

Simulação do movimento de extensão do joelho utilizando OpenSim Moco

Denis Mosconi^{1a}, Fernando F. Del Monte^a, Adriano A. G. Siqueira^a

^a Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São Carlense, 400, São Carlos-SP, 13566-590, Brasil

Resumo

Neste trabalho utilizamos simulação preditiva para determinar o movimento ótimo executado na extensão do joelho de uma pessoa na posição sentada, bem como estimar o torque de junta e as ativações dos músculos envolvidos. Para realizar tal simulação utilizamos o software *OpenSim Moco* e uma adaptação do modelo musculoesquelético *leg6dof9musc*. Os resultados foram obtidos rapidamente (a simulação demorou 2 minutos para finalizar), mostrando-se coerentes com o movimento executado.

Palavras-chave: simulação preditiva, OpenSim, otimização de trajetória.

1. Introdução

Simulação preditiva em biomecânica é um tipo de simulação na qual um modelo biomecânico computacional executa um movimento, não seguindo uma trajetória pré-definida, mas sim satisfazendo a um critério de otimalidade (e.g. mínimo esforço, mínima carga de junta). As vantagens desse tipo de simulação são o fato de não ser necessário determinar uma trajetória a ser seguida, a possibilidade de considerar diferentes situações a serem simuladas e a habilidade em responder perguntas do tipo “e se?” (Lee e Umberger, 2016). Algumas aplicações de simulação preditiva incluem predição de marcha humana (Ackermann and van den Bogert, 2010), simulação de movimentos de modelo musculoesquelético (Lee e Umberger, 2016) e resolução do problema de redundância muscular (Groote et al., 2016).

Recentemente Dembia et al. (2020) introduziram o *OpenSim Moco*, um software customizável, extensivo, de fácil utilização que realiza simulações preditivas com modelos musculoesqueléticos. De acordo com os desenvolvedores, este software permite que o usuário esteja livre de implementar equações de movimento, bem como a otimização necessária à simulação preditiva, podendo focar exclusivamente no uso da ferramenta e não no seu desenvolvimento, o que garante agilidade e flexibilidade para pesquisas na área de biomecânica.

O objetivo deste trabalho foi utilizar o *OpenSim Moco* para realizar uma simulação preditiva do movimento de extensão do joelho, a fim de se estimar o torque na junta e as ativações dos músculos envolvidos. Tais grandezas são difíceis de serem determinadas analiticamente ou mesmo experimentalmente e, entretanto, são extremamente úteis para desenvolvimento de controles de interação entre humanos e robôs de reabilitação. Além disso, o próprio *OpenSim Moco* foi avaliado quanto a sua complexidade, coerência na determinar dos resultados e agilidade em promover a simulação.

2. Metodologia

Como supracitado, neste trabalho foi simulado o movimento de extensão do joelho de uma pessoa sentada utilizando-se um modelo computacional musculoesquelético. O modelo em questão é uma variação do *leg6dof9musc* fornecido pelo OpenSim, do qual apenas quatro músculos foram considerados: bíceps femoral cabeça longa (BFLH), bíceps femoral cabeça curta (BFSH), reto femoral (RF) e vasto intermédio (VI). O modelo foi escolhido a fim de se reduzir o número de variáveis do problema e assim diminuir o tempo de execução da simulação. O movimento (que deve se iniciar no repouso com ângulo de -90° e finalizar na posição 0° com velocidade zero) foi escolhido por ser simples e bem conhecido (simulações preditivas de deslocamento de corpos de um ponto ao outro produzem uma resposta padrão de posição em função do tempo que pode inclusive ser determinada analiticamente (Kelly, 2017), o que nos permite avaliar se o *OpenSim Moco* produz resultados coerentes).

A condição de otimalidade a ser satisfeita é a redução da soma dos valores absolutos das ativações musculares, expressa pela função custo da Equação 1.

¹ denis.mosconi@ifsp.edu.br, (+55) 17 98155 7706.

$$J = \frac{1}{d} \int_{t_i}^{t_f} \sum_{c \in C} w_c |u_c(t)|^\rho dt \quad (1)$$

Onde d é o deslocamento do sistema, C é o conjunto dos sinais de controle (ativações), w_c é o peso para um dado sinal c , u_c é o sinal de controle c e ρ é o expoente (2 neste caso).

As simulações foram executadas em um computador com Intel®Core™i7-10510U 2.30 GHz processor, 8.00 GB of RAM, 512 GB SSD PCIe 3.0 x2 NVMe (M.2 2280) e Windows 10 Pro 64 bits. O código da simulação utilizando *OpenSim Moco* foi escrito no MATLAB 2017.

3. Resultados

A Figura 1 apresenta o movimento executado com detalhe para as posições angulares do joelho em 0 %, 30 %, 60 % e 100 % do movimento. A Figura 2(a) apresenta a posição angular do joelho ao longo do tempo e a Figura 2(b) apresenta a velocidade envolvida. Ambas as grandezas são coerentes e o movimento foi realizado conforme esperado. Nota-se que o movimento iniciou e finalizou no repouso, conforme pré-determinado.

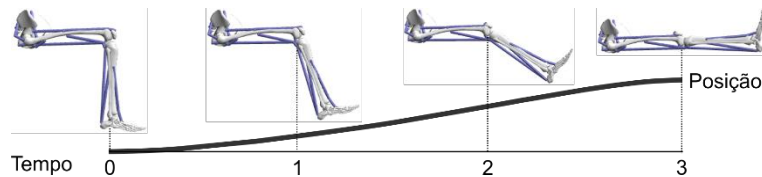


Figura 1. Movimento executado com a ilustração das posições do joelho

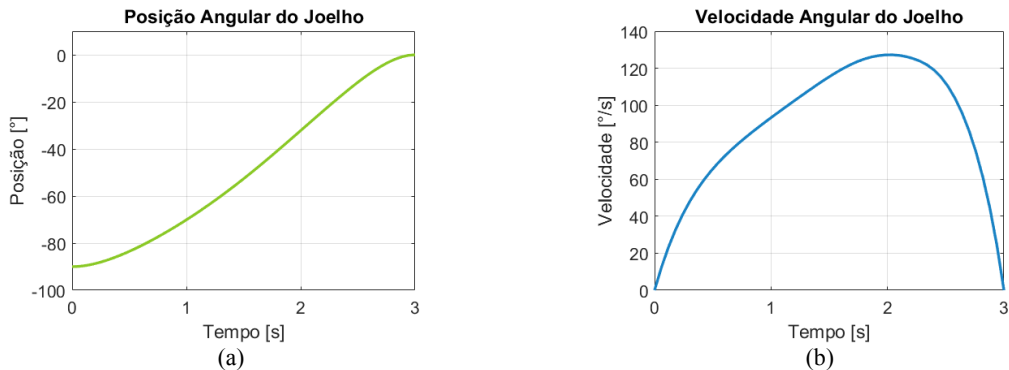


Figura 2. Posição (a) e velocidade (b) da junta do joelho

A Figura 3(a) apresenta o torque na junta, pode-se notar que o torque final não é nulo, o que é esperado, visto que para o joelho ficar estendido deve-se vencer a força da gravidade. As ativações musculares (Figura 3(b)) são coerentes, com os músculos agonistas (RF e VI) atuando para promover aceleração e os antagonistas (BFLH e BFSH) atuando como freios, controlando o movimento.

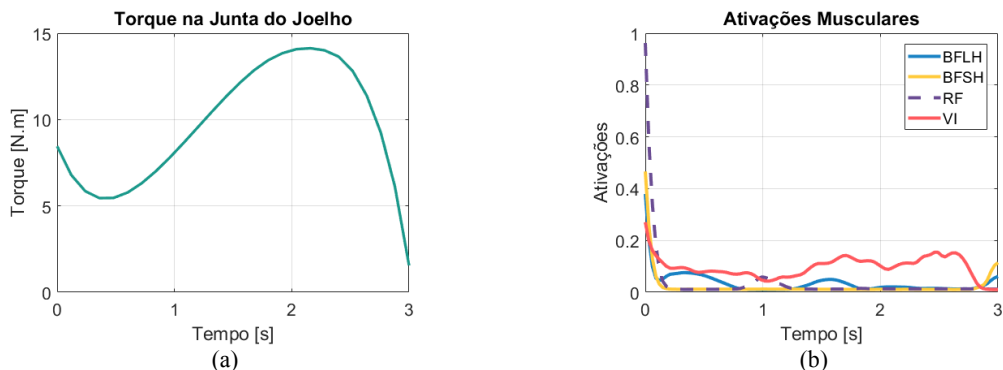


Figura 3. Torque (a) e ativações musculares (b) envolvidos no movimento

Os resultados apresentados acima são coerentes com o que se esperava, demonstrando que o *OpenSim Moco* é um recurso que pode ser utilizado pra simulações em biomecânica. A execução da simulação foi ágil, demorando apenas 2 minutos para ser executada. O preparo da simulação foi relativamente simples e ágil quando comparado à construção total de um código para simulação preditiva como no caso de Lee (2016), resultando em um código fonte com menos de 20 linhas. Entretanto, a maior limitação em relação ao *OpenSim Moco* identificada até o momento é a falta de informações disponíveis, pois apesar de haver um tutorial e uma lista de códigos e suas sintaxes², algumas regras de programação e estruturação relativa ao software ainda não estão tão claras, o que tornou a elaboração do código mais trabalhosa do que o esperado.

4. Conclusões

Este trabalho utilizou simulação preditiva para determinar o movimento de extensão do joelho e estimar as variáveis de torque e ativação dos músculos envolvidos. Os resultados obtidos são coerentes e foram determinados rapidamente. Para trabalhos futuros pretende-se executar movimentos com maior complexidade (e.g. marcha) e comparar os resultados obtidos com valores medidos experimentalmente (e.g. EMG).

5. Referências

Christopher L. Dembia, Nicholas A. Bianco, Antoine Falisse, Jennifer L. Hicks, and Scott L. Delp. OpenSim moco: Musculoskeletal optimal control. *PLOS Computational Biology*, 16(12):e1008493, dec 2020. doi: 10.1371/journal.pcbi.1008493.

Friedl De Groote, Allison L. Kinney, Anil V. Rao, and Benjamin J. Fregly. Evaluation of direct collocation optimal control problem formulations for solving the muscle redundancy problem. *Annals of Biomedical Engineering*, 44(10): 2922–2936, mar 2016. doi: 10.1007/s10439-016-1591-9.

Leng-Feng Lee and Brian R. Umberger. Generating optimal control simulations of musculoskeletal movement using OpenSim and MATLAB. *PeerJ*, 4:e1638, jan 2016. doi: 10.7717/peerj.1638.

Marko Ackermann and Antonie J. van den Bogert. Optimality principles for model-based prediction of human gait. *Journal of Biomechanics*, 43(6):1055–1060, 2010. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.12.012>.

Matthew Kelly. An introduction to trajectory optimization: How to do your own direct collocation. *SIAM Review*, 59(4): 849–904, jan 2017. doi: 10.1137/16m1062569.

² https://simtk.org/api_docs/opensim/api_docs/