INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA
DEPARTAMENTO DE MECATRÔNICA
Engenharia Mecânica-Aeronáutica
MPS-43: Sistemas de Controle

Laboratório 1: Resposta Temporal e Ações de Controle

Nomes: ____
____

Objetivos: Esta aula prática tem como objetivos:

- modelar a dinâmica de um aparato mecatrônico de um grau de liberdade;
- estudar respostas temporais da planta modelada;
- verificar os efeitos dinâmicos das ações de controle proporcional, integrativa e derivativa.

1 Descrição do Aparato Mecatrônico

O aparato mecatrônico considerado nesta prática é uma "aerogangorra" como a ilustrada na Figura 1. Esse aparato tem um grau de liberdade, em ϕ, que pode ser controlado pelas forças de empuxo f_1 e f_2 dos rotores. Consideraremos aqui que a massa de sua parte móvel esteja toda concentrada nos rotores. Denote a massa de cada rotor por m. Considere a existência de uma mola torcional de coeficiente k, montada no ponto de articulação O. Neste ponto, também considere que esteja instalado um encoder (sensor de posição angular). Por fim, considere que a haste da gangorra tenha comprimento total $2l$ e seja articulada em seu ponto médio.

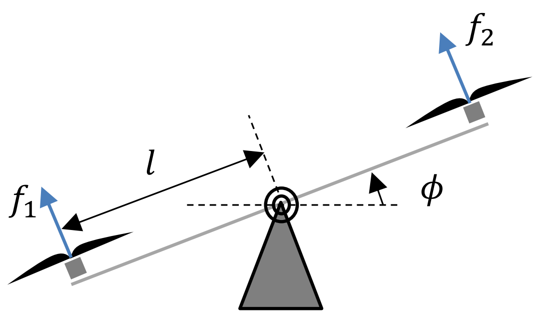

Figura 1: Aerogangorra.

Na descrição acima, identificamos a presença de três dos componentes básicos geralmente presentes em sistemas de controle:

- Planta: é a estrutura física da aerogangorra.
- Sensor: é o encoder.
- Atuadores: são os rotores (motores + hélices + *drives*).

Questão 1: No entanto, para transformar esse aparato num sistema de controle, ainda falta acrescentar um componente básico. a) Que componente é esse? b) Descreva a sua funcionalidade.

2 Modelagem Matemática

Antes de transformar o aparato descrito na Seção 1 em um sistema de controle, vamos primeiro modelar a sua dinâmica. Para isso, consideremos a segunda lei de Newton para o movimento rotacional (ou Lei de Euler) em um único grau de liberdade:

$$\sum \text{torques} = I\alpha, \tag{1}$$

onde I é o momento de inércia da parte móvel e α é a aceleração angular.

Questão 2: Obtenha a equação de movimento do aparato descrito na Seção 1 usando a Equação (1).

Se tudo está indo bem, a equação de movimento obtida na Questão 2, embora descreva a dinâmica de um único grau de liberdade, ela contém duas entradas forçantes. No entanto, observe que essas entradas não são independentes.

Questão 3: a) Mediante a transformação de variáveis

$$u \triangleq f_2 - f_1, \tag{2}$$

modifique o modelo encontrado na Questão 2 de forma que o novo modelo tenha uma única entrada u (SISO). b) obtenha a função de transferência $G(s) \triangleq \Phi(s)/U(s)$ correspondente à equação diferencial obtida no item a.

3 Controlador PID

Nesta prática, estamos interessados em controlar o ângulo ϕ. Em outras palavras, queremos que ϕ siga um dado comando externo; denotemos esse comando por $\bar{\phi}$. Para isso, usaremos o controlador mais popular na indústria: o proporcional-integrativo-derivativo (PID). Sua expressão é:

$$C(s) \triangleq \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s, \tag{3}$$

onde $U(s)$ é a transformada de Laplace de u, que será considerada a variável manipulada, $E(s)$ é a transformada de Laplace do erro de controle $e \triangleq \bar{\phi} - \phi$ e K_P, K_I e K_D são os ganhos proporcional, integrativo e derivativo, respectivamente.

4 Alocação de Controle

Uma vez que o controlador $C(s)$ controlará apenas um grau de liberdade, a sua saída $U(s)$ (variável manipulada) deve ser um sinal escalar. A questão que levantamos neste ponto é: como gerar comandos para dois motores a partir de um único sinal $U(s)$ (ou u) proveniente do controlador? Note que estamos diante de um problema expresso por uma única equação linear – a Equação (2) – e duas incógnitas, f_1 e f_2. Portanto, esse problema tem infinitas soluções. Dentre todas, a que melhor distribui esforços entre os dois atuadores é a seguinte:

$$f_1 = f^0 - u/2, \tag{4}$$

$$f_2 = f^0 + u/2, \tag{5}$$

onde f^0 é o empuxo nominal dos rotores. Note que pode-se verificar a consistência dessas equações, substituindo-as na Equação (2).

Damos o nome de alocação de controle à função desempenhada pelas equações (3)–(4). O correspondente componente, que chamaremos de alocador de controle, tipicamente aparece em sistemas de controle de plantas mecatrônicas contendo redundância de atuadores em relação à quantidade de graus de liberdade controlados, que é uma característica do aparato sob estudo.

5 Respostas Temporais

Vamos agora estudar a dinâmica de um sistema de controle da aerogangorra mediante simulação.

Questão 4: Modele em Simulink um sistema de controle com a arquitetura ilustrada no diagrama de blocos da Figura 2.

Em todas as simulações realizadas em seguida, considere que a massa de cada rotor seja $m = 0,25$ kg, que a haste móvel tenha comprimento $2l = 0,6$ m, que o coeficiente da mola tenha valor $k = 0,02$ Nm/rad e que o empuxo nominal dos rotores tenha valor $f^0 = 1$ N.

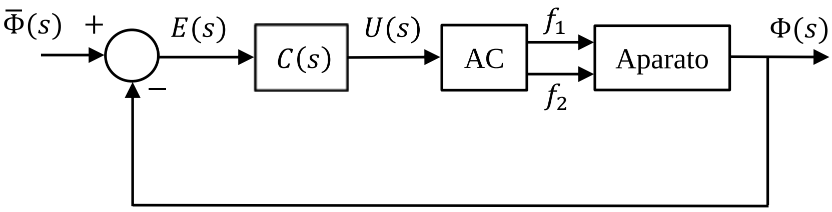

Figura 2: Diagrama de blocos do sistema de controle da aerogangorra.

Questão 5: Considerando os valores de K_P, K_I e K_D relacionados na Tabela 1, faça simulações do sistema de controle modelado na Questão 4 submetendo-o a uma entrada de comando do tipo degrau, com amplitude de 30 graus. a) Registre, na mesma tabela, os respectivos *overshoots* e instantes de pico. b) Faça um gráfico contendo todas as respostas temporais $\phi(t)$ obtidas. c) Faça um outro gráfico contendo as respostas temporais $u(t)$ obtidas.

Questão 6: Analise os gráficos e dados obtidos na Questão 5.

Questão 7: Ainda considerando os valores de K_P, K_I e K_D relacionados na Tabela 1, faça simulações do sistema de controle modelado na Questão 4 submetendo-o agora à entrada de comando $\bar{\phi}(t) = (\tan \pi/20)t\mathbf{1}(t) - (\tan \pi/20)(t-5)\mathbf{1}(t-5)$. a) Registre, na mesma tabela, os respectivos erros de controle no instante final da rampa (5s). b) Faça um gráfico contendo todas as respostas temporais $\phi(t)$ obtidas.

Questão 8: Analise os dados e o gráfico obtidos na Questão 7.

Tabela 1: Tabela de dados experimentais.

Caso	K_P	K_I	K_D	M_p	t_p	$e(5)$
1	$1,0$	$1,0$	$1,0$			
2	$2,0$	$1,0$	$1,0$			
3	$2,0$	$1,0$	$2,0$			
4	$2,0$	$2,0$	$2,0$			

6 Conclusão

Questão 9: Escreva uma conclusão que, de forma direta e sucinta, aponte o que você aprendeu nesta aula prática e qual a relação desses conceitos com o escopo da disciplina MPS-43.