



Modelamento Multicorpo do Sistema Musculoesquelético

Multibody modeling of the Musculoskeletal System

José Elias Tomazini¹
Marcelo Sampaio Martins²
Paulo José Oliveira Cortez³

1. Engenheiro Mecânico, Mestre FEG/UNESP, Doutor USP, Livre Docente FEG/UNESP, Professor Adjunto da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Guaratinguetá/SP.

2. Engenheiro Mecânico, Mestre e Doutor pela FEG/UNESP, Professor Assistente da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Guaratinguetá/SP.
marcelo.sampaio@feg.unesp.br

3. Fisioterapeuta, Mestre em Engenharia Biomédica pela FEG/UNESP, Doutorando em Engenharia Biomédica pela FEG/UNESP. paulocortez@feg.unesp.br

Trabalho desenvolvido na Universidade Estadual Paulista (UNESP) / Departamento de Mecânica

Recebido em março de 2012

Aceito em junho de 2012

Correspondência:

José Elias Tomazini
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Departamento de Mecânica.
Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333
Portal das Colinas.
Guaratinguetá-SP, Brasil.CEP: 12516-410
Telefone: (12) 31232215
E-mail: tomazini@feg.unesp.br

RESUMO

Vários sistemas podem ser tratados com formalismos multicorpos: mecanismos de máquinas em geral, robôs industriais e manipuladores, estruturas espaciais, motores e, ainda, sistemas biomecânicos. A locomoção ou marcha humana e animal podem ser estudadas através de formalismos multicorpos. Nos últimos anos, diversos trabalhos relacionados à biomecânica, e utilizando formalismos multicorpos, têm sido apresentados. Muitos estudos *in vitro* e *in vivo* têm sido realizados, objetivando descrever o potencial de sobrecarga nas articulações do corpo humano e de modelos animais. O objetivo desta revisão foi apresentar estudos envolvendo o modelamento matemático aplicado à bioengenharia, biomecânica e engenharia biomédica. Conclui-se que o modelamento matemático é uma ferramenta muito útil, barata e não invasiva que vem contribuir nos estudos envolvendo o sistema multicorpo mecânico e complexo, que é o corpo humano.

Palavras chave: Modelamentomulticorpo, corpo humano, sistema musculoesquelético.

ABSTRACT

Several systems can be treated with multibody formalisms: mechanisms of general machinery, industrial robots and manipulators, space structures, engines, and also biomechanical systems. The locomotion or human gait can be studied using multibody formalisms. Several studies related to biomechanics, and using multibody formalisms, have been presented in recent years. Many studies *in vitro* and *in vivo* have been carried out, aiming to describe the potential overload in the joints of the human body and animal models. The aim of this review was to present studies involving mathematical modeling applied to bioengineering, biomechanics and biomedical engineering. We have concluded that mathematical modeling is a useful, inexpensive and noninvasive tool which comes to contribute in studies involving the mechanical and complex multibody system which is the human body.

Key words: Multibody modeling, human body, musculoskeletal system.

INTRODUÇÃO

O homem, buscando conhecer o mundo que o cerca, sempre utiliza modelos para descrever os fenômenos ao seu redor. No caso específico da Mecânica, a partícula representa o modelo mais simples que se pode adotar para se estudar o comportamento de um corpo, como por exemplo, o estudo do movimento de um veículo trafegando em relação a um referencial. Um corpo rígido, que pode ser definido como um conjunto de partículas interligadas, onde a distância entre duas partículas quaisquer permanece constante, representa outro modelo para se estudar o comportamento de um corpo.¹ Com o desenvolvimento de métodos de análise cinemática e dinâmica mais eficientes, aliados a novas abordagens experimentais, é possível o estudo do movimento humano através da modelagem matemática.²

O sistema musculoesquelético representa um sistema mecânico complexo, formado por vários corpos interligados entre si, através de articulações também complexas e sujeito a vários esforços externos. Este sistema é conhecido como sistema multicorpo. Nas últimas décadas, vários formalismos foram apresentados para se estudar sistemas multicorpos,³⁻⁵ com grande vantagem comparada à aplicação direta das leis da mecânica aos

vários corpos que constituem o sistema. Aliados a estes formalismos, vários softwares comerciais foram construídos para se estudar tais sistemas multicorpos, como por exemplo, MADYMO[®], ADAMS[®], LIFEMODELER[®], ANYBODY[®], NEWEUL[®], AUTOLEV[®].⁶

Como exemplo de aplicações destes formalismos, pode-se citar a análise da marcha humana,⁷ determinação de esforços em articulações em sujeitos realizando corrida,⁸ salto vertical,⁹ stepping, além de outras aplicações das mais variadas.^{2,10}

Modelamentos Matemáticos e o Corpo Humano

Silva, Ambrósio e Pereira utilizaram coordenadas naturais para modelamento tridimensional do corpo humano. O modelo proposto foi aplicado a diferentes situações de movimento do corpo humano que envolvem impacto, como por exemplo, ocupantes de veículos durante uma colisão, e um atleta colidindo com outro. As aplicações mostraram que os modelos biomecânicos básicos são ainda convenientes para o uso em situações de contato do corpo humano, desde que a geometria e características das superfícies em contato sejam bem conhecidas.¹¹ A Figura 1 mostra o modelo usado no trabalho.

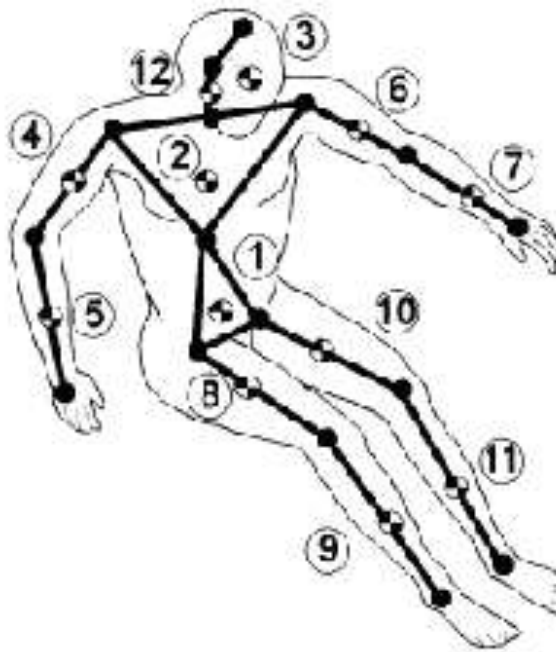


Figura 1 - Modelo biomecânico do corpo humano.¹¹

Komistek *et al.*, descrevem um modelo matemático para definição das forças reativas das articulações na extremidade inferior (quadril, joelho e perna), utilizando o método de Kane da dinâmica. O modelo utilizou dados de movimento da extremidade inferior e de plataforma de força de uma paciente saudável, durante a marcha. Encontraram que, durante uma caminhada normal, as forças reativas variaram de 1,9 a 2,6 vezes o peso do corpo na articulação do quadril, e de 1,7 a 2,3 vezes o peso do corpo na articulação do joelho, dependendo da velocidade da marcha. Os centros de massa da pelve, fêmur, tíbia e pé foram determinados, baseando-se em dados de um cadáver.⁸ Segundo os autores, o método

apresenta boa correção com dados de forças medidas *in vivo* na articulação do quadril.⁸

Silva e Ambrósio apresentam um modelo biomecânico do corpo humano, no qual consideram os diversos segmentos como corpos rígidos interconectados por articulações cinemáticas. Realizam uma análise dinâmica inversa para o estudo da marcha humana, a fim de avaliar forças de reação transmitidas entre os segmentos anatômicos adjacentes e também calcular os momentos que resultam das atividades musculares sobre cada articulação biomecânica. As coordenadas dos pontos anatômicos dos segmentos são obtidas por filmagem. As curvas de trajetória que descrevem as posições destes pontos anatômicos são obtidas por interpolação polinomial.¹²

Os procedimentos são demonstrados pela aplicação de uma caminhada a um sujeito e os resultados são discutidos com respeito aos princípios delineados nas técnicas utilizadas.¹²

Nagano *et al.*, desenvolveram um modelo tridimensional do corpo humano, cuja construção foi direcionada à utilização de um programa comercial chamado AUTOLEV®. Este programa é estritamente baseado no método de Kane. O modelo contém 16 segmentos conectados por articulações. O número de graus de liberdade adotado foi 35. Como aplicação, foi simulado um movimento de um sujeito executando um salto, com certa postura, velocidade e aceleração iniciais.⁹

Kraus, Bock e Mutschler apresentam em seu artigo uma técnica de estimativas de parâmetros dinâmicos para um modelo tridimensional completo do corpo humano, com aproximadamente 100 graus de liberdade. Desenvolveram um conjunto de programas para modelamento biomecânico baseado em coordenadas naturais. Como aplicação, é mostrado um sujeito sentado em um carro, considerando um modelo de 22 corpos para o sujeito e 6 para o banco do carro. O modelo resultante apresentou 672 variáveis dinâmicas

ou 82 graus de liberdade cinemáticos. Devido à grande quantidade de parâmetros, nem todos eram possíveis de se estimar. O artigo compara alguns parâmetros, como rigidez e amortecimento (linear e rotacional) estimados de diversas juntas, com valores da literatura.¹³

No artigo de Komistek *et al.* são mostradas técnicas que têm sido usadas para se determinar cargas in vivo no joelho humano. Duas técnicas principais usadas são: a telemetria, que representa um desenvolvimento experimental, e o modelamento matemático, baseado num desenvolvimento teórico. Recentemente, desenvolveram uma forma que depende do uso de dados in vivo de fluoroscopia, imagem de ressonância magnética, tomografia computadorizada, além de uma técnica que envolve somente duas marcas em cada segmento do corpo.⁸

O modelamento da extremidade inferior foi realizado usando o programa AUTOLEV®, já citado. Todas estas técnicas revelam uma faixa de valores de forças no joelho de 1,9 a 7,2 vezes o peso corporal, dependendo da velocidade de marcha.

A Figura 2 mostra o modelo membro inferior utilizado.

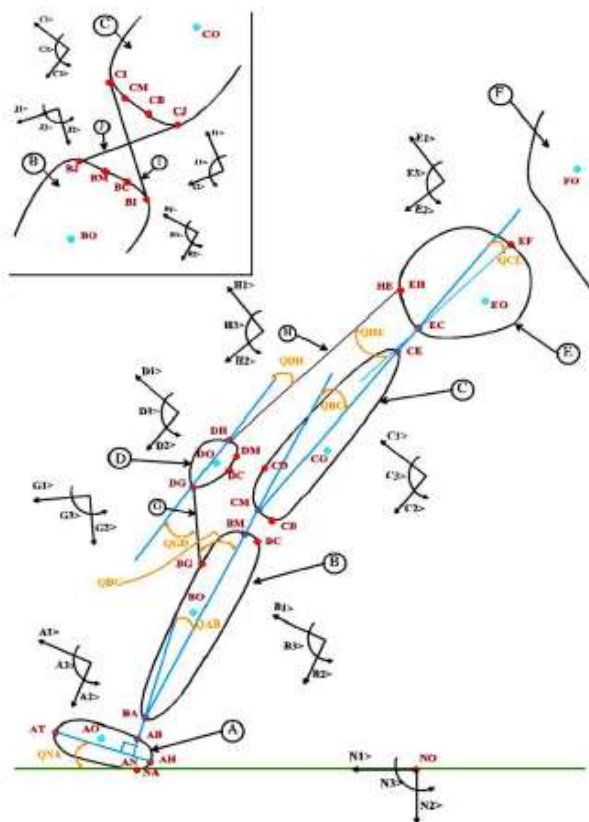


Figura 2 - Modelo do membro inferior humano (Komistek *et al.*).⁸

Schiehlen mostra o desenvolvimento das equações do movimento de um sistema multicorpo, onde aplica as equações de Newton-Euler. As equações são expressas em termos de coordenadas generalizadas, forças de inércias, forças aplicadas e ainda forças de vínculos, as quais são eliminadas através da condição de ortogonalidade dos movimentos generalizados. Assim as equações do movimento para sistemas holonômicos são expressas através de um número mínimo de equações. Schiehlen mostra

também o formalismo contendo corpos flexíveis. Mostra uma aplicação em análise de desgaste em rodas de trense também uma aplicação em biomecânica. Afirma que o formalismo multicorpo pode ser adaptado eficientemente e de forma confiável a outros problemas, além da análise dinâmica de sistemas mecânicos.¹⁰

A Figura 3 mostra o modelo do aparelho locomotor usado em uma das aplicações de Schiehlen.

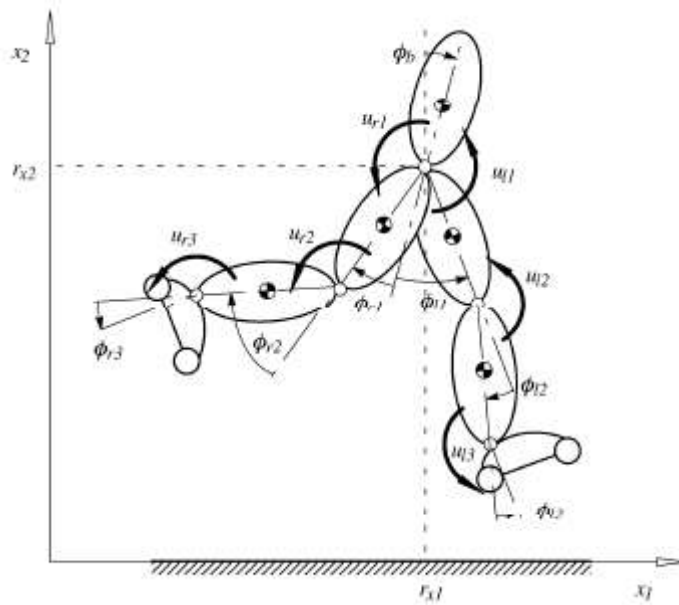


Figura 3 - Modelo do aparelho locomotor – andar ativo (Schiehlen).¹⁰

Blajer, Dziewiecki e Mazur apresentam uma metodologia de multicorpo para construção sistemática de modelos biomecânicos bidimensionais para determinação de forças musculares e forças de reação em articulações nas extremidades inferiores, durante

movimentos no plano sagital, tais como: salto vertical e salto de uma altura. A Figura 4 mostra o modelo utilizado. Apresentam, no artigo, os resultados de uma análise dinâmica inversa de um salto vertical.²

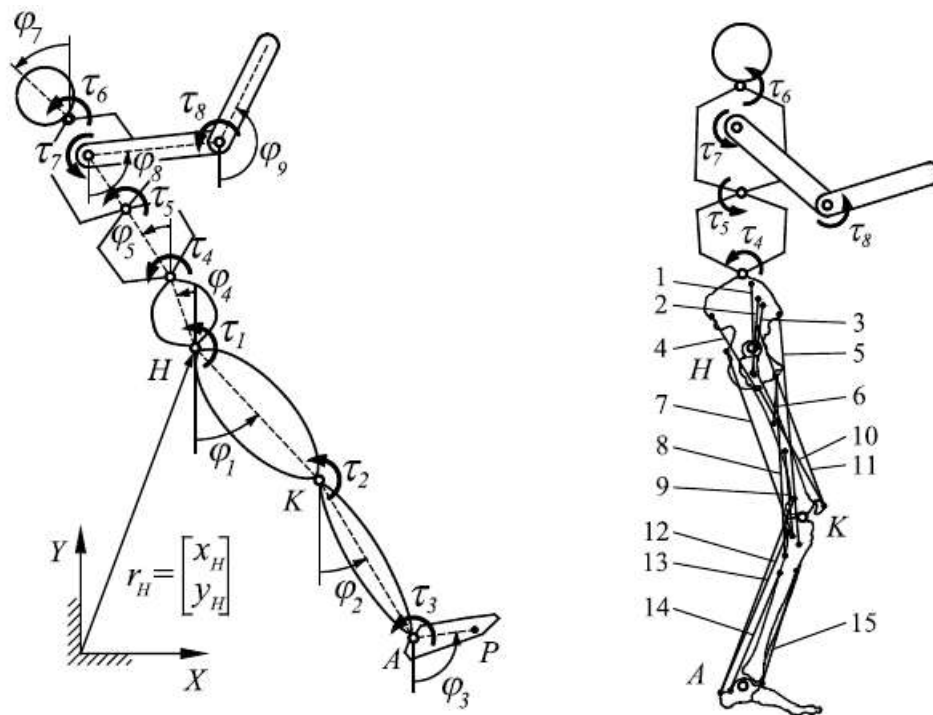


Figura 4 - Modelo biomecânico humano (Blajer, Dziewiecki e Mazur).²

Rocheffort *et al.* apresentam um modelo da coluna lombar utilizando a técnica de elementos finitos. O modelo apresenta descrição geométrica detalhada da coluna e propriedades mecânicas “reais” dos materiais envolvidos. Foram realizadas simulações de flexão e extensão, flexão lateral e torção, além do comportamento de vibração da coluna. A geometria do modelo é tridimensional e os parâmetros mecânicos foram obtidos da literatura. Cada vértebra é ligada às adjacentes por ligamentos que restringem seu movimento. Segundo os autores, os resultados correlacionaram razoavelmente com resultados experimentais.¹⁴

Abouhossein *et al.* mostram resultados de simulação de um modelo da coluna lombar usando o programa comercial ADAMS. As vértebras são consideradas rígidas, unidas por juntas com propriedades de rigidez não lineares, possibilitando seis graus de liberdade. O modelo é simulado considerando movimento nas três direções anatômicas. Apresentam resultados de simulação, mostrando a relação entre cargas e deslocamentos das vértebras.¹⁵

O Centro de Ergonomia da Universidade de Michigan desenvolveu o programa 3D SSPP (3D Static Strength Prediction Program) para análise de tarefas de manuseio de materiais. O programa prediz condições de esforços para

atividades, como levantar, puxar e empurrar cargas. O programa proporciona simulação de tarefas, que inclui dados de postura, parâmetros de forças e dados antropométricos. Os dados de saída do programa incluem forças de compressão na coluna e comparação de dados com referência do National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). A análise dos resultados é auxiliada por uma característica de geração automática da postura e ilustrações gráficas tridimensionais.¹⁶

CONCLUSÃO

A análise, interpretação e aperfeiçoamento do movimento humano vêm sendo objeto de estudos não apenas de profissionais considerados da área de saúde, mas sim da integração de Médicos, Fisioterapeutas, Físicos, Engenheiros, dentre outros. O caráter multiprofissional da engenharia biomédica ou bioengenharia permite entendimentos mais precisos sobre a complexidade do corpo humano. Conclui-se que nos últimos anos o modelamento matemático está sendo utilizado como método de investigação não invasivo, trazendo resultados satisfatórios na elucidação de questionamentos sobre a estrutura, função e interação com o ambiente do corpo humano.

REFERÊNCIAS

1. Tomazini JE. O modelo multicorpo aplicado a um manipulador: modelo rígido e flexível [tese]. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos; 1997.
2. Blajer W, Dziewiecki K, Mazur Z. Multibody modeling of human body for the inverse dynamics analysis of sagittal plane movements. *Multibody System Dynamics*. 2007;18(2):217-32.
3. Klodowski A, Rantalainen T, Mikkola A, Heinonen A, Sievänen H. Flexible multibody approach in forward dynamic simulation of locomotive strains in human skeleton with flexible lower body bones. *Multibody Syst Dyn*. 2011;25(4):395-409.
4. Dugailly PM, Sobczak S, Moiseev F, Sholukha V, Salvia P, Feipel V, et al. Musculoskeletal modeling of the suboccipital spine - kinematics analysis, muscle lengths, and muscle moment arms

- during axial rotation and flexion extension. *Spine*. 2011;36(6):E413-E22.
5. Vavilov A, Viter VI. Using some modern mathematical models of postmortem cooling of the human body for the time of death determination. *Sud Med Ekspert*. 2007;50(5):9-12.
 6. Tomazini JE. O Método de Kane aplicado a um modelo de corpo humano para obtenção da pressão intradiscal na coluna lombar [tese]. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá; 2009.
 7. Nazera RA, Rantalainen T, Heinonen A, Sievänä H, Mikkola A. Flexible multibody simulation approach in the analysis of tibial strain during walking. *J Biomech*. 2008;41(5):1036-43.
 8. Komistek RD, Kane TR, Mahfouz M, Ochoa JA, Dennis DA. Knee mechanics: a review of past and present techniques to determine in vivo loads. *J Biomech*. 2005;38(2):215-28.
 9. Nagano A, Yoshioka S, Komura T, Himeno R, Fukashiro S. A three-dimensional linked segment model of the whole human body. *Int J Sport Health Sci*. 2005; 3:311-25.
 10. Schiehlen W. Computational dynamics: theory and applications of multibody systems. *Eur J Mech A/Solids*. 2006;25(4):566-94.
 11. Silva MPT, Ambrósio JAC, Pereira MS. Biomechanical model with joint resistance for impact simulation. *Multibody Syst Dyn*. 1997;1(1):65-84.
 12. Silva MPT, Ambrósio JAC. Kinematic data consistency in the inverse dynamics analysis of biomechanical systems. *Multibody Syst Dyn*. 2002;8(2):219-39.
 13. Kraus C, Bock HG, Mutschler H. Parameter estimation for biomechanical models based on a special form of natural coordinates. *Multibody Syst Dyn*. 2005;13(1): 101-11.
 14. Rochefort E, Verver MM, Grunendahl A, MooiH G, Butenweg C. Detailed modeling of the lumbar spine for investigation of low back pain. *SAE International*. 2005;n. 05 DHM-80.
 15. Abouhossein A, Ferguson SJ, Weisse B, Piskoty G, Affolter C. A Nonlinear, Dynamic, Multi-body model of the lumbar spine. *J Biomech*. 2008;41(S1):S517.
 16. University Of Michigan – 3D Static strength prediction program [internet]. [acesso em: 2012 jun 28]. Disponível em: <http://www.engin.umich.edu/dept/ioe/3DSS PP>.

Correspondência:

José Elias Tomazini - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Departamento de Mecânica. - Avenida Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Portal das Colinas.- Guaratinguetá-SP, Brasil. CEP: 12516-410 - Telefone: (12) 31232215 - E-mail: tomazini@feg.unesp.br