Laboratório de Controle de Sistemas

Profa. Grace S. Deaecto

Faculdade de Engenharia Mecânica / UNICAMP
13083-860, Campinas, SP, Brasil.
grace@fem.unicamp.br

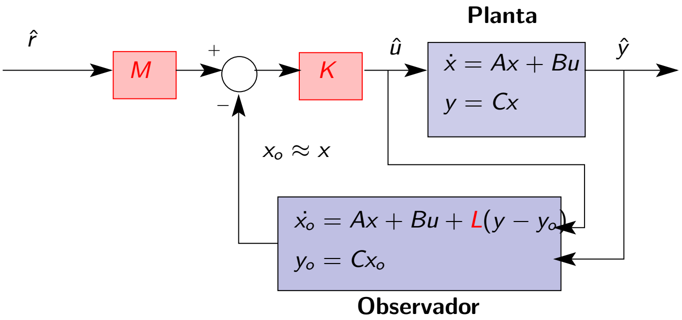
Primeiro Semestre de 2016

Experimento 6

Controle por realimentação de saída de uma planta eletrônica

Objetivo

O objetivo deste experimento é projetar via realização em espaço de estado um controlador e um observador de estado de forma a controlar a planta eletrônica de terceira ordem ($n = 3$) já identificada no Experimento 02. A figura a seguir apresenta o diagrama de blocos do sistema sendo K, L e M ganhos matriciais que devem ser determinados.



Conceitos fundamentais

- Supomos que o estado $x \in \mathbb{R}^n$ não está disponível para realimentação. Ele será substituído pelo estado estimado $x_o \in \mathbb{R}^n$ fornecido pelo observador, o que torna possível a implementação do controle. Do esquema anterior, temos
  - Representação de estado da planta

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned}$$

  - Representação de estado do observador

$$\begin{aligned} \dot{x}_o &= Ax_o + Bu + L(y - y_o) \\ y_o &= Cx_o \end{aligned}$$

  - Sinal de controle

$$u = K(Mr - x_o)$$

Conceitos fundamentais

- Definindo a variável de estado aumentada $x_a \in \mathbb{R}^{2n}$ como sendo

$$x_a = \begin{bmatrix} x \\ \underbrace{x - x_o}_{e_o} \end{bmatrix}$$

obtemos

$$\begin{aligned} \dot{x}_a &= \begin{bmatrix} (A - BK) & BK \\ 0 & (A - LC) \end{bmatrix} x_a + \begin{bmatrix} BKM \\ 0 \end{bmatrix} r \\ y &= \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} x_a \end{aligned}$$

A equação característica do sistema em malha fechada é

$$\det(sI - (A - BK))\det(sI - (A - LC)) = 0$$

Conceitos fundamentais

- De acordo com a equação anterior a determinação de K e L é realizada de maneira independente, ou seja, os polos são alocados através da escolha do ganho de controle K como se o estado estivesse disponível para realimentação. O ganho L é determinado de forma que a estimação do estado seja realizada adequadamente. Estas propriedades decorrem do Teorema da Separação.
- Com a transformada de Laplace determinamos a função de transferência do sistema

$$\hat{y} = \underbrace{C\left(sI - (A - BK)\right)^{-1} BKM}_{F(s)} \ \hat{r}$$

e denotamos

$$S(s) = C\left(sI - (A - BK)\right)^{-1} B$$

Conceitos fundamentais

- Note que a função de transferência entre a referência e a saída não depende do observador. Logo, podemos escolher as raízes do polinômio $P(s)$ de modo que os polos dominantes apresentem as características desejadas da resposta transitória e determinar K de forma que

$$\det(sI - (A - BK)) = \underbrace{s^n + \sum_{i=0}^{n-1} p_i s^i}_{P(s)}$$

No Matlab o comando `K = acker(A,B,roots(P))` faz esta determinação.

Conceitos fundamentais

- Para o cálculo de L devemos escolher as raízes do polinômio $Q(s)$ de maneira que o estado estimado siga o estado verdadeiro o mais rápido possível. Em contrapartida, o projeto deve ser realizado sem que a largura de faixa do observador seja muito elevada evitando que ruídos de medição da saída afetem o processo de estimação. A determinação de L deve levar em conta a seguinte identidade

$$\det(sI - (A - LC)) = \underbrace{s^n + \sum_{i=0}^{n-1} q_i s^i}_{Q(s)}$$

No Matlab o comando `L = acker(A',C',roots(Q))'` faz esta determinação.

Conceitos fundamentais

- Para ajustar o regime permanente determinamos M tal que

$$F(0) = S(0)KM = 1$$

  Neste caso, a saída segue um degrau unitário com erro nulo.

- De forma semelhante, para seguir uma rampa unitária, com erro nulo, devemos determinar M de maneira a satisfazer as identidades $F(0) = S(0)KM = 1 \;\; e \;\; F'(0) = S'(0)KM = 0$ o que é impossível a menos que M seja uma função de transferência $M(s)$ a determinar. Neste caso,

$$F(0) = S(0)KM(0) = 1 \;\; e \;\; F'(0) = \left(\frac{d}{ds}(S(s)KM(s)) \right)_{s=0} = 0$$

  Vale ressaltar que os zeros e os polos de $M(s)$ são também zeros e polos de $F(s)$.

Conceitos fundamentais

- Uma vez determinados K, $M(s)$ e L é importante verificar como a estrutura de controle pode ser implementada. Lembrando que

$$\hat{u} = KM(s)\hat{r} - K\hat{x}_o$$

definimos o escalar $h(s) = KM(s)$ e, aplicando a transformada de Laplace na equação do observador (página 5), temos

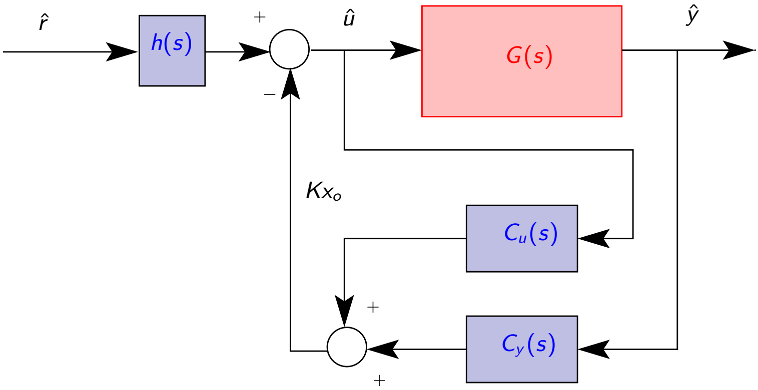
$$K\hat{x}_o = C_u(s)\hat{u} + C_y(s)\hat{y}$$

sendo

$$\begin{aligned} C_u(s) &= K(sI - (A - LC))^{-1}B \\ C_y(s) &= K(sI - (A - LC))^{-1}L \end{aligned}$$

Conceitos fundamentais

- A figura a seguir mostra o esquema final a ser implementado.



Pré-roteiro

- Projete os ganhos K, L e $M(s)$ de forma que o sistema em malha fechada satisfaça as seguintes especificações :
  - Apresente tempo de estabilização $t_e \approx 0.5$ [s] e coeficiente de amortecimento de $\xi = \sqrt{2}/2$ (Aloque o terceiro polo em s=-30).
  - Erro nulo para a entrada degrau e erro **não-nulo** para a entrada rampa. Sugestão : Considere

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \end{bmatrix}'$$

  - Refaça o projeto anterior de forma a obter erro nulo para entrada do tipo rampa. Sugestão : Considere

$$M(s) = \left(\frac{s/\tau + 1}{s/30 + 1} \right) \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \end{bmatrix}'$$

  e determine $m_i, \ i = 1, 2, 3$ e τ de forma a satisfazer as especificações em regime permanente.

Pré-roteiro

- Após realizar ambos os projetos, faça um programa simulink e obtenha a saída $y(t)$ e a entrada de controle $u(t)$ do sistema para o sinal de referência $r(t)$ sendo do tipo degrau unitário e, posteriormente, rampa unitária.
- Verifique se as especificações impostas foram atendidas e se o sinal de controle não ultrapassa a tensão de ± 10 volts.

Roteiro

Procedimento :

- A montagem é idêntica àquela utilizada no Experimento 3.
- Elabore um programa em LabVIEW para implementar o controlador e o observador de estados já projetados. Utilize o esquema apresentado na página 12.
- As funções de transferência $M(s)$, $C_u(s)$ e $C_y(s)$ serão implementadas utilizando o bloco "CD-Construct Transfer Function Model" do LabVIEW.

Roteiro

- Armazene os sinais $y(t)$ e $u(t)$ para posterior análise.
- A resposta à entrada rampa será obtida no Matlab através da integração da resposta ao degrau armazenada no laboratório.
- Compare com o resultado obtido no pré-roteiro e com os controladores proporcional, PID e Avanço-Atraso obtidos nos experimentos anteriores.

- A figura a seguir mostra um esquema da tela de execução