

Trabalho 1 de Laboratório

DAS5131 Controle Multivariável

Hector Bessa Silveira

2018/2

Orientações Gerais

- a) Leia todo o roteiro do trabalho com atenção. Este trabalho abrange o conteúdo dos Labs 1 a 11 (exceto o Lab 9) + Capítulos 1 a 3 da Teoria.
- b) O trabalho deverá ser feito em um grupo formado por 3 (três) pessoas. As apresentações serão no dia 26 de setembro. O protótipo físico do veículo instrumentado (sem controle em malha-fechada, mas com HD e motor) deverá ser apresentado no dia 05 de setembro, mostrando os gráficos (plots) das variáveis de estado e do controle em malha-aberta. Utilize a estrutura do LMM para a impressão e construção do protótipo. Mais algumas dicas adicionais:
- Procure utilizar o Arduino Uno (e não o Nano);
 - Procure utilizar um HD de 3 platters;
 - Utilize uma PCB para conectar a IMU com o Arduino e organizar melhor as conexões;
 - A IMU deve estar alinhada com o eixo de rotação (pés das rodas);
 - Verifique os offsets na hora de passar para o Arduino também;
 - O sentido de rotação da ESC deve estar de acordo com a ordem dos cabos.
- c) O trabalho deverá ser apresentado na aula do dia 26 de setembro, com duração entre 18 e 20 minutos + 10 minutos de perguntas. Todos os membros do grupo devem apresentar. Será avaliado o tempo da apresentação, e a organização, clareza, profundidade e domínio técnico nos slides e na apresentação. Para a Questão 2, apenas o último item deverá ser apresentado. **Dica 1:** utilizem o Matlab para auxiliar nos cálculos. **Dica 2:** o sistema da Questão 2 nada mais é do que a linearização do sistema da Questão 3. Assim, os controladores projetados na Questão 2 serão

utilizados na Questão 3 (com exceção do último item da Questão 2). **Dica 3:** ensaie a apresentação.

- d) Verificar se todos os itens do roteiro foram de fato atendidos;
- e) Utilizar fundo branco em **todos** os gráficos.

Questão 1. Considere o veículo não-linear descrito no arquivo `RelatorioStabilizacaoGiroscopica.pdf`¹ e apresentado no video abaixo:

- <https://www.youtube.com/watch?v=FdHo01xYTWQ>

O objetivo é estabilizar o veículo por efeito giroscópico. Pede-se:

1. Determine os valores de todos os parâmetros do veículo (no Sistema Internacional de Unidades – SI), que são:
 - mV : massa do veículo, excluindo o giroscópio e suporte;
 - mG : massa do giroscópio;
 - aG : espessura do giroscópio;
 - aV : altura do veículo;
 - lV : comprimento do veículo;
 - dG : distância entre o centro de massa do giroscópio e o centro de rotação do veículo (contato entre o chão e as rodas);
 - dV : distância entre o centro de massa do veículo e ponto de rotação do veículo;
 - ω : velocidade de rotação do giroscópio (em rad/s)
 - g : gravidade
2. Encontre o sistema linearizado associado ao ponto de equilíbrio $x^e = 0$, $u^e = 0$. Verifique se o sistema linearizado é controlável.
3. Determine a estabilidade do equilíbrio $x^e = 0$, $u^e = 0$. Realize algumas simulações para comprovar sua resposta, comparando com o modelo linearizado do item anterior.

¹A disciplina agradece enormemente ao Mateus Abreu de Andrade por disponibilizar o projeto e o relatório para o presente trabalho, e também ao Alex Cani pelos refinamentos e aprimoramentos do protótipo.

-
4. Projete um controlador com o objetivo de estabilizar a origem (determinem vocês mesmos as especificações a serem atendidas como no Lab 4). Simule e analise os resultados obtidos (condições iniciais não-nulas), comparando com os do modelo linearizado. **Dica:** a escolha dos polos deve procurar obter um bom compromisso entre desempenho dinâmico, esforço de controle e tamanho da região de atração. Para o último, determine heurísticamente (tentativa e erro) por simulação o maior valor de $|\rho(0)|$ que pertence à região de atração, considerando que $\dot{\rho}(0) = \theta(0) = 0$.
 5. Refaça o item anterior, mas agora assumindo que os estados não podem ser realimentados. O sistema linearizado é observável se a saída (escalar) corresponder a apenas uma das variáveis de estado? Justifique sua resposta. Verifique que o sistema linearizado é observável quando o vetor de saída é composto por duas variáveis de estado adequadas.
 6. Realize a implementação digital da estrutura controlador-observador na planta real. **Dica:** veja a Seção 5.13 das Notas de Aula. Apresente e analise os resultados obtidos, mostrando também uma comparação gráfica (plot) entre a dinâmica das variáveis de estado e do controle do sistema real em malha-fechada com os simulados pelo modelo. Apresente, ainda, uma comparação entre as variáveis de estados do sistema real em malha-fechada com os estados estimados. Utilize a estrutura e os componentes do LMM para construir um protótipo do veículo e implementar o controlador. Veja os detalhes nos arquivos PDF e TXT.

Questão 2. Controle do Pêndulo Invertido Linear

O modelo de estado linear do pêndulo invertido é dado por

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -mg/M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & (m+M)g/(ML) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/M \\ 0 \\ -1/(ML) \end{bmatrix} u$$
$$y = x_1$$

onde $x = (x_1, x_2, x_3, x_4) \in \mathbb{R}^4$ é o vetor de estado, $x_1 = y$ é a posição do carro, $x_2 = \dot{y}$ é a velocidade do carro, $x_3 = \theta$ é o ângulo da haste do pêndulo em relação ao eixo vertical, $x_4 = \dot{\theta}$ é a velocidade angular da haste, e u é a força aplicada no carro (entrada de controle). Este modelo é válido quando $\theta \cong 0$ e $\dot{\theta} \cong 0$. Veja o livro do Chen, Exemplo 2.8, p. 22, para maiores detalhes. Considere que $m = 0.5\text{kg}$ (massa da esfera do pêndulo), $M = 1\text{kg}$ (massa do carrinho), $L = 1\text{m}$ (comprimento da haste do pêndulo) e $g = 9.81\text{m/s}^2$ (aceleração da gravidade).

1. Determine a estabilidade (interna) da origem. Realize algumas simulações para comprovar sua resposta.
2. Verifique a controlabilidade e a observabilidade do sistema. Mostre que o sistema não é observável caso $y = x_3 = \theta$.
3. Projete um controlador para que a saída do sistema rastreie referências do tipo degrau e rejeite perturbações do tipo degrau **na entrada**, assumindo que os estados podem ser medidos (determinem vocês mesmos as especificações a serem atendidas). Simule para diversas condições iniciais diferentes (nulas e não-nulas) e vários valores para as amplitudes da referência e da perturbação. Analise o desempenho do controlador projetado. Nas simulações, considere que o sinal de controle satura em $\pm 50N$. Determine também a função de transferência de malha-fechada com relação à referência. **Dica:** veja o Lab 5.
4. Refaça o item anterior, mas agora assumindo que os estados não podem ser realimentados. **Dica:** veja o Lab 6.
5. Repita o Item 3 para que a saída do sistema rejeite uma perturbação senoidal de frequência $\omega = 0.1$ e offset não-nulo. Aqui, considere que a referência é nula.

Questão 3. Controle do Pêndulo Invertido Não-Linear

O modelo do pêndulo invertido não-linear é dado por

$$\begin{aligned}(M + m)\ddot{y} &= u - mL\ddot{\theta} \cos \theta + mL(\dot{\theta})^2 \sin \theta \\ mL\ddot{\theta} &= mg \sin \theta - m\ddot{y} \cos \theta\end{aligned}$$

1. Represente este modelo em espaço de estado.
2. Determine o conjunto dos pontos de equilíbrio (x^e, u^e) .
3. Encontre o sistema linearizado associado ao equilíbrio $x^e = 0, u^e = 0$ (você terá que chegar no sistema linear da questão anterior). Verifique se o sistema linearizado é controlável e observável. Mostre que o sistema linearizado não é observável caso $y = x_3 = \theta$.
4. Determine a estabilidade do equilíbrio $x^e = 0, u^e = 0$. Realize algumas simulações para comprovar sua resposta, comparando com o modelo linearizado da questão anterior.
5. Projete um controlador para que a saída do sistema rastreie referências do tipo degrau e rejeite perturbações do tipo degrau **na entrada**, assumindo que os estados podem ser realimentados (determinem vocês mesmos as especificações a serem atendidas como no Lab 5). **Dica:** a escolha dos polos deve procurar obter um bom compromisso entre desempenho dinâmico, esforço de controle e tamanho da região de atração. Para o último, determine heurísticamente (tentativa e erro) por simulação o maior valor de $|\theta(0)|$ que pertence à região de atração, considerando que $y(0) = \dot{y}(0) = \dot{\theta}(0) = 0$. Simule e analise os resultados de simulação obtidos para vários valores das amplitudes da referência e da perturbação, e condições iniciais dentro e fora da região de atração do ponto de equilíbrio de malha-fechada, comparando com os do modelo linearizado. Nas simulações, considere que o sinal de controle satura em $\pm 50N$. **Dica:** veja o Lab 7.
6. Refaça o item anterior, mas agora assumindo que os estados não podem ser realimentados. **Dica:** veja o Lab 8.