

Artigo de Revisão

A importância do modelamento biomecânico

The importance of biomechanics models

Guanis de Barros Vilela Junior^{1,2,3}

1- Metrocamp, Campinas, SP

2- Unimep, Piracicaba, SP

3- UEPG, Ponta Grossa, PR

RESUMO

Introdução: a simplificação da realidade, na ciência, pode facilitar de maneira significativa a compreensão de alguns aspectos, mesmo que pontuais sobre a realidade. Em biomecânica, isso está presente em muitos dos chamados modelos biomecânicos. Esses são constructos de natureza física e/ou matemática onde a dificuldade ou impossibilidade de se pesquisar a complexidade integral de um fenômeno à luz da mecânica clássica, levam os pesquisadores na área a desenvolver tais modelos. O modelamento biomecânico é amplamente realizado para compreender a locomoção de humanos e outros mamíferos, répteis, insetos e pássaros. **Objetivo:** promover uma revisão narrativa e assim uma reflexão sobre o modelamento biomecânico, suas possibilidades e limitações. **Métodos:** optou-se pela generalidade, ou seja, o presente artigo buscou pontuar o modelamento biomecânico de maneira ampla, não se limitando portanto, à biomecânica do aparelho locomotor humano e, portanto, considerando outros tipos de animais. Foram realizadas buscas no Google Acadêmico, entre os anos 2000 e 2009, por artigos científicos em língua inglesa com os seguintes unitermos separadamente em cinco categorias, foram elas: 1) *biomechanical model of human movement (37500 artigos encontrados)*; 2) *biomechanical model of fish movement (10700 artigos)*; 3) *biomechanical model of insects movement (5600 artigos)*; 4) *biomechanical model of snake movement (3160 artigos)* e 5) *biomechanical model of bird flying (4510 artigos)*. O critério de seleção das publicações que foram lidas em sua integralidade, foi do ranqueamento dos seis artigos primeiros artigos mais citados em cada categoria. **Resultados:** O modelamento biomecânico é amplamente pesquisado em todos os tipos de animais, de humanos, cavalos, focas, baleias, galinhas, cobras e baratas, dentre outros. Todas as pesquisas citadas, provavelmente anunciam um futuro de avanços espetaculares, onde idosos não sofrerão mais quedas pois exoesqueletos os manterão de pé, onde as cadeiras de rodas serão uma triste lembrança que limitava a vida de milhões de pessoas no mundo. A adequação biomecânica e do controle neuromotor do movimento, com ajuda da nanotecnologia e da inteligência artificial, farão as pessoas fisicamente ativas na medida certa e individual, da saúde física e mental, para uma existência com melhor qualidade de vida.

Palavras-chave: modelo biomecânico; locomoção; ortopedia

ABSTRACT

Introduction: The simplification of reality in science can significantly enhance the understanding of certain, even specific aspects of reality. In biomechanics, this is often found in many so-called biomechanical models. These are constructs of a physical and/or mathematical nature where the difficulty or impossibility of investigating the integral complexity of a phenomenon in the light of classical mechanics leads researchers in the field to develop such models. Biomechanical modeling is widely conducted to understand the locomotion of humans and other mammals, reptiles, insects, and birds. **Objective:** To provide a narrative review and thus a reflection on biomechanical modeling, its possibilities, and limitations. **Methods:** We opted for generality, meaning that this article aimed to highlight biomechanical modeling broadly, not limiting itself to the biomechanics of the human locomotor system and, therefore, considering other types of animals. Searches were conducted on Google Scholar, between 2000 and 2009, for scientific articles in English using the following keywords separately in five categories: 1) biomechanical model of human movement (37,500 articles found); 2) biomechanical model of fish movement (10,700 articles); 3) biomechanical model of insect movement (5,600 articles); 4) biomechanical model of snake movement (3,160 articles); and 5) biomechanical model of bird flying (4,510 articles). The selection criterion for publications that were read in their entirety was based on the ranking of the six most cited articles in each category. **Results:** Biomechanical modeling is extensively researched in all types of animals, including humans, horses, seals, whales, chickens, snakes, and cockroaches, among others. All the cited research likely heralds a future of spectacular advancements, where the elderly will no longer suffer falls because exoskeletons will keep them upright, and where wheelchairs will be a sad memory that once limited the lives of millions of people worldwide. Biomechanical adaptation and neuromotor control of movement, aided by nanotechnology and artificial intelligence, will enable individuals to maintain the right level of physical and mental health for a life with improved quality.

Keywords: biomechanical model; locomotion; orthopedics

O que é um modelo biomecânico?

Um modelo biomecânico de natureza locomotora, à priori, busca representar de maneira menos complexa, algum sistema biológico capaz de se locomover em seu ambiente (terrestre e/ou aquático e/ou aéreo) sendo comuns animais que se locomovem nesses três ambientes, usualmente, com maior eficiência em algum desses.

A modelagem biomecânica é pensada para ser simples o suficiente para a melhor explicação possível acerca do movimento que o animal real executa, sendo evidente que aumentar em demasia a complexidade do modelo, pode ser potencialmente, física e matematicamente, um fator limitante da exequibilidade do modelo proposto. Por exemplo, um modelo que considere o corpo humano como um pêndulo rígido invertido, para explicar as posições dos membros inferiores de um humano correndo, por mais simples que seja, tem sua serventia sobre os desafios impostos ao nosso corpo para ficar nessa posição, mas provavelmente esse modelo será mais eficiente para explicar o padrão de locomoção de flamingos.

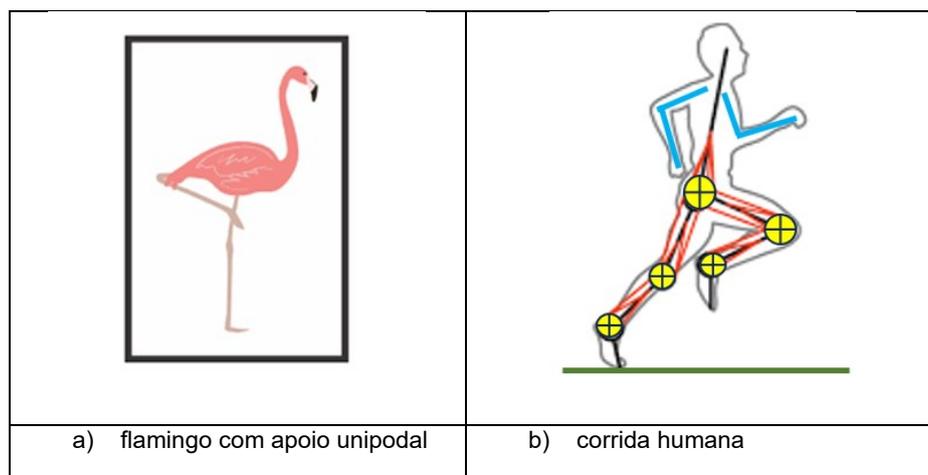


Figura 1 – Exemplos de locomoção com pêndulo invertido

Na figura 1 (a) esse modelo de pêndulo invertido é bastante satisfatório para explicar a posição no flamingo em apoio unipodal; mas em (b) o pêndulo invertido aplicado à corrida humana assume uma complexidade maior, dado que se trata de pêndulos invertidos, com apoios alternados, oscilando, alternadamente, com apoio e sem apoio, com movimentos com graus de liberdade controlados nas articulações entre segmentos (tornozelos, joelhos, quadris, coluna, ombros e cotovelos).

Nesse sentido, modelo biomecânico no presente artigo, se refere a qualquer construção, real (física, material) ou virtual (matemática e/ou computacional) que sirva para ajudar a explicar algum aspecto de interesse do pesquisador. Um modelo físico de duas barras rígidas articuladas e conectadas por um fio, pode ser suficiente para representar as forças resultantes que atuam na articulação do cotovelo em isometria, onde braço e antebraço são representados pelas barras. Simples, mas eficiente para mostrar a variabilidade das forças em isometria sob diferentes ângulos articulares.

Modelos biomecânicos mais complexos, são aqueles onde o número de variáveis aumenta, fruto, na maioria das vezes, do aumento do número de graus de liberdade que são considerados no mesmo. Nesses cenários, os cálculos envolvidos no modelo são complexos e requerem uso de algoritmos computacionais para serem realizados com eficiência.

Portanto, o objetivo do presente estudo foi realizar uma revisão narrativa e promover uma reflexão sobre a importância de modelos biomecânicos para melhor compreensão da locomoção de animais, humanos inclusos.

Métodos

O presente artigo buscou pontuar o modelamento biomecânico de maneira ampla, não se limitando portanto, à biomecânica do aparelho locomotor humano e, portanto, considerando outros tipos de animais. Foram realizadas buscas no Google Acadêmico, entre os anos 2000 e 2009, exclusivamente por artigos científicos em língua inglesa com os seguintes unitermos separadamente em cinco categorias, foram elas: 1) biomechanical model of human movement

(37500 artigos encontrados); 2) biomechanical model of fish movement (10700 artigos)); 3) biomechanical model of insects movement (5600 artigos); 4) biomechanical model of snake movement (3160 artigos) e 5) biomechanical model of bird flying (4510 artigos). O critério de seleção dos artigos que foram lidos em sua integralidade, foi do ranqueamento dos cinco artigos mais citados em cada categoria, no Google Acadêmico, totalizando 25 artigos.

Resultados e discussão

Alexander (2003) reporta que modelos biomecânicos conceituais são aqueles que não se preocupam em matematizar aquilo que estuda e nem em construí-los fisicamente. São modelos demonstrativos, onde apenas uma boa sequência de desenhos é suficiente para explicar como deve ser o posicionamento dos membros superiores e inferiores na transposição do sarrafo no salto em altura.

O autor cita o famoso exemplo do pesquisador, Margaria, ao mostrar que a locomoção humana tem muito a ver com um ovo rolando sobre uma superfície, onde o centro de massa do ovo sob e desce, transformando energia potencial em cinética, alternadamente, enquanto rola. Claro que esse exemplo, apesar de sua simplicidade, mostra conceitualmente que o sistema locomotor humano, transforma diferentes tipos energia (bioquímica, potencial elástica, potencial gravitacional etc.) em energia cinética.

O modelamento biomecânico para pesquisar a locomoção humana, também recorre a exemplos dados pelos insetos e seus exoesqueletos, Ekeberg et al (2004) construíram modelo 3D para explicar os movimentos da perna do

inseto-pau (figura 2) e suas associações com mecanismos sensoriais e neurais específicos.

Figura 2 – inseto-pau, exemplo para modelo biomecânico 3D



Os autores concluíram que a caminhada com as patas dianteiras pode ser gerada basicamente pelos mesmos mecanismos, enquanto o controle das patas traseiras requer alguma reorganização. Um belo exemplo da contribuição de modelos biomecânicos a partir de insetos que tem enorme potencial de aplicabilidade na biomecânica locomotora humana, na reabilitação, na construção de exoesqueletos que um dia serão amplamente utilizados por idosos e pessoas com limitações locomotoras.

Ijspeert (2000) construiu modelo biomecânico computacional para estudar a locomoção da salamandra em ambiente aquático e terrestre, para isso simulou a partir de fundamentos físicos o réptil um corpo articulado, acionado por músculos que atuam como molas e amortecedores, interagindo com um ambiente simples. O pesquisador concluiu que a partir de um algoritmo simples é possível replicar a locomoção da salamandra e seus mecanismos neurais subjacentes que a controla.

As cobras aquáticas foram objeto de estudos biomecânicos de Shine et al (2003), para compreender a variabilidade nos níveis de performance na

locomoção em meio aquático e terrestre que quatro tipos desses répteis apresentam.

Concluíram que por serem anfíbios, as diferentes velocidades em meio aquático e terrestre, era dependente significativamente da espécie, sexo e tamanho corporal, porém, todas as quatro espécies, altamente adaptadas às estratégias de busca por alimentos em ambos os ambientes. É bastante provável que nos próximos 30 anos, existirão modelos robóticos de répteis controlados por inteligência artificial, capazes de fazer reconhecimento e buscas em ambientes de difícil acesso a humanos ou robôs humanoides.

Hutchinson (2004) construiu modelo biomecânico para explicar como um humano, um canguru, dois lagartos, um jacaré e cinco aves são capazes de manter equilíbrio quase-estático em bipedia, a partir de sua anatomia, orientação das patas e outros parâmetros do modelo que influenciam a capacidade de corrida. Em todos os modelos, forma considerados cinco segmentos corporais articulados capazes de garantir a bipedia desses animais. A figura 3, aqui simplificada, mostra os modelos para o humano, a galinha e a iguana.

Figura 3 - bipedia de humano, galinha e iguana em equilíbrio quase-estático



Nessa pesquisa nenhum dos animais modelados tinha massas musculares extensoras atuando em qualquer articulação que fossem 7% ou mais de sua

massa corporal, o que fornece um limite razoável para a quantidade de massa muscular normalmente distribuída dentro de uma pata para atuar sobre uma articulação específica.

Os modelos desenvolvidos mostraram que o limite biomecânico para a corrida está associado à capacidade dos extensores do tornozelo em gerar momentos articulares suficientemente grandes. Pesquisas desse tipo são exemplos de como o modelamento biomecânico pode ser aplicado para determinar os limites da capacidade locomotora humana (correr, saltar, levantar, arremessar etc.) sem a utilização de tecnologias internas ou externas a seu corpo.

Fish (2000) pesquisou os fatores biomecânicos que determinaram a diferenciação evolutiva entre mamíferos semiaquáticos de superfície (focas) e os de profundidade (baleias). O autor reporta que mamíferos semiaquáticos nadam através de remadas, o que é menos eficiente em comparação com o uso de hidrofólios oscilantes presentes nos mamíferos aquáticos, os primeiros nadam na superfície da água e, portanto, estão sujeitos a força de arrasto maior, apresentam pelagem densa e impermeável que funciona como isolante térmico. Os mamíferos semiaquáticos, enquanto os mamíferos aquáticos usam uma camada de gordura. A pelagem, embora forneça isolamento e flutuabilidade positiva, demanda uma alta energia para manutenção e limita a profundidade de mergulho. A gordura contorna o corpo para reduzir o arrasto, é uma reserva de energia e não sofre perda de flutuabilidade com a profundidade.

Diferente dos semiaquáticos, os mamíferos aquáticos, nadam em grandes profundidades (até 2250 m), apresentam massa corporal muito maior (até 65 toneladas), utilizam a sustentação como força propulsiva e hidrofólios para

ganhar eficiência na locomoção e sua espessa camada de gordura é o isolante térmico utilizado.

Essas diferenças biomecânicas são cruciais para futuras pesquisas que tenham como objetivo aprimorar a capacidade humana de deslocamento em meio aquático, na superfície e em grandes profundidades, talvez com materiais nanotecnológicos capazes de serem flexíveis e suportar as enormes pressões das grandes profundidades.

Considerações finais

Foram destacados vários modelos biomecânicos para diferentes tipos de locomoção, tanto para seres humanos, como para outros mamíferos, aves, répteis e insetos.

Todos esses modelos são geradores de conhecimentos importantes, afinal, a capacidade locomotora humana é bastante ineficiente quando comparada com a de outros animais.

Por exemplo, perdemos facilmente na capacidade de correr quando comparados com outros animais, como guepardos, cavalos e cães. No meio aquático, nossa eficiência locomotora despenca se comparada a das focas, golfinhos, tubarões e baleias. No ar, a queda livre nos leva para o chão.

Foram essas limitações humanas, que nos estimularam a domesticar e cavalgar cavalos, construir rodas para chegar mais rápido, e imitando grosseiramente os pássaros, répteis e peixes, construímos aviões, navios e submarinos.

Vivemos na primeira década do século XXI a chegada, ainda incipiente, dos exoesqueletos, exemplos de estratégias que aprendemos com modelos biomecânicos inspirados nos insetos, com a promessa de idosos não caírem mais, de acabarmos de vez com as cadeiras de rodas, de voltarmos a ser mais fisicamente ativos, tudo graças ao exemplo dado pelos insetos.

Estudar modelos biomecânicos de animais (humanos e não humanos), conceituais, matemáticos, físicos ou computacionais é importante, pois as diferentes trajetórias evolutivas e adaptativas de todos eles, é potencialmente capaz de gerar insights para pesquisas em biomecânica, que no futuro possam fazer jus a máxima olímpica: *citius, fortius, altius* (mais rápido, mais forte, mais alto), tudo isso fruto da capacidade de colaboração entre pesquisadores do mundo.

Referências

ALEXANDER, R. McN. Modelling approaches in biomechanics. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, v. 358, n. 1437, p. 1429-1435, 2003.

EKEBERG, Örjan; BLÜMEL, Marcus; BÜSCHGES, Ansgar. Dynamic simulation of insect walking. Arthropod structure & development, v. 33, n. 3, p. 287-300, 2004.

IJSPEERT, Auke Jan. A 3-D biomechanical model of the salamander. In: International Conference on Virtual Worlds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000. p. 225-234.

SHINE, Richard et al. Aquatic and terrestrial locomotor speeds of amphibious sea-snakes (Serpentes, Laticaudidae). Journal of zoology, v. 259, n. 3, p. 261-268, 2003.

HUTCHINSON, John R. Biomechanical modeling and sensitivity analysis of bipedal running ability. I. Extant taxa. *Journal of Morphology*, v. 262, n. 1, p. 421-440, 2004.

FISH, Frank E. Biomechanics and energetics in aquatic and semiaquatic mammals: platypus to whale. *Physiological and Biochemical Zoology*, v. 73, n. 6, p. 683-698, 2000.

Obs.: o autor declara não existir conflito de interesse de qualquer natureza.