

Identificação Não-Linear de Modelos Músculo-Tendíneos do Membro Inferior no Controle Postural Humano Durante Postura Ereta

Daniel Boari Coelho, Mestrando em Engenharia Biomédica, Escola Politécnica, USP, e-mail: danielboari@gmail.com

Marcos Duarte, Laboratório de Biofísica, Escola de Educação Física e Esporte - USP, home page: <http://lob.iv.fapesp.br>

Introdução

O conhecimento do comportamento dinâmico de um processo é muito útil para selecionar o tipo de controlador e seus ajustes mais adequados. Esse conhecimento normalmente deve ser traduzido na forma de um modelo do processo, que é o primeiro passo na análise de um sistema de controle. O conhecimento do comportamento dinâmico de sistemas fisiológicos é imprescindível para incluir em simulações modelos simples que incluam as particularidades antropométricas e que possam reproduzir complexos modelos físico-matemáticos. Em específico na postura ereta, modelos músculo-tendíneos são necessários para otimizar as simulações e o conhecimento do grau de ativação necessária do complexo muscular para estabilizar a postura.

Métodos

A partir do modelo modificado de Zajac, com a inclusão de elementos elásticos e viscosos, proposto por (Menegaldo 1997; Menegaldo 2001), este artigo procura utilizar técnicas de identificação de sistemas não-lineares para determinar modelos que possam representar os propostos. Identificou-se o modelo músculo-tendíneo proposto por Menegaldo testando estruturas paramétricas ARX, ARMAX e OE, com sinal de entrada da ativação neural $a(t)$, comprimento músculo-tendíneo fixo, sendo uma excitação natural variando sobre sua máxima amplitude, tempo de permanência do sinal de 0,004 segundo e tempo de amostragem de 0,001 segundo. Como o corpo humano durante a postura ereta pode ser modelado como um pêndulo invertido alinhando-se na vertical com uma inclinação média de 4° para frente, utilizou-se tal valor como referência para o comprimento muscular. A saída do modelo consiste em um sinal de torque sobre a articulação do tornozelo. Pela complexidade do modelo músculo-tendíneo, empregou técnicas de identificação não-linear, como os propostos por Wiener (Pearson and Pottmann 2000). Para conhecer as funções de não-linearidade estática do modelo de Wiener, aplicou-se degrau no sinal de ativação neural $a(t)$ com amplitudes de 0,1 a cada 1 segundo no intervalo de 0 a 1 e comparou-se as saídas do modelo de (Menegaldo 1997) com as obtidas pela

identificação linear. A partir destes resultados, determinou-se um polinômio de décima ordem. Posteriormente, efetuou-se identificação para um atuador músculo-tendíneo englobando os músculos antagonistas da articulação do tornozelo durante postura ereta. O sinal de ativação neural foi caracterizado por ser uma excitação natural com tempo de permanência do sinal de 0,04 segundo e tempo de amostragem de 0,01 segundo. Por fim, procurou-se determinar as características do sistema muscular agonista (tibial posterior) e antagonista (gastrocnemius, soleus e tibial anterior). Para este modelo, a amplitude de ativação neural foi de -1 a 1, chaveado de -1 a 0 para o sistema muscular antagonista e de 0 a 1 para o músculo agonista, com as mesmas propriedades do sinal acima.

Resultados

Os modelos que apresentam melhor índice de AIC de Akaike e menores valores de Função-perda e FPE são apresentados. A Tabela 1 mostra as funções de transferência $Gca = T(s)/\theta(s)$ para os modelos musculares. Observa-se que as funções que apresentaram melhores parâmetros são caracterizadas por serem de segunda-ordem sem tempo morto.

Tabela 1: Identificação Linear dos Modelos Músculo-Tendíneos do Membro Inferior.

Músculo	Identificação Linear
Gastrocnemius	$Gca = \frac{35,68 \cdot s + 65160,0}{s^2 + 127,9 \cdot s + 4156,0}$
Soleus	$Gca = \frac{127,9 \cdot s + 198500,0}{s^2 + 108,6 \cdot s + 3272,0}$
Tibial Anterior	$Gca = \frac{138,2 \cdot s + 137100,0}{s^2 + 268,9 \cdot s + 9359,0}$
Tibial Posterior	$Gca = \frac{86,49 \cdot s + 74260,0}{s^2 + 275,4 \cdot s + 9503,0}$

As funções de não-linearidade estática do modelo de Wiener são caracterizadas por serem polinômios de segunda-ordem, com parâmetros de ordem superiores iguais a zero, conforme Tabela 2. Pela inexistência de um parâmetro de ordem zero, observa-se que os valores iniciais dos modelos lineares e não-lineares são equivalentes.

Tabela 2: Função de Não-linearidade Estática do Modelo de Wiener.

Músculo	Função Não-linear
Gastrocnemius	$T_c = 0,1119 \cdot T^2 + 0,0025 \cdot T$
Soleus	$T_c = 0,0274 \cdot T^2 + 0,0024 \cdot T$
Tibial Anterior	$T_c = 0,1173 \cdot T^2 + 0,0025 \cdot T$
Tibial Posterior	$T_c = 0,2174 \cdot T^2 + 0,0024 \cdot T$

A Figura 1 apresenta a resposta de torque do músculo gastrocnemius, em comparação com os resultantes da identificação linear e não-linear. Observa-se uma similaridade entre os resultados das identificações. Contudo, a resposta a excitações ao degrau da ativação neural mostra a discrepância entre o valor obtido pela identificação linear e o resultante da identificação não-linear.

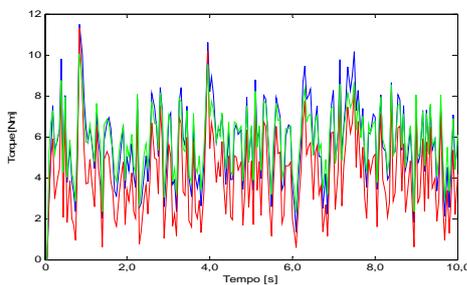


Figura 1: Resposta ao sinal de excitação natural da ativação neural do modelo muscular do gastrocnemius (azul), por identificação linear (verde) e identificação não-linear (vermelho).

(Menegaldo 1997) obteve sistemas de primeira ordem para os modelos musculares. Contudo, tais modelos são fidedignos apenas para valores de sinal de ativação neural de 0 e 1. A Figura 2 mostra a discrepância deste sistema identificado quando comparado com modelos de ordem superiores e identificados para intervalos de ativação neural entre 0 e 1.

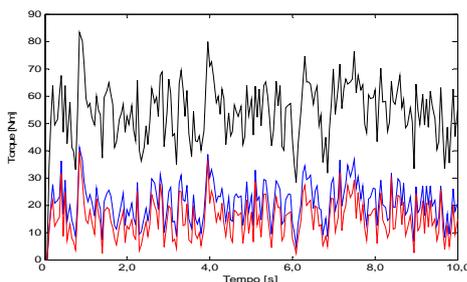


Figura 2: Resposta ao sinal de excitação natural da ativação neural do modelo muscular do soleus (azul), por identificação não-linear (vermelho) e sistema de primeira ordem (preto).

Identificou-se ainda um complexo muscular composto pelos músculos gastrocnemius, soleus e tibial anterior, originando a função de transferência como mostrada na Equação (1).

$$Gca = \frac{1017,0 \cdot (173,52 \cdot s + 1)}{215,2 \cdot s^2 + 1261,8 \cdot s + 1} \quad (1)$$

Tal identificação mostra-se próxima ao modelo de (Menegaldo 1997) com coeficiente de correlação de 61,85.

O sistema agonista-antagonista do membro inferior durante postura ereta em relação à articulação do tornozelo pode ser identificado pela Equação (2).

$$Gca = \frac{-58831 \cdot (-15,254 \cdot s + 1)}{963 \cdot s^2 + 21577 \cdot s + 1} \quad (2)$$

A Figura 3 mostra a resposta ao sinal de ativação neural dos músculos agonista-antagonista e o resposta do modelo identificado. O coeficiente de correlação para este modelo é de 52,42.

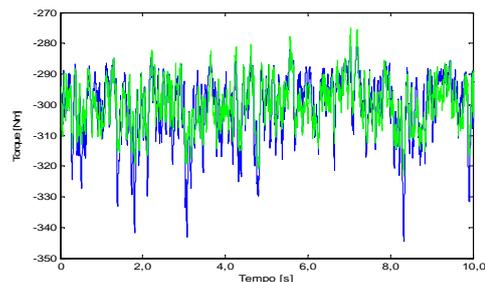


Figura 3: Resposta ao sinal de excitação natural da ativação neural do atuador muscular do tibial posterior-gastrocnemius-soleus-tibial anterior (azul) e por identificação linear (verde).

Conclusão

Modelos identificados que reproduzem fidedignamente os sistemas podem ser utilizados em substituição as complexas equações físico-matemáticas, apresentado diversas vantagens em relação a elas, como tempo de processamento, conhecimento simplificado da resposta a sinais de entrada conhecidos. Este artigo apresenta a identificação não-linear de modelos músculo-tendíneos a partir de modelos modificados de Zajac propostos por Menegaldo. Tais modelos não-lineares identificados conseguem reproduzir as características do sinal de torque na articulação do tornozelo para a postura ereta e pode ser utilizado em simulações. Em adição, mostram-se também modelos de atuadores musculares que reproduzem o sinal de torque e são capazes de reproduzir as características do sistema agonista-antagonista.

Referências bibliográficas

- Menegaldo, L. (1997). Modelagem Matemática, Simulação e Controle Artificial da Postura em Seres Humanos. Faculdade de Engenharia Mecânica. São Paulo, Universidade Estadual de Campinas.
- Menegaldo, L. (2001). Modelagem Biomecânica e Controle Ótimo da Postura Humana Através de Algoritmos Baseados na Teoria das Aproximações Consistentes. Escola Politécnica. São Paulo, Universidade de São Paulo: 307.
- Pearson, R. K. and M. Pottmann (2000). "Gray-box identification of block-oriented nonlinear models." Journal of Process Control 10: 301-315.