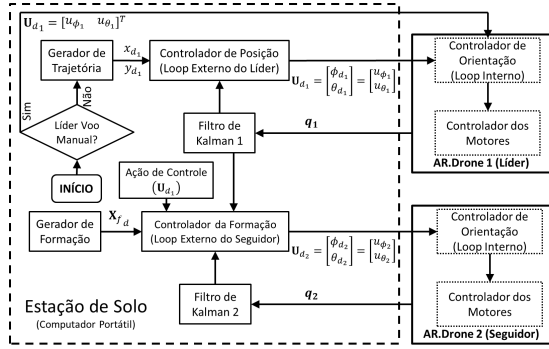


Figura 2: Arquitetura de software em diagrama de blocos.

x_{d1} e y_{d1} , que podem ser fixos ou variar no tempo. O controle se dá pela estrutura hierárquica da Seção 3.1, implementando as equações (9) e (11) no bloco *Controlador de Posição*. A saída deste bloco é enviada ao AR.Drone 1, que executa seu loop interno de controle da orientação nos códigos implementados no seu computador de bordo, aos quais não se tem acesso.

O bloco denominado *Filtro de Kalman* existe para ambos os veículos, e se refere a uma implementação baseada em (Santana et al., 2015). Neste trabalho, o código de um estimador de estados é detalhado, mostrando um método para realimentar dados sensoriais 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 um módulo de GPS e dos sensores inerciais, usando as variáveis fornecidas pelo computador de bordo do veículo em $\mathbf{q}$.

Para o seguidor, no bloco *Gerador de Formação* se declara a estrutura desejada da formação $\mathbf{X}_{fd}$, que é controlada no bloco *Controlador de Formação*, representando a implementação das equações (15) e (17). A saída deste bloco é enviada ao AR.Drone 2. Chama-se atenção que este último bloco também utiliza em sua implementação dados do AR.Drone 1, que incluem tanto valores sensoriais do *Filtro de Kalman 1* como os sinais de controle do bloco *Ação de Controle* ($\mathbf{U}_{d1}$) que são determinados de acordo com o tipo de controle escolhido para o líder (manual ou automático), fechando assim a representação completa da arquitetura de software implementada.

5 Resultados experimentais

Nesta Seção são apresentados dois experimentos envolvendo os conceitos discutidos neste trabalho, comprovando a eficácia prática das suposições feitas anteriormente. Em ambos os experimentos a estrutura desejada para a formação é definida como

$$\mathbf{X}_{fd} = \begin{bmatrix} x_{1d} - x_{2d} \\ y_{1d} - y_{2d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0 \\ 4.0 \end{bmatrix},$$

que na prática significa que o veículo seguidor deverá se posicionar na mesma cota global que o líder na posição x e se manter à 4 m de distância na na posição y , conforme ilustrado na Figura 3.

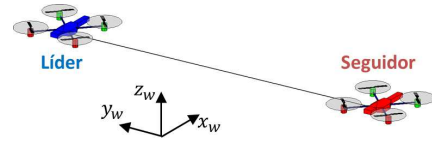


Figura 3: Estrutura desejada para a formação nos experimentos.

5.1 Navegação automática do líder entre pontos

Neste experimento o líder será controlado de forma automática pelo controlador da Seção 3.1, enquanto o controle da formação é realizado conforme descrito na Seção 3.2. O objetivo é realizar uma navegação entre pontos distintos, definidos como os vértices de um quadrado com lado de 3 m, com os valores de x_{d1} e y_{d1} modificados a cada $t = 10$ s, de acordo com a sequência

$$\begin{cases} x_{d1} = 0.0 \text{ m}, y_{d1} = 0.0 \text{ m} \\ x_{d1} = 0.0 \text{ m}, y_{d1} = 3.0 \text{ m} \\ x_{d1} = 3.0 \text{ m}, y_{d1} = 3.0 \text{ m} \\ x_{d1} = 3.0 \text{ m}, y_{d1} = 0.0 \text{ m}. \end{cases}$$

Na Figura 4(a) é possível observar a resposta sensorial para as posições globais de ambos os veículos. Em relação à posição x , observe-se que ambos os veículos convergem para o valor desejado x_{d1} , conforme estabelecido na estrutura desejada para a formação. Já em relação à posição y , note-se que enquanto o líder converge para o valor desejado y_{d1} , o seguidor executa um movimento similar, porém afastado por 4 m, conforme o esperado. Na Figura 4(b) há uma comparação entre os valores desejados para a formação (que são constantes) e os valores capturados pelos sensores durante o experimento. Note-se que apesar das oscilações presentes nesta curva, oriundas, principalmente, dos erros numéricos inerentes aos sensores inerciais e ao GPS, há uma convergência para os valores desejados de formação durante todo o experimento. Estas observações indicam que os controladores do loop externo do líder e do seguidor são capazes de executar as tarefas requeridas no experimento.

Em termos da dinâmica rotacional, nas Figuras 4(c) e 4(d) estão representadas as orientações dos veículos durante o experimento. Os valores denominados de referência são aqueles produzidos nas equações (11) e (17), que estão comparados nas imagens com os valores sensoriais. Observe-se que a cada mudança de x_{d1} ou y_{d1} grandes erros de posição são introduzidos, forçando uma saturação. Mesmo assim é possível notar nas curvas

a capacidade do sistema de recuperar os valores de referência de orientação. Assim, pode-se confirmar a convergência das orientações, mesmo enfrentando imperfeições no seguimento, atribuídas, principalmente, aos ruídos sensoriais. Mesmo assim a resposta real do veículo acompanha o que era esperado, a partir da análise das seções anteriores para o funcionamento do loop interno de controle da orientação, tornando as suposições e simplificações teóricas coerentes com o voo prático exposto na Figura 4. Por fim, para um melhor entendimento, um vídeo deste experimento está disponível em <https://youtu.be/WIIqrWnRZEI>.

5.2 Navegação manual do líder

Neste experimento se executa uma navegação onde um operador envia comandos de movimento diretamente ao veículo líder, desde a estação em solo. Na Figura 5(a) estão representadas as posições globais executadas por ambos os veículos. Conforme o esperado, o perfil realizado para a posições x e y é similar para ambos os VANTs, porém com um deslocamento de 4 m em y , comprovando assim a capacidade do controlador de formação de manter a estrutura desejada nas circunstâncias deste experimento. Na Figura 5(b) há uma comparação entre os valores desejados para a formação (que são constantes) e os valores capturados pelos sensores durante o experimento.

Nas Figuras 5(c) e 5(d) apresentam-se como os VANTs se orientam durante o experimento. Para o líder (Figura 5(c)) as orientações de referência são os comandos exibidos na forma de pulso, que foram enviados manualmente pelo operador. Para o seguidor (Figura 5(d)), as orientações de referência são calculadas pelo sistema de controle de acordo com o necessário para manter a formação desejada. Note-se a convergência entre as variáveis nas curvas.

Como pode ser visto na Figura 5, o sistema desenvolvido também apresenta resposta prática coerente com a análise teórica das seções anteriores. Para um melhor entendimento, um vídeo deste experimento está disponível em https://youtu.be/Vm5_T-JMwyQ.

6 Conclusões

Neste trabalho apresentou-se uma abordagem para modelagem e projeto de controladores automáticos de formação para VANTs 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, tornando o projeto de controladores uma tarefa simplificada. Os controladores foram testados em voos reais exibidos em vídeo, proporcionando uma

melhor interpretação dos assuntos abordados. As suposições e simplificações feitas sobre o modelo do veículo foram validadas nos experimentos, onde os comportamentos esperados foram de fato observados durante os voos.

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.
- 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 quadcopter with a monocular camera, *Robotics and Autonomous Systems* **62**(11): 1646–1656.
- 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.
- Oh, K.-K., Park, M.-C. and Ahn, H.-S. (2015). A survey of multi-agent formation control, *Automatica* **53**: 424 – 440.
- Piskorski, S., Brulez, N., Eline, P. and DHaeuer, 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.

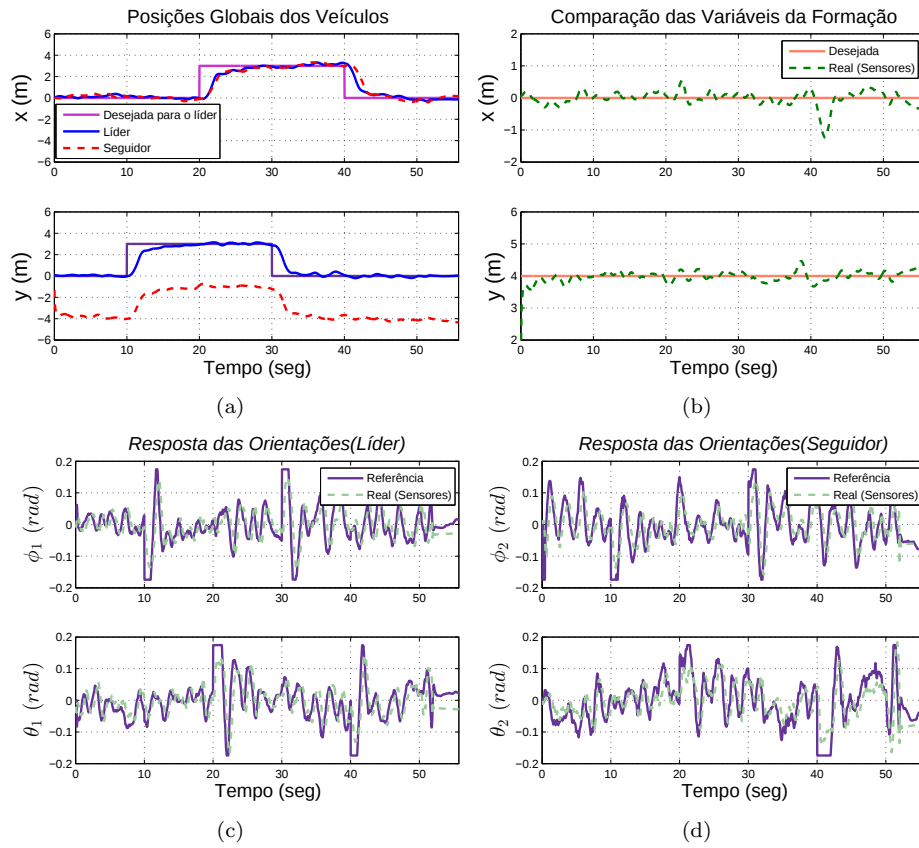


Figura 4: Experimento de navegação em formação entre os vértices de um quadrado.

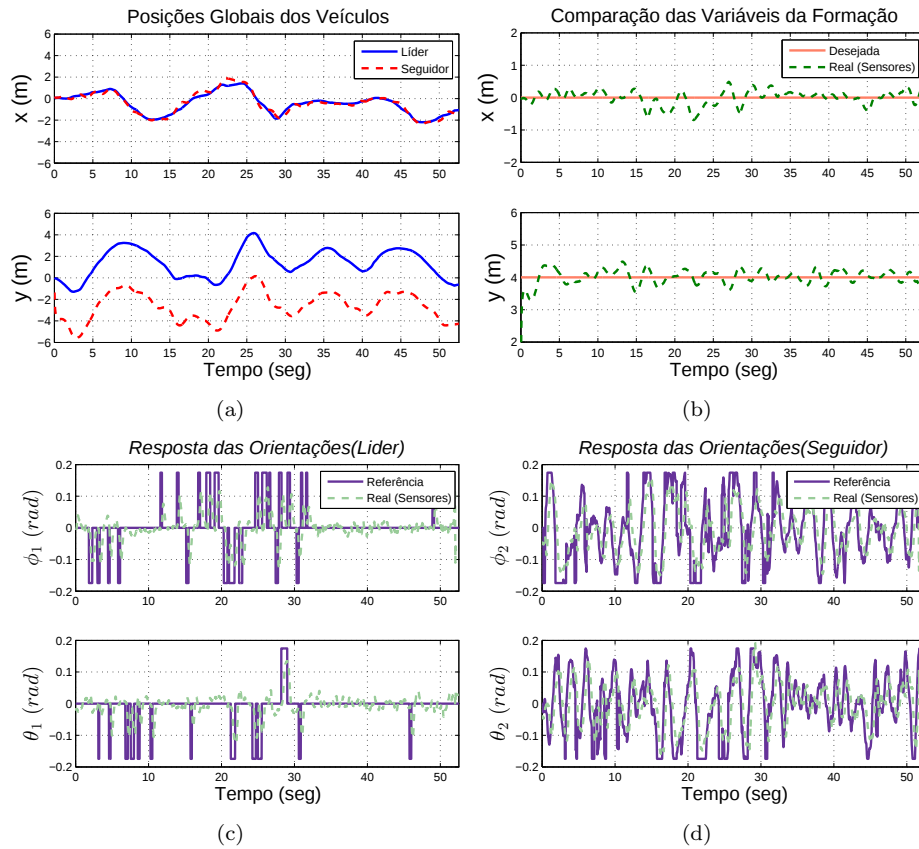


Figura 5: Experimento de navegação manual com líder.