

# Sistemas de Defesa: Uma abordagem para desvios de obstáculos no auxílio do controle de um quadricóptero em tempo real

Bruno da Silva Giovanini

Paulo F.F. Rosa  
(Orientador)

Instituto Militar de Engenharia - IME  
Laboratório de Robótica e Inteligência Computacional  
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Defesa

24 de fevereiro de 2015

# Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Introdução
- 3 Tópicos tutorias
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero
- 5 Metodologia
- 6 Cronograma
- 7 Viabilidade da proposta
- 8 Resultados esperados
- 9 Conclusão
- 10 Próximos Passos

# Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Introdução
- 3 Tópicos tutorias
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero
- 5 Metodologia
- 6 Cronograma
- 7 Viabilidade da proposta
- 8 Resultados esperados
- 9 Conclusão
- 10 Próximos Passos

# Objetivo

- Evitar colisões de um quadricóptero utilizando estimativas de sua trajetória futura e distâncias para obstáculos, criando desvios, se necessário, e proporcionando uma maior segurança de voo em ambientes restritos e sensíveis

# Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Introdução**
- 3 Tópicos tutorias
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero
- 5 Metodologia
- 6 Cronograma
- 7 Viabilidade da proposta
- 8 Resultados esperados
- 9 Conclusão
- 10 Próximos Passos

# Motivação I

- Crescente utilização para missões civis e militares
- Voos em ambientes fechados e restritos
- Risco de colisão com equipamentos críticos e sensíveis
- Difícil controle e manuseio

# Motivação II

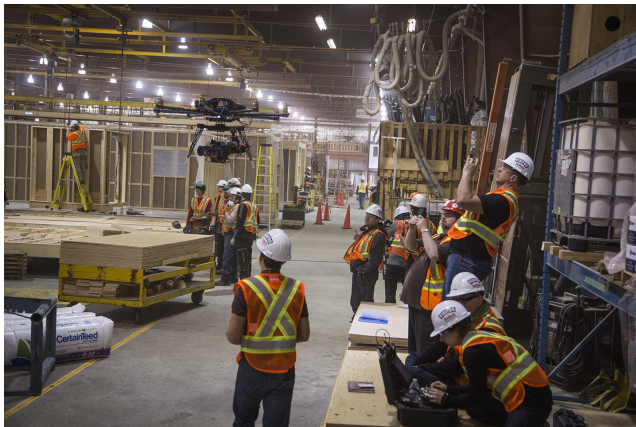


Figura: Filmagem *indoor*

# Motivação III



Figura: Inspeção de equipamentos sensíveis



# Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Introdução
- 3 Tópicos tutorias**
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero
- 5 Metodologia
- 6 Cronograma
- 7 Viabilidade da proposta
- 8 Resultados esperados
- 9 Conclusão
- 10 Próximos Passos

# O quadricóptero - A Plataforma

- Veículo voador com quatro rotores com decolagem e aterrissagem vertical [Salih et al., 2010]



Figura: Plataforma Parrot Ardrone 2.0. Fonte [Stephane, 2014]

# O quadricóptero - Dinâmica de Voo I

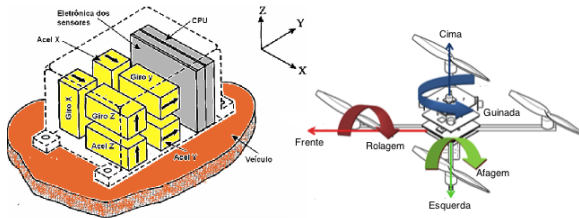
- Objetivo é manter a estabilidade do eixo central controlando quatro motores independentes eletronicamente
- Seis graus de liberdade e quatro atuadores
- Três são variações lineares  $(x, y, z)$  e três são angulares  $(\phi, \theta, \psi)$
- Sistema subatuado, dimensão do espaço de configurações  $(x, y, z, \phi, \theta, \psi)$  excede o espaço do controle  $(u_1, u_2, u_3, u_4)$

# Sistemas embarcados para navegação

- Obtenção de informações sobre a posição, velocidade e atitude de um veículo com relação a um dado referencial
- Fornecidas por sensores inerciais: acelerômetros e giroscópios (ou girômetros)
- Magnetômetros incluídos melhoram a medida da atitude do veículo

# IMU

- Componente eletrônico onde estão montados os sensores.
- Três acelerômetros: aceleração linear ( $x, y, z$ )
- Três giroscópios (ou girômetros): taxa de variação dos ângulos ( $\phi, \theta, \psi$ )



**Figura:** Estrutura do Sistema de Navegação acoplada ao veículo (esquerda) e os movimentos gerados no quadricóptero (direita). Fonte [Junior, 2009]

# AHRS

- *Attitude Heading Reference System*
- Mesmos sensores da IMU (com magnetômetro)
- Unidade de processamento para cálculo da velocidade linear e atitude
- Fornece  $(\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z} \quad \phi \quad \theta \quad \psi)$

# Controle PID I

- Método de controle adaptativo comum para controle de robôs
- Controle fechado que reage a mudanças no ambiente captadas por sensores
- Reação a partir do erro medido
- Três parâmetros constantes: Proporcional (P), Integral (I) e Derivativo (D)

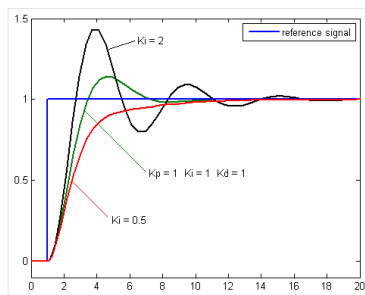
# Controle PID II

- Proporcional (P)
  - É tipicamente o erro.
  - Fórmula:  $A - B$ , onde  $A$  é a posição atual e  $B$  é onde deveria estar
- Integral (I)
  - É o acúmulo dos erros passados no tempo.
  - Fórmula:  $A/t_1 + B/t_2 + C/t_3$ , sendo  $A$  o erro em  $t_1$ ,  $B$  em  $t_2$  e  $C$  em  $t_3$
- Derivativo (D)
  - É a mudança do erro no tempo.
  - Fórmula:  $(A - B)/\Delta t$ , sendo  $A$  o erro inicial e  $B$  o erro depois do intervalo  $\Delta t$



## Controle PID III

- Cada parâmetro tem seu ganho  $K$  associado
- Valor medido =  $P * K_p + I * K_i + D * K_d$



**Figura:** Desempenho do sistema para diferentes ganhos  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ . Fonte [Kingdom, 2013]

# Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Introdução
- 3 Tópicos tutorias
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero**
- 5 Metodologia
- 6 Cronograma
- 7 Viabilidade da proposta
- 8 Resultados esperados
- 9 Conclusão
- 10 Próximos Passos

# O Problema: Segurança em voo para quadricóptero I

- Auxiliar o controle da plataforma com base na dinâmica, estado atual, operação corrente e a distância para obstáculos
- Dinâmica do robô ( $\mathbf{f} \in \mathcal{X} \times \mathcal{U} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ ):

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) \quad (1)$$

Dado  $\mathbf{x}(t)$  o estado do robô no tempo  $t$  e  $\mathbf{u}(t)$  o *input* de operação no tempo  $t$ .

- Estado do robô ( $\mathbf{g} \in \mathcal{X} \times \mathcal{U} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{X}$  é a solução da equação diferencial 1):

$$\mathbf{x} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (2)$$

Dado  $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(0)$  e  $\mathbf{u}$  a constante de *input* de operação

# O Problema: Segurança em voo para quadricóptero II

- O Problema: Definir a menor variação de controle  $\Delta \mathbf{u} \in \mathcal{U}$  necessária para evitar colisão em  $t \in [0, \tau]$ , onde  $\tau$  é um horizonte de tempo já definido:

$$\begin{aligned} \min: & \Delta \mathbf{u} \\ \text{Sujeito a: } & \forall t \in [0, \tau], \mathcal{R}(\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u} + \Delta \mathbf{u}, t)) \cap \mathcal{O} = \emptyset \end{aligned} \quad (3)$$

Dado  $\mathcal{O} \subset \mathbb{R}^3$ , a subárea do espaço  $\mathbb{R}^n$  ocupadas por obstáculos escondidas quando vistas pelo robô e  $\mathcal{R}(x)$ , a subárea ocupada pelo robô no estado  $x \in \mathcal{X}$

# Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Introdução
- 3 Tópicos tutorias
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero
- 5 Metodologia**
- 6 Cronograma
- 7 Viabilidade da proposta
- 8 Resultados esperados
- 9 Conclusão
- 10 Próximos Passos

# Metodologia I

- Divisão em etapas

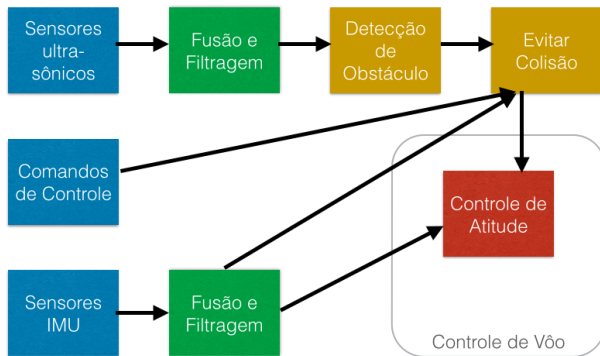


Figura: Etapas do método

# Metodologia II

## • Evitar colisão

- Dados da AHRS:  $d_t = [\dot{x}_t \ \dot{y}_t \ \dot{z}_t \ \phi_t \ \theta_t \ \psi_t]^T$
- Dados do Controle:  $u_t = [\delta\phi_t \ \delta\theta_t \ \delta\psi_t \ \delta h_t]^T$
- Estimação da trajetória futura (Integração Numérica em  $t$ )
- Espaço de estados em  $\Delta t$ . Fonte [Basit et al., 2014]

$$\begin{aligned}
 x_{t+1} &= x_t + (\dot{x}_t \cos \psi_t - \dot{y}_t \sin \psi_t) \Delta t \\
 y_{t+1} &= y_t + (\dot{x}_t \sin \psi_t + \dot{y}_t \cos \psi_t) \Delta t \\
 z_{t+1} &= z_t + \delta h_t \\
 \phi_{t+1} &= \phi_t + \delta\phi_t \\
 \theta_{t+1} &= \theta_t + \delta\theta_t \\
 \psi_{t+1} &= \psi_t + \delta\psi_t \\
 \dot{x}_{t+1} &= \mathbf{C}_1 \phi_t \\
 \dot{y}_{t+1} &= \mathbf{C}_2 \theta_t \\
 \Delta t &= \text{tempo entre medidas obtidas da plataforma}
 \end{aligned} \tag{4}$$

# Metodologia III

- Evitar colisão (cont.)
  - Identificar rota em choque e desviar
  - Utilização das distâncias medidas para os obstáculos
  - Método da Janela dinâmica [Saranrittichai et al., 2013]
  - Determinar  $\Delta \mathbf{u}$  possíveis e seguros no espaço de estados  $\mathcal{U}$  em  $t \in [0, \tau]$
  - Otimização:  $\min \Delta \mathbf{u}$



# Metodologia IV

- Componentes necessários
  - Plataforma de voo (quadricóptero) com interface de comunicação e SDK código aberto
  - Sensores ultrassônicos
  - *Computer-on-module* para embarque na plataforma: Raspberry PI
- Software necessário
  - Matlab com pacote Simulink
  - Kit de desenvolvimento para quadricópteros do Matlab Simulink
  - Raspberry Pi Support from MATLAB

# Metodologia V

- Caracterização e tratamento da imprecisão das medidas de distância dos sensores ultrassônicos
- Validação da simulação *hardware-in-the-loop*
- Validação embarcada na plataforma

# Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Introdução
- 3 Tópicos tutorias
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero
- 5 Metodologia
- 6 Cronograma**
- 7 Viabilidade da proposta
- 8 Resultados esperados
- 9 Conclusão
- 10 Próximos Passos

# Cronograma

Fase	jan/15	fev/15	mar/15	abr/15	mai/15	jun/15	jul/15	ago/15	set/15	out/15	nov/15	dez/15	jan/16	fev/16
Revisão Bibliográfica	Realizado	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto
Submissão para conferência internacional: ICRA 2016										Previsto				
Submissão para conferência internacional: SSIV 2015			Previsto											
Submissão para conferência nacional: SBAI 2015						Previsto								
Submissão para periódico IEEE												Previsto		
Redação da Dissertação		Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto		
Fase de simulação				Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto		
Fase de testes com a plataforma							Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto		
Ensaio em voo									Previsto	Previsto	Previsto	Previsto		
Defesa da Dissertação														Previsto

Legenda    Previsto    Realizado    Não Realizado

Figura: Cronograma físico.

# Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Introdução
- 3 Tópicos tutorias
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero
- 5 Metodologia
- 6 Cronograma
- 7 Viabilidade da proposta**
- 8 Resultados esperados
- 9 Conclusão
- 10 Próximos Passos

# Viabilidade da proposta

- Quatro quadricópteros com 45cm de diâmetro
- Dois Raspberry PI modelo B com processador de 700MHz, 512MB de memória
- Sensores ultrassônicos
- Matlab R2013a com Simulink

# Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Introdução
- 3 Tópicos tutorias
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero
- 5 Metodologia
- 6 Cronograma
- 7 Viabilidade da proposta
- 8 Resultados esperados**
- 9 Conclusão
- 10 Próximos Passos

## Resultados esperados

- Foram elaboradas três missões

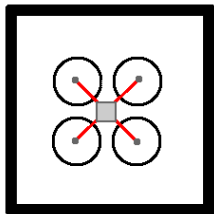
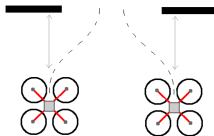


Figura: Missão 1.  
Veículo cercado e estabilizado



**Figura:** Missão 2:  
Veículo em  
movimento com  
obstáculo a frente.  
Desvio pelos lados

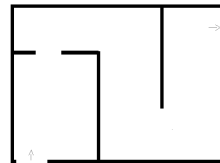


Figura: Missão 3:  
Trajeto completo  
num ambiente com  
obstáculos



# Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Introdução
- 3 Tópicos tutorias
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero
- 5 Metodologia
- 6 Cronograma
- 7 Viabilidade da proposta
- 8 Resultados esperados
- 9 Conclusão**
- 10 Próximos Passos

# Conclusão

- Um tema importante e recorrente para estudo do domínio de controle em *Cyber-Physical Systems*(CPS)
- Inúmeras aplicações na área de defesa
- Construção do módulo de desvio de obstáculos da plataforma VANT-IME

# Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Introdução
- 3 Tópicos tutorias
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero
- 5 Metodologia
- 6 Cronograma
- 7 Viabilidade da proposta
- 8 Resultados esperados
- 9 Conclusão
- 10 Próximos Passos**

# Próximos passos

- Em andamento
  - Pesquisa bibliográfica sobre a dinâmica do quadricóptero
- Próximos passos
  - Pesquisa bibliográfica sobre desvio de obstáculo
  - Estruturação e primeiros testes do ambiente para simulação
  - Validação dos componentes em laboratório

# Referências I



Basit, A., Qureshi, W. S., Dailey, M. N., and Krajník, T. (2014).

Joint localization of pursuit quadcopters and target using monocular cues.

*Journal of Intelligent & Robotic Systems*, pages 1–18.



Copter, R. . (2013).

Ro 4 copter starters guide.



Domingues, J. M. B. (2009).

Quadrotor prototype.

[https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395139421058/Tese\\_de\\_Mestrado.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395139421058/Tese_de_Mestrado.pdf).

Acessado em 19/02/2015.



Junior, J. (2009).

Simulação e implementação em tempo real de sistemas de navegação inercial integrados INS/GPS.

[http://pged.ime.eb.br/teses/mestrado/tese\\_msc\\_2009\\_adalberto.pdf](http://pged.ime.eb.br/teses/mestrado/tese_msc_2009_adalberto.pdf).

## Referências II



Kingdom, R. (2013).

PID controller tutorial for robots.

<http://robot-kingdom.com/pid-controller-tutorial-for-robots/>.

Acessado em 12/01/2015.



Liang, O. (2014).

Quadcopter PID explained and tuning.

<http://blog.oscarliang.net/quadcopter-pid-explained-tuning/>.

Acessado em 12/01/2015.



Mian, A. A. and Daobo, W. (2008).

Modeling and backstepping-based nonlinear control strategy for a 6 DOF quadrotor helicopter.

*Chinese Journal of Aeronautics*, 21(3):261–268.

# Referências III



Salih, A. L., Moghavvemi, M., Mohamed, H. A., and Gaeid, K. S. (2010).  
Flight PID controller design for a UAV quadrotor.  
*Scientific Research and Essays*, 5(23):3660–3667.



Saranrittichai, P., Niparnan, N., and Sudsang, A. (2013).  
Robust local obstacle avoidance for mobile robot based on dynamic window  
approach.  
In *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and  
Information Technology (ECTI-CON), 2013 10th International Conference on*,  
pages 1–4. IEEE.



Stephane, Nicolas Brulez, F. D. (2014).  
Ar.drone developer guide.  
[http://ardrone2.parrot.com/media/uploads/support\\_ardrone\\_1/ar.drone\\_user-guide\\_uk.pdf](http://ardrone2.parrot.com/media/uploads/support_ardrone_1/ar.drone_user-guide_uk.pdf).  
Acessado em 25/01/2015.

# Obrigado

bsgiovanini@gmail.com

