Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA
Controle para Sistemas Computacionais – CMC-12
Lista 3 – Controlador Proporcional e Realimentação de Velocidade

Professor: Marcos Ricardo Omena de Albuquerque Maximo

23 de fevereiro de 2025

Observação: A entrega da solução dessa lista consiste de submissão de arquivos no Google Classroom. Compacte todos os arquivos a serem submetidos em um único `.zip` (use obrigatoriamente `.zip`, e **não** outra tecnologia de compactação de arquivos) e anexe esse `.zip` no Google Classroom. O arquivo com os passos das soluções de todas as questões (rascunho) deve ser entregue num arquivo chamado `rascunho.pdf` (**não** usar outro formato além de `.pdf`). Para o `.zip`, use o padrão de nome <login_ga>_listaX.zip. Por exemplo, se seu login é `marcos.maximo` e você está entregando a lista 1, o nome do arquivo deve ser `marcos.maximo_lista1.zip`. **Não** crie subpastas, deixe todos os arquivos na "raiz" do `.zip` Remova todas as impressões do seu código antes de submeter (e.g. lembre de terminar cada linha com ';'). Use SI para as suas respostas.

Questão 1. Considere um motor elétrico como o apresentado na Figura 1, em que a dinâmica de corrente é rápida o suficiente para ser ignorada, i.e. pode-se considerar $L \approx 0$. Deseja-se projetar um servomotor de velocidade para esse motor, i.e. deseja-se controlar a velocidade angular ω do motor. Para isso, a lei de controle escolhida foi "*feedforward* + P", dada por

$$V(t) = u_{ff}(t) + u_{fb}(t) = K_{ff}\omega_r + K_p e(t), \quad (1)$$

em que $u_{ff}(t)$ e $u_{fb}(t)$ são os termos de *feedforward* e *feedback* do controlador, respectivamente, $V(t)$ é a tensão aplicada nos terminais do motor, K_{ff} é o ganho do *feedforward*, K_p é o ganho proporcional, ω_r é a velocidade angular de referência e $e(t) = \omega_r - \omega(t)$ é o erro de velocidade angular. Com isso, pede-se:

(a) Deseja-se que o sistema não tenha erro em regime para ω_r constante. Determine K_{ff} para que este requisito seja atendido.

(b) Deseja-se que o sistema tenha uma constante de tempo τ. Determine K_p para que este requisito seja atendido.

Dê suas respostas através dos arquivos de MATLAB `questao1a.m` e `questao1b.m`. Use parâmetros conhecidos de modelagem de motor elétrico: J é a inércia, b é a constante de amortecimento, R é a resistência, L é a indutância, K_t é a constante de torque.

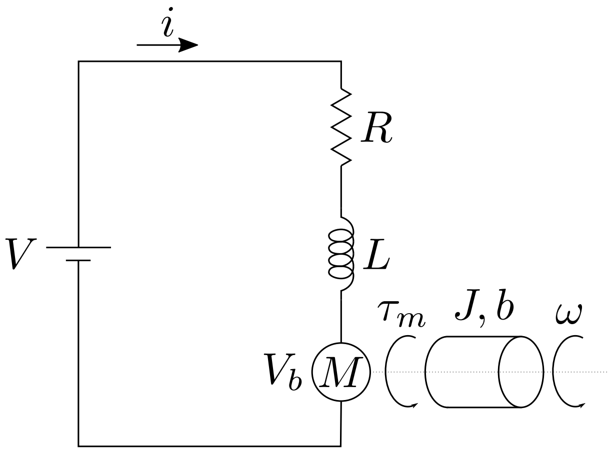

Figura 1: Motor elétrico.

Questão 2. Considere um motor elétrico como o apresentado na Figura 1, em que a dinâmica de corrente é rápida o suficiente para ser ignorada, i.e. pode-se considerar $L \approx 0$. Deseja-se projetar um servomotor de posição para esse motor, i.e. deseja-se controlar a posição angular θ do motor. Para isso, adota-se um sistema de malhas fechadas aninhadas com as seguintes leis (controlador P+V):

$$\begin{cases} \omega_r(t) = K_p\left(\theta_r - \theta(t)\right), \\ V(t) = K_v\left(\omega_r(t) - \omega(t)\right), \end{cases} \tag{2}$$

em que K_p é o ganho proporcional (da malha de posição), K_v é o ganho da malha de velocidade, θ_r é a posição de referência, $\omega_r(t)$ é a velocidade angular comandada pela malha externa de posição e $\omega(t)$ é a velocidade angular do motor. Um diagrama de blocos deste sistema de controle é mostrado na Figura 2, em que "Motor Elétrico" refere-se à planta, cujo diagrama é mostrado na Figura 3. Considerando um sistema de 2ª ordem padrão dado por

$$\ddot{y} + 2\xi\omega_n\dot{y} + \omega_n^2 y = \omega_n^2 u, \tag{3}$$

em que ω_n é a frequência natural e ξ é o fator de amortecimento. Determine K_p e K_v para que o servomotor de posição se comporte como um sistema de 2ª ordem com frequência natural ω_n e fator de amortecimento ξ desejados. Forneça sua resposta através do arquivo de MATLAB `questao2.m`.

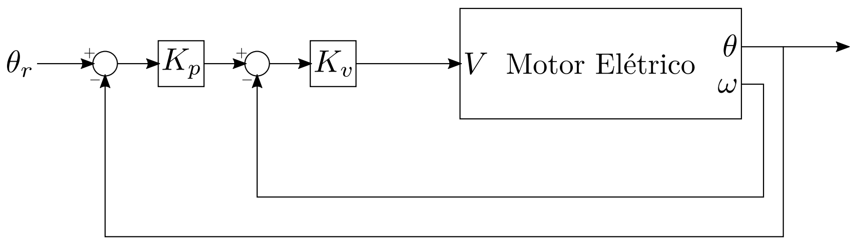

Figura 2: Motor elétrico.

Questão 3. No futebol de robôs, uma estratégia de controle comum para que o robô realize gols é fazer este seguir uma linha passando pela bola. Para isso, usa-se como

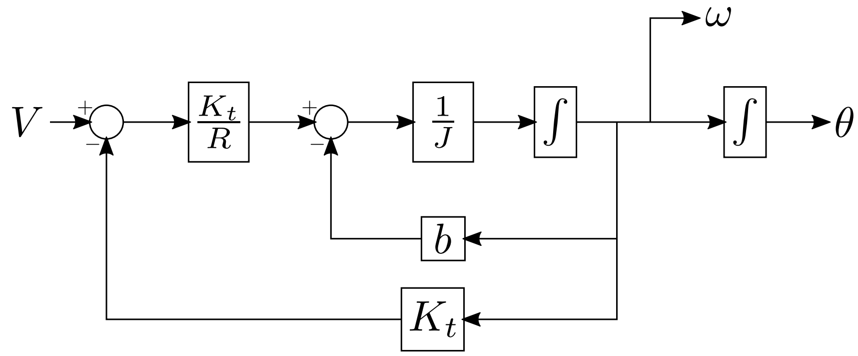

Figura 3: Motor elétrico.

realimentação a posição e a orientação do robô determinadas através de uma câmera acima do campo e algoritmos de visão computacional. Conforme mostrado em sala, pode-se modelar um robô seguidor de linha (ver Figura 4) por

$$\begin{cases} \dot{h}(t) = v \sin \psi(t), \\ \dot{\psi}(t) = \omega(t), \end{cases} \tag{4}$$

em que h é a distância do robô até a linha, ψ é o ângulo do robô em relação à linha e v é a velocidade linear do robô (constante). Para que o sistema torne-se linear, assume-se $\sin \psi \approx \psi$. Considerando uma estratégia de controle com malhas aninhadas (distância e ângulo) de acordo com

$$\begin{cases} \psi_r(t) = K_p \left(h_r - h(t) \right), \\ \omega(t) = K_\psi \left(\psi_r(t) - \psi(t) \right), \end{cases} \tag{5}$$

em que K_p é um ganho proporcional, K_ψ é um ganho de velocidade (usado para controlar o ângulo ψ), h_r é a distância de referência (em relação à linha) e $\psi_r(t)$ é o ângulo comandado pela malha externa de distância. Pede-se para escrever a dinâmica do sistema em malha fechada no formato de espaço de estados. Considere que a saída é $y = h$. Dê sua resposta através do arquivo de MATLAB `questao3.m`.

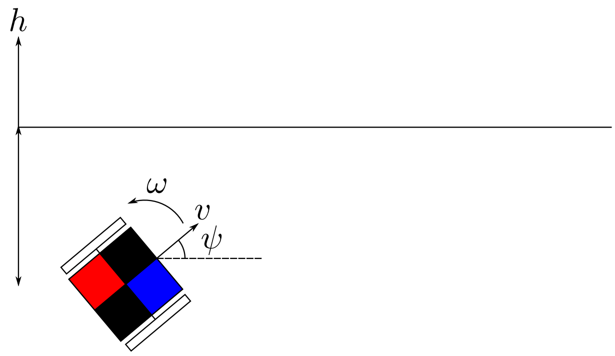

Figura 4: Robô seguidor de linha.