

Controle Robusto com ganho escalonado e controle robusto chaveado aplicado a um sistema quadricóptero

Robust gain scheduling control and robust switched control applied to a quadcopter system

RESUMO

Karen Itsuki Taniguchi
karenitaniguchi@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Paulo Rogério Scalassara
prscalassara@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Cristiano Marcos Agulhari
agulhari@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Este trabalho tem como proposta a síntese de um controlador com ganho escalonado e outro chaveado para um sistema do tipo quadricóptero, onde o controle aplicado será apenas para a estabilização de atitude do quadricóptero, ou seja, somente o controle da posição angular do veículo.

A modelagem do sistema será realizada utilizando a abordagem quase-LPV que, dentre outras características, exige que os estados estejam limitados em uma região pré-definida. A extensão de tal região, denominada região de factibilidade, pode variar com a técnica de síntese considerada, e será utilizada neste trabalho como um critério para avaliação do desempenho dos controladores.

PALAVRAS-CHAVE: Quadricóptero. Controle Chaveado. Controle com ganho escalonado. Sistema quase-LPV.

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



ABSTRACT

This work proposes the synthesis of a scheduling gain controller and another one switched for a quadcopter type system, where the applied control will only be for the quadcopter attitude stabilization, that is, only the angular position control of the vehicle.

System modeling will be performed using the quasi-LPV approach which, among other features, requires that states be limited in a predefined region. The extent of such a region, called a feasibility region, may vary with the synthesis technique considered, and will be used in this paper as a criterion for evaluating the performance of the controllers.

KEYWORDS: Quadcopter. Switched Control. Scheduling gain control. Quasi-LPV system.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tem-se notado o crescimento no uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), do inglês UAVs (*Unmanned Aerial Vehicle*), que são basicamente aeronaves que não necessitam de um piloto para manipular a aeronave durante o voo. Tais aeronaves podem ser controladas remotamente ou com o auxílio de um microcontrolador utilizando-o como piloto automático. Inicialmente, essas aeronaves eram utilizadas somente como armas militares, hoje devido ao avanço tecnológico já são acessíveis aos civis (ARANEDA et al., 2014).

Uma das categorias dos VANTs são as aeronaves que possuem a capacidade de decolagem e aterrissagem vertical, do inglês VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*). Essas aeronaves são capazes de voar em todas as direções, fazer voos em baixas velocidades e possuem a habilidade de pairar no ar. Dentre as aeronaves do tipo VTOL o mais utilizado é o quadricóptero ou quadricóptero, devido à menor complexidade de seu modelo dinâmico e maior facilidade de controle (QUEIROZ, 2014).

Nas últimas décadas inúmeras estratégias de controle têm sido aplicadas em sistemas do tipo quadricóptero, porém para este tipo de sistema deve-se levar em consideração que há características não-lineares presentes no modelo do sistema quadricóptero, o que faz com que ele se torne mais difícil de ser controlado. Assim, para garantir a estabilidade da aeronave, são aplicadas técnicas de controle não-linear ou técnicas de controle utilizando sistemas LPV (Linear aos Parâmetros Variantes no tempo) (SALBEGO et al., 2017).

Dentre todas as técnicas de controle estudadas ao longo dos anos uma abordagem que tem ganhado destaque é a técnica de controle com ganho escalonado, que utiliza um sistema que leva em consideração o modelo não-linear da aeronave. Com isso não é necessário fazer a linearização do modelo para a síntese do controlador, e as não-linearidades presentes no sistema são consideradas como sendo linear dependente de parâmetros, permitindo a utilização de técnicas de controle que sejam capazes de garantir a estabilidade da aeronave (ALVES et al., 2012).

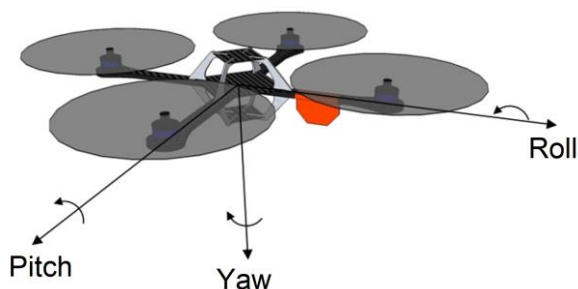
Outra técnica que tem se mostrado eficiente na obtenção de controladores utilizando sistemas LPV é a técnica chamada de controle chaveado. Esta técnica possui a característica de chavear os controladores de acordo com os subsistemas e de acordo com uma lei pré-definida. Essa técnica tem sido muito utilizada por trazer grandes resultados na factibilidade de sistemas (BUZACHERO, 2010; DEACTO et al., 2010).

Desta forma, este trabalho propõe obter e comparar controladores, chaveados e com ganho escalonado, utilizando técnicas de controle robusto para estabilizar a posição angular de um sistema quadricóptero.

MATERIAL E MÉTODOS

Para fazer as implementações foi utilizado o modelo do sistema quadricóptero obtido em (ALVES, 2012), que traz o modelo relacionado à parte linear e relacionado à parte angular do quadricóptero. Como o controle será aplicado somente na parte angular, é desconsiderado a parte linear do sistema e considera-se apenas a parte angular. Para obter o modelo que representasse o sistema de forma angular, foram levados em consideração os ângulos ϕ (roll), θ (pitch) e ψ (yaw), como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Movimentos angulares do quadricóptero.



Fonte: Adaptado (ALVES et al., 2012).

O modelo do sistema fica na forma representada pela equação (1).

$$\dot{x}(t) = A(\phi, \theta)x(t) + B(\phi, \theta)u(t) \quad (1)$$

A equação (2) mostra a representação em espaço de estados que descreve os movimentos e velocidades angulares do quadricóptero, sendo este o modelo utilizado no trabalho.

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & \text{sen}\phi \tan\theta & \text{cos}\phi \tan\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \text{cos}\phi & -\text{sen}\phi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\text{sen}\phi}{\text{cos}\theta} & \frac{\text{cos}\phi}{\text{cos}\theta} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{j_y - j_z}{j_x} r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{j_z - j_x}{j_y} p \\ 0 & 0 & 0 & \frac{j_x - j_y}{j_z} q & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \\ p \\ q \\ r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{j_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{j_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{j_z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{pmatrix} \quad (2)$$

Como existe não-linearidades presentes no sistema considerou-se as mesmas como sendo dependentes de parâmetros variantes no tempo, onde os parâmetros adotados são funções dos estados e não exclusivamente do tempo, sendo este o sistema quase-LPV.

Para que diminuísse o nível de complexidade da implementação, devido às funções trigonométricas presentes no sistema, foram feitas aproximações lineares das funções trigonométricas do sistema considerando uma região, onde

os ângulos ϕ e $\theta \in [-15, 15]$, visto que as mesmas tinham um comportamento linear. As aproximações foram feitas com o software MATLAB com o auxílio da função fit.

Utilizando as Desigualdades Matriciais Lineares (LMIs) é possível obter um ganho $K(\phi, \theta)$ que estabilize o sistema para uma determinada região de atuação, a LMI utilizada para encontrar o controlador com ganho escalonado é apresentada na equação (3).

$$\begin{aligned} W &> 0 \\ A(\phi, \theta)W + WA^T(\phi, \theta) + B(\phi, \theta)Z(\phi, \theta) + Z^T(\phi, \theta)B^T(\phi, \theta) &< 0 \end{aligned} \quad (3)$$

A resolução das LMIs apresentadas em (3) é feita a partir da obtenção das matrizes W e Z que satisfazem as desigualdades apresentadas em (3), então o controlador é obtido utilizando a equação apresentada a seguir:

$$K(\phi, \theta) = Z(\phi, \theta)W^{-1} \quad (4)$$

Para o controlador chaveado são definidos 2 controladores, que deverão chavear entre si. O ganho é obtido utilizando o sistema descrito na equação (2) para a LMI apresentada em (5).

$$\begin{bmatrix} A_j S_i + B_j Y_i + (A_i S_i + B_j Y_i)' - \gamma S_i & \\ \gamma S_i & \gamma S_j \end{bmatrix} < 0 \quad (5)$$

$$K_i = Y_i S_i^{-1} \quad (6)$$

Onde i e j são o números de controladores e o número de vértices do politopo de incertezas, respectivamente.

Foram definidos o número de controladores como 2 e o número de vértices 4, sendo necessárias 4 LMIs. Desta forma, o índice j das matrizes $A_j(\phi, \theta)$ e $B_j(\phi, \theta)$ receberá os valores de 1 a 4, enquanto que o índices i e j para as matrizes S_i e Y_i receberão os seguintes valores para cada uma das 4 LMIs, $[i, j] = [1, 1]$, $[i, j] = [1, 2]$, $[i, j] = [2, 1]$ e $[i, j] = [2, 2]$. Para os controladores os índices ficarão da seguinte forma, $[i, j] = [1, 1]$ e $[i, j] = [2, 2]$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para encontrar os controladores, para ambas as técnicas, é necessário fazer a resolução das LMIs e ela é feita utilizando o software MATLAB em conjunto com uma toolbox do MATLAB chamada Yalmip, responsável por fazer a modelagem das LMIs presentes no problema, em conjunto com o rolmip para facilitar a modelagem e o Sedumi para resolver as LMIs.

Com a resolução das LMIs, foi possível encontrar qual a região máxima que cada controlador conseguiu obter. O Quadro 1 apresenta a máxima região que cada controlador conseguiu abranger.

Quadro 1 – Resultados dos controladores

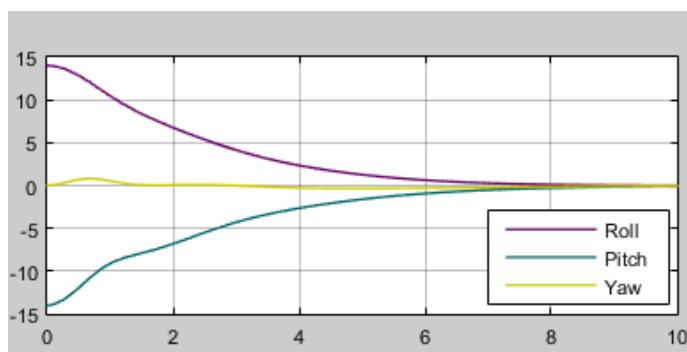
Controlador	Região de ϕ (roll)	Região de θ (pitch)
Chaveado	$[-0,5;0,5]$	$[-0,5;0,5]$
Ganho escalonado	$[-14;14]$	$[-14;14]$

Fonte: Autoria própria (2019).

Para a análise das respostas dos sistemas para cada controlador foi utilizado o software MATLAB/Simulink para fazer a simulação do sistema. As condições iniciais foram definidas com o auxílio do Quadro 1, verificando se as condições estão dentro da região que o controlador atua.

Utilizando a técnica de ganho escalonado a resposta obtida e apresentada a seguir.

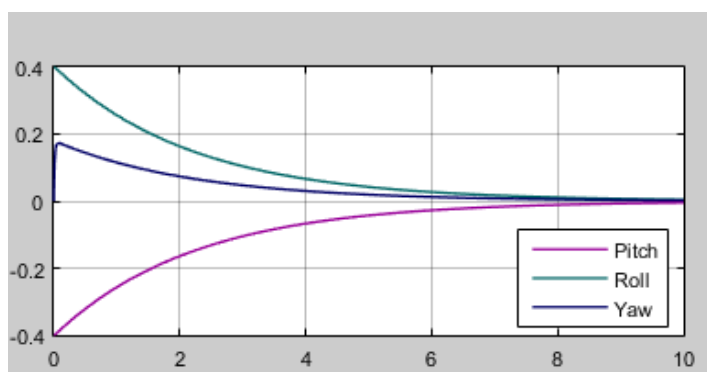
Figura 2 – Resposta do sistema utilizando controlador com ganho escalonado.



Fonte: Autoria própria.

A resposta obtida do sistema utilizando os controladores chaveados é apresentada pela Figura 3.

Figura 3 – Resposta do sistema utilizando controlador chaveado.



Fonte: Autoria própria.

CONCLUSÃO

Em virtude dos resultados apresentados, foi verificado que para as duas técnicas de controle utilizadas os sistemas estabilizaram. Porém, para o controlador chaveado a região máxima que o controlador conseguia abranger era de $[-0,5;0,5]$ e o controlador com ganho escalonado uma região de $[-14;14]$. De acordo com a extensão da região de factibilidade para ambos controladores o que obteve o melhor resultado foi o controlador com ganho escalonado, pois abrange uma maior região de factibilidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, à Fundação Araucária pelo apoio financeiro concedido ao projeto.

REFERÊNCIAS

ALVES, A. S. C. **Estudo e aplicação de técnicas de controle embarcadas para estabilização de voo de quadricópteros**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2012.

ARANEDA, C. J.; DUGAICH, F. S.; NEVES, G. C.; SILVA, L. A.; SILVA, M. H. V. **Quadricóptero**. 2014. Tese (Trabalho de conclusão de curso em técnico em mecatrônica) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2014. Disponível em: <http://www.excute.educatronica.com.br/Monografias%2040a%20EXCUTE/Mecatrônica/Quadricóptero.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2019.

BUZACHERO, Luiz Francisco Sanches. **Otimização de controladores robustos de sistemas dinâmicos sujeitos a falhas estruturais**. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2010.

DEAECTO, Grace Silva et al. **Projeto de controladores dinâmicos com comutação= aplicação em sistemas mecânicos e conversores de potência cc-cc**. [sn], 2010.

SALBEGO, Marciano Prates et al. **Controle robusto de quadricópteros por meio de desigualdades matriciais lineares**. [sn], 2017.

QUEIROZ, Juliano da Rocha. **Construção de uma veículo aéreo não tripulado na configuração quadrirrotor como plataforma de estudos**. 2014. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.