ESTABILIZAÇÃO DINÂMICA DE AERONAVES POR *GAIN SCHEDULING*

Palavras-Chave: CONTROLE, AERONAVES, GAIN SCHEDULING

Autores(as):

MARIANA VASCONCELOS SILVA, FEEC - UNICAMP

Prof. Dr. MATHEUS SOUZA (orientador), FEEC - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

Este resumo demonstra o desenvolvimento e a implementação de um sistema de controle para aeronaves de competição da classe Regular de Aerodesign, realizado pela equipe Urubus da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Essa pesquisa possui como principal objetivo assegurar a estabilidade dinâmica e eficiência em diferentes condições operacionais de voo. Para isso, serão abordados os seguintes aspectos:

- Modelagem não-linear da dinâmica da aeronave;
- Linearização em diversos pontos de operação;
- Projeto de controladores específicos;
- Implementação da técnica de Gain Scheduling;
- Atendimento aos padrões definidos pela norma MIL-F-8785C.

METODOLOGIA:

1. MODELAGEM DA AERONAVE

1.1 Equações Não-Lineares (6DOF)

A modelagem matemática da aeronave utiliza equações não-lineares com seis graus de liberdade (6DOF), que são capazes de descrever o comportamento dinâmico do sistema, con siderando forças e momentos atuantes na aeronave. Cada termo da equação corresponde a fenômenos físicos:

• **Termos de aceleração ($\dot{U}$, $\dot{V}$,$\dot{W}$):** Representam variações instantâneas de velocidades lineares;

• **Termos giroscópicos (qW,rV,pq,qr):** Demonstram o acoplamento dinâmico entre os eixos da aeronave;

• **Termos aerodinâmicos (X,Y,Z,L,M,N):** Relacionam-se com às forças aerodinâmicas produzidas pelas asas, empenagens e superfícies de controle, o que influencia diretamente a estabilidade e a performance dinâmica da aeronave.

As equações fundamentais de movimento são expressas por:

$$
\begin{aligned}
&\text{Forças:}\\
m(\dot{U} + qW - rV) &= X - mg\sin\theta + \kappa T\cos\theta\\
m(\dot{V} + rU - pW) &= Y + mg\cos\theta\sin\phi\\
m(\dot{W} + pV - qU) &= Z + mg\cos\theta\cos\phi - \kappa T\sin\theta\\
&\text{Momentos:}\\
I_x\dot{p} + I_{xz}\dot{r} &= L - (I_z + I_y)qr - I_{xz}qp\\
I_y\dot{q} &= M - (I_x - I_z)pr - I_{xz}(r^2 - p^2)\\
I_z\dot{r} + I_{xz}\dot{p} &= N - (I_y - I_x)qp + I_{xz}qr
\end{aligned}
$$

Inicialmente, o modelo foi testado com dados da aeronave Boeing 747, conforme apresentados por Heffley e Jewell (1972), servindo de validação preliminar antes de sua adaptação para as características específicas da aeronave de competição.

2. LINEARIAZAÇÃO E PONTOS DE OPERAÇÃO

A linearização do modelo foi realizada com base na metodologia apresentada no livro Feed back Control of Dynamic Systems, considerando condições de voo estável e nivelado, definidas como:

$$U = U_0 + u$$

$$V = v$$

$$W = W_0 + w$$

Assim, implementou-se no Simulink:

Variável	**Condição de Equilíbrio**
Velocidade (U_0)	$V_{ref}\cos\theta_0$
Velocidades angulares	$p_0 = q_0 = r_0 = 0$
Ângulo de roll (ϕ)	$\phi_0 = 0$

Tabela 1 – Pontos de linearização implementados

Para cada ponto operacional, as equações de equilíbrio ($\dot{x}$= 0) são resolvidas:

$$0 = X_0 - mg.sin\theta_0 + kT.cos\theta_0$$

$$0 = Z_0 + mg.cos\theta_0 - kT.sin\theta_0$$

Assim, para a validação, realizou-se uma comparação entre a resposta do modelo linearizado e o modelo não-linear para pequenas perturbações. Obtendo-se uma resposta temporal similar ao modelo não-linear para pequenas perturbações e autovalores consistentes com os modos dinâmicos do livro

(Phugoid, Short-period), o próximo passo é fazer um controle linear para cada ponto e utilizar gain scheduling.

PERSPECTIVAS E IMPLEMENTAÇÃO DO GAIN SCHEDULING

O desenvolvimento do projeto de estabilização dinâmica utilizando gain scheduling oferece perspectivas otimistas para a aplicação em aeronaves de competição da classe Regular de Aerodesign. Atualmente, após os estágios iniciais de modelagem e linearização detalhados anteriormente, o projeto está na etapa de implementação prática do gain scheduling, aproveitando os pontos operacionais já identificados e validados. O gain scheduling é uma técnica de controle avançada que ajusta automaticamente os ganhos de controladores lineares em tempo real, baseando-se em variáveis de operação do sistema. Este método permite que o sistema controle de forma precisa e eficiente diferentes condições operacionais, principalmente quando o sistema possui comportamentos não-lineares significativos ou sofre variações substanciais durante o funcionamento. Entre as vantagens do gain scheduling podemos citar a capacidade de lidar com a não linearidade do sistema, o aumento significativo na faixa operacional efetiva do controlador e a melhoria no desempenho dinâmico em diferentes regimes de operação. Além disso, sua implementação reduz a necessidade de controladores complexos para cada situação operacional, o que torna o sistema de controle mais simples e robusto. A implementação está ocorrendo através de simulações que estão sendo desenvolvidas no MATLAB/Simulink. Esses simuladores permitirão testes e validações prévias do sistema antes da construção física na aeronave, assegurando um maior grau de segurança e previsibilidade do desempenho. O gain scheduling será implementado através da seleção de diversos pontos de operação representativos das condições reais de voo, como regimes de cruzeiro, subida e descida. Cada um desses regimes de voo utilizará um controlador linear específico, otimizado para garantir estabilidade e performance satisfatórias. A transição entre os controladores lineares será realizada através do gain scheduling, garantindo a estabilidade e controle adequados durante mudanças dinâmicas e rápidas das condições de operação. Atualmente, estamos na fase de conclusão dos simuladores, seguindo de uma incorporação dos modelos adaptados à aeronave de competição da equipe.

BIBLIOGRAFIA

[1] Urubus aerodesign. https://www.urubusaerodesign.com/.

[2] Regras e relatórios. https://saebrasil.org.br/programas-estudantis/aero-design-sae-brasil/regras-e-relatorios/.

[3] John D. Anderson Jr. Fundamentos de Engenharia Aeronáutica: Introdução ao Voo. AMGH, 2015.

[4] Luiz Costa e Silva Dutra. Glossário aerotécnico: inglês-português. São Paulo: Traço, 1979. 469 p.

[5] B. N. PAMADI. Performance, stability, dynamics and control of airplanes. Virginia: American Institute of aeronautics and astronautics, 2004.

[6] Simulink. https://www.mathworks.com//.

[7] MIL-F-8785C. Military specification flying qualities of piloted airplanes. 1949.