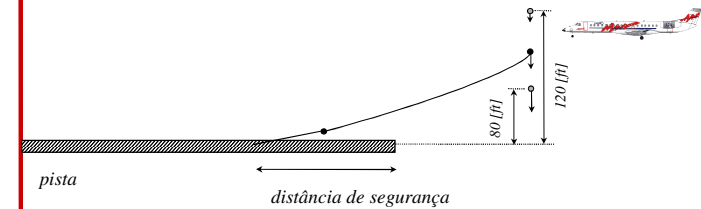


Múltiplos critérios em projeto de controle – um exemplo

Karl Heinz Kienitz
EE-301/2025

Exemplo: um controlador para a fase de arredondamento do pouso automático



Quais são os dados para o projeto?

- Uma aeronave deve realizar um arredondamento com trajetória

$$h_d(t) = 100e^{-t/5} \quad 0 [s] < t < 15 [s]$$

$$h_d(t) = 20 - t \quad 20 [s] > t > 15 [s]$$

- Hipótese simplificadora: $v = 256 [ft/s]$, constante
- Valor inicial do ângulo de ataque: $12,6^\circ$
- Condições iniciais incertas:

$$80 [ft] < h < 120 [ft]$$

$$16 [ft/s] < -dh/dt < 24 [ft/s]$$

Quais são os dados para o projeto? (cont)

- Deflexões do profundor limitadas ao intervalo $[-35^\circ, 10^\circ]$
- Valor de “stall” do ângulo de ataque: 18°
- No início do procedimento $d^2h/dt^2 = 0$
- Modelo de quarta ordem linearizado descrevendo a dinâmica (longitudinal) do avião:

```
% dx/dt=A*x+B*u, x é medido
% x=[theta_ponto delta_theta h_ponto h]
% u=delta_delta (variação do profundor)
% ângulo de ataque: alfa=theta - asin(h_ponto/v)
% Lembrete: theta = theta0 + delta_theta
```



Um enfoque “pragmático”

- Descrição linguística do arredondamento
- (Escolha de uma forma de combinação dos requisitos)
- Escolha da estrutura do controlador:
 $u = K_1x_1 + K_2x_2 + K_3(x_3 - dh_d/dt) + K_4(x_4 - h_d)$
- Escolha de LQR, um método de síntese disponível em MATLAB e com boas propriedades “gerais”
- Parametrização do problema: matrizes Q e R do LQR
- Uso de otimização



Descrição do arredondamento

- “O ângulo de arfagem no toque deve ser ligeiramente positivo” E
- “O ângulo de ataque deve permanecer inferior ao valor de ‘stall’” E
- “O erro em altitude deve ser pequeno” E
- “O erro em taxa de descida deve ser pequeno” E
- “Erro de distância de toque pequeno” E
- “Taxa de subida no toque ligeiramente negativa” E
- “A menor taxa de descida é positiva mas não grande demais”



Pontos relevantes

- A descrição formal dos critérios
- A agregação de critérios



Funções de pertinência / funções de qualidade

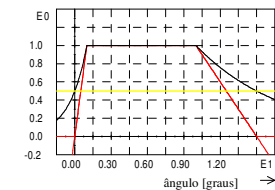
“o ângulo de arfagem é ligeiramente positivo”

ou
“ θ é SP”

Variável linguística: θ

Valor linguístico: SP

Função de pertinência: μ_{SP}



$(-\infty, 1] \xrightarrow{2^{x-1}} (0, 1]$



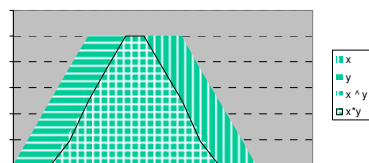
Traduzindo especificações linguísticas

Formulação linguística:

$(V_1 \text{ é } M_1) \text{ E } \dots \text{ E } (V_n \text{ é } M_n)$

Função custo:

$P(v_1, \dots, v_n) = \mu_{M1}(v_1) \wedge \dots \wedge \mu_{Mn}(v_n)$



Observações:

- 1) A operação usada com maior frequência para implementar $\wedge$ é min
- 2) O projeto consiste em escolher parâmetros de projeto para maximizar / aumentar P



Observações

Seguem junto com este arquivo: um arquivo adicional com uma revisão de otimização multicritérios e um conjunto de arquivos MATLAB usados na apresentação do exemplo.

O exemplo apresentado se baseia nas seguintes referências, mas não tem o objetivo de reproduzir os resultados de nenhuma delas:

KIENTZ, K.H. Controller design using fuzzy logic—A case study. **Automatica**, v. 29, n. 2, p. 549-554, 1993.

[https://doi.org/10.1016/0005-1098\(93\)90155-M](https://doi.org/10.1016/0005-1098(93)90155-M)

JOOS, H.-D. A methodology for multi-objective design assessment and flight control synthesis tuning. **Aerospace Science and Technology**, v. 3, n. 3, p. 161-176, 1999.

[https://doi.org/10.1016/S1270-9638\(99\)80040-6](https://doi.org/10.1016/S1270-9638(99)80040-6)

ELLERT, F.; MERRIAM, C. Synthesis of feedback controls using optimization theory--An example. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 8, n. 2, p. 89-103, 1963.

<https://doi.org/10.1109/TAC.1963.1105534>