



ESTIMATIVA DA TRAJETÓRIA DO CENTRO DE MASSA CORPORAL UTILIZANDO REDES NEURAIS

Gustavo Luiz Monteiro de Oliveira, Universidade de Brasília, gustavomont97@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6603-8763>

Claudia Patricia Ochoa Diaz, Universidade de Brasília, claudiaochoa@unb.br, <https://orcid.org/0000-0002-4071-6244>

Resumo. O centro de massa corporal é um parâmetro bastante útil para o estudo do movimento humano. Sua trajetória reflete a interação dos diferentes segmentos corporais na hora de gerar movimento. Existem na literatura vários métodos para estimativa da trajetória do centro de massa corporal e dependendo da natureza dos dados utilizados no cálculo, é necessário um conjunto de equipamentos de alto custo e de escala laboratorial. Pensando nas limitações de custo e na complexidade da aplicação dos equipamentos, este trabalho propõe uma abordagem capaz de realizar a estimativa da trajetória do centro de massa automaticamente por meio da técnica de segmentação corporal, utilizando apenas uma câmera simples e a arquitetura baseada em redes neurais.

Palavras-chave: Centro de massa, Blaze Pose, Método de segmentação, Captura de movimento.

1. INTRODUÇÃO

O centro de massa corporal (CoM) é considerado o ponto imaginário no qual a massa corporal total pode ser considerada como concentrada. As aplicações mais comuns se dão na análise da trajetória do CoM durante a marcha, tendo o deslocamento vertical como um indicador da eficiência da marcha e o deslocamento horizontal como indicador de equilíbrio e estabilidade (GUTIERREZ-FAREWIK; BARTONEK; SARASTE, 2006, p.2).

Existem também as aplicações mais complexas, que envolvem o desenvolvimento de modelos biomecânicos ou ferramentas computacionais capazes de caracterizar a marcha de um grupo de indivíduos, sejam eles saudáveis ou até mesmo os que possuem membros inferiores amputados, através da relação entre movimentos oscilatórios do centro de massa corporal e o centro de pressão do pé, como visto no trabalho de DIAZ (2015) e JUNG *et al.* (2014).

No esporte, a importância da estimativa do CoM permite classificar o nível de desempenho do atleta e ajuda na descoberta de posições que combinam grandes áreas de apoio e o mínimo de oscilação do CoM, visto que fornecem as melhores condições para dominar o equilíbrio (MCKINON *et al.*, 2004, p.15).

Na robótica, MUSCOLO *et al.* (2011) propõe um método diferente focado na determinação de um algoritmo para encontrar a posição real do CoM de um robô humanóide bípede usando apenas 2 sensores de força localizados nos pés do robô, método que permite minimizar o erro entre o robô e seu modelo virtual, sem qualquer alteração no sistema de controle ou realização de novos tipos de controle de postura.

Muitos pesquisadores, portanto, vêm desenvolvendo métodos para estimativa do CoM baseados em dados adquiridos com equipamentos convencionais como sistemas de captura de movimento (*MoCap*) e placas de força de reação ao solo. No entanto, esses sistemas são projetados apenas para ambientes especiais como laboratórios de pesquisa ou estúdios. Adicionalmente, protocolos de marcadores são anexados ao indivíduo a ser investigado, o que pode desencadear fatores naturais que dificultam a fixação dos marcadores na pessoa.

Embora tais sistemas sejam confiáveis e precisos, a estimativa do CoM a partir de arquiteturas computacionais voltadas para a detecção e classificação de postura humana utilizando imagens e vídeos têm elevado potencial, tendo em vista o avanço de sistemas que utilizam Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina, o que permite estabelecer parâmetros de forma automática. Dessa forma, medir o CoM com recursos de hardware limitados e sem custos para o usuário representa uma alternativa promissora no estudo biomecânico deste parâmetro.

Este trabalho propõe um sistema capaz de fornecer a estimativa da trajetória do CoM utilizando apenas uma câmera convencional de baixa resolução. Esse sistema será desenvolvido com o auxílio de uma arquitetura baseada em rede neural para estimativa de pose, o *Blaze Pose* (BAZAREVSKY *et al.*, 2020). Dessa forma, é possível pensar em um sistema que tenha como entrada imagens estáticas, vídeos gravados ou em tempo real. Assim, podendo ser utilizado de maneira simples como auxílio em pesquisas sobre o movimento humano.



enebi 2022

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Arquitetura de redes neurais *Blaze Pose*

O *BlazePose* é um sistema baseado em redes neurais, que emprega aprendizado de máquina e possui uma ampla biblioteca para detecção de pose humana de alta fidelidade, inferindo 33 articulações de um corpo a partir de um único *frame*, visualizado na Fig. (1) abaixo.

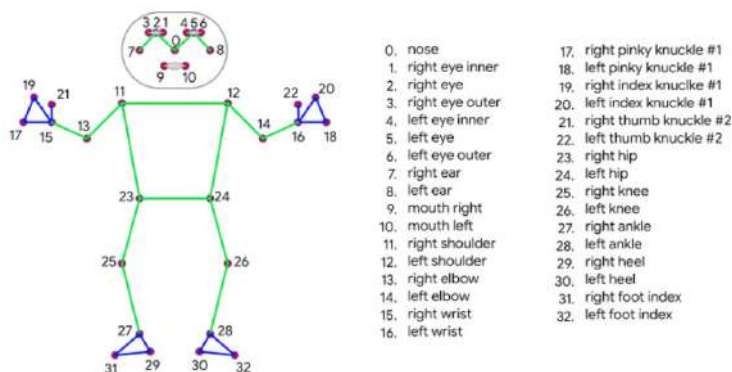


Figura 1: Topologia do *Blaze Pose*, consistindo em 33 articulações do corpo humano. Retirado de Bazarevsky *et al.* (2020).

Para a estimativa de pose, utiliza-se um arquitetura de detecção em duas etapas. Primeiramente localiza-se a região de interesse ou *Region of Interest* (ROI) dentro do *frame*. Em seguida, o detector prevê todos os 33 pontos-chave de pose dessa região de interesse. Para os casos de uso de imagens em vídeo, o detector é executado apenas no primeiro *frame* e para os *frames* seguintes, deriva-se a região de interesse dos pontos-chave da pose do *frame* anterior.

O desempenho em tempo real de todo o *pipeline*, visto na Fig.(2), do aprendizado de máquina, que consiste em modelos de detecção e rastreamento de pose, é bastante rápido, na ordem de apenas alguns milissegundos por *frame*. Para conseguir essa detecção rápida e suave, os desenvolvedores observaram que o sinal mais forte para a rede neural é o rosto da pessoa, devido às suas características de alto contraste e variações comparativamente pequenas na aparência.

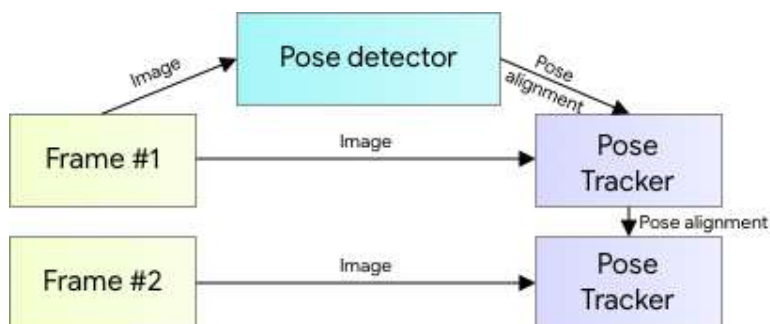


Figura 2: Visão geral do *pipeline* de estimativa de pose humana. Retirado de Bazarevsky *et al.* (2020).

2.2 Método de segmentação

Neste trabalho, utiliza-se o método de segmentação para o cálculo do CoM a partir das posições das articulações 3D detectadas pelo *Blaze Pose*. O método de segmentação considera a estrutura do corpo como sendo um conjunto de corpos rígidos, identificados por pontos de referência anatômicos. As informações necessárias para esse cálculo são retiradas de tabelas compiladas em estudos antropométricos, os quais compreendem todos os estudos relacionados à medidas físicas do corpo humano que determinam as diferenças entre indivíduos e grupos de indivíduos (WINTER, 1990, p. 86).

Estudos como os de DEMPSTER *et al.* (1967) fornecem parâmetros inerciais dos segmentos do corpo e permitem o cálculo de cada segmento. Dessa forma, a localização do CoM pode ser calculada pelo centroide do sistema multi-segmentar. Por essa razão, essa técnica também é chamada de *segmental kinematic centroid* (SKC) ou, em português, centroide cinemático segmentar.



enebi 2022

À medida que a massa corporal total aumenta, também aumenta a massa de cada segmento individual. Portanto, é possível expressar a massa de cada segmento como uma porcentagem da massa total do corpo. A localização do centro de massa corporal é também dada por uma porcentagem do comprimento do segmento desde a extremidade distal ou proximal. A massa total M de cada segmento é expressa pela equação 1 abaixo:

$$M = \sum_{i=1}^n m_i \quad (1)$$

em que m_i é a massa da i -ésima seção do segmento.

O centro de massa é tal que deve criar o mesmo momento de força em volta de qualquer ponto ao longo do eixo do segmento assim como a massa distribuída original. Considerando o centro de massa localizado a uma distância x da extremidade esquerda do segmento, tem-se:

$$Mx = \sum_{i=1}^n m_i x_i \quad (2)$$

$$x = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i x_i \quad (3)$$

Sendo assim, pode-se representar a massa distribuída por uma única massa M localizada a uma distância x de uma extremidade do segmento.

Com cada segmento corporal em movimento, o centro de massa de todo o corpo muda continuamente com o tempo. É, portanto, necessário recalculá-lo após cada intervalo de tempo e isto requer amplo conhecimento das trajetórias do centro de massa de cada segmento do corpo em questão.

O cálculo do centro de massa corporal é considerado por (WINTER, 1990, p. 86) um caso especial das equações 2 e 3. Para um sistema de corpo de n segmentos, o centro de massa nas direções x e y são:

$$x = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_n x_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (4)$$

$$y = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2 + \dots + m_n y_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (5)$$

em que $m_1 + m_2 + \dots + m_n = M$ corresponde à massa total do corpo. Sabendo que a massa de cada um dos segmentos é uma porcentagem da massa total M , tem-se que os valores de $m_1 = p_1 M$, $m_2 = p_2 M$ e assim por diante.

$$x = \frac{p_1 M x_1 + p_2 M x_2 + \dots + p_n M x_n}{M} = p_1 x_1 + p_2 x_2 + \dots + p_n x_n \quad (6)$$

$$y = \frac{p_1 M y_1 + p_2 M y_2 + \dots + p_n M y_n}{M} = p_1 y_1 + p_2 y_2 + \dots + p_n y_n \quad (7)$$

Esta equação é mais fácil de usar porque o único requisito é o conhecimento da porcentagem da massa dos segmentos em relação à massa corporal total, representada na equação por p_n , e também presentes na Tab.(1) e as coordenadas do centro de massa de cada segmento.

3. RESULTADOS

3.1 Inferências das articulações

O cálculo do CoM pelo método por segmentação foi implementado usando linguagem de programação *Python*. Dois principais recursos utilizados foram as bibliotecas *OpenCV* e *mediapipe*, a primeira usada para a etapa de visão computacional e a última, para a estimativa de pose.

Como dados de entrada, foi realizado com vídeo simples de um indivíduo realizando algumas atividades de treino físico, envolvendo a movimentação de membros superiores e inferiores do seu corpo, como pode ser visto na Fig.(3).

O algoritmo foi capaz de definir e mostrar as articulações de interesse, representadas pelas bolinhas de cor vermelha, e esse conjunto de articulações compõem a estimativa completa da pose.

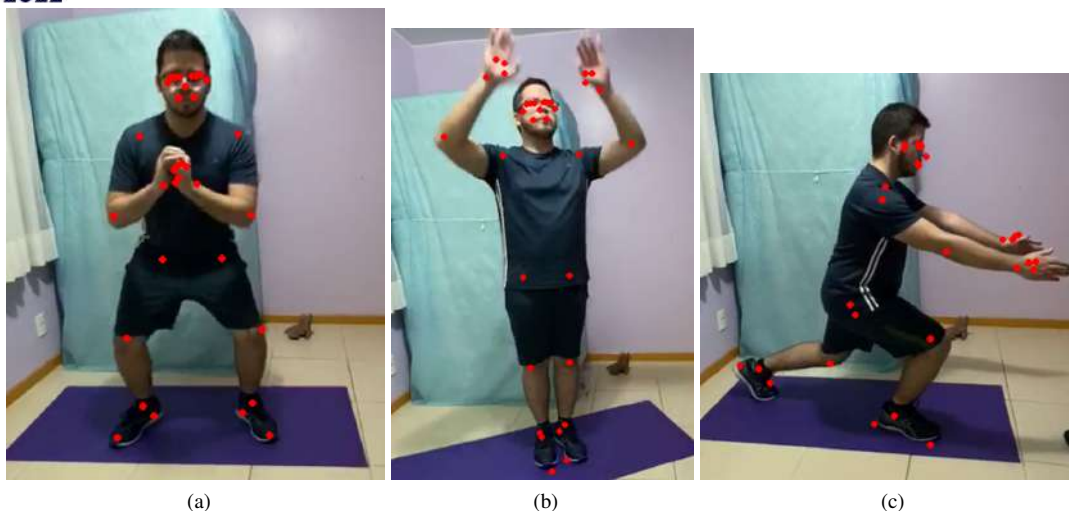


Figura 3: Articulações de interesse inferidas para 3 posições distintas. Autoria própria (2021).

3.2 Segmentação da estrutura do indivíduo

Após a inferência das articulações na pessoa, iniciou-se a etapa de interligação entre cada uma das articulações, que retornou a estrutura completa do corpo do indivíduo em questão, formado por diferentes segmentos, representadas por linhas retas de cor verde que conectam uma articulação à outra, como visto na Fig. (4).

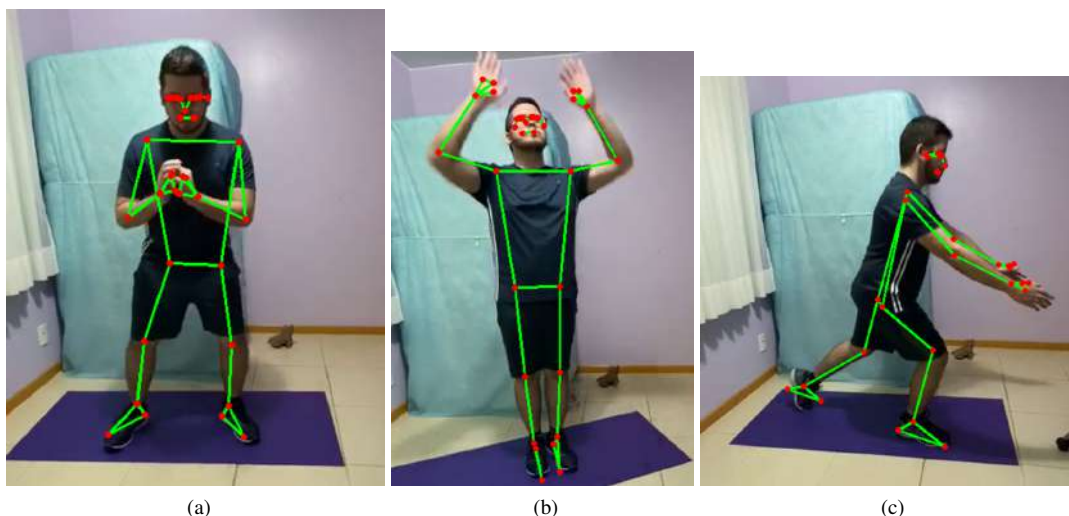


Figura 4: Articulações de interesse conectadas entre si para três posições distintas. Autoria própria (2021).

3.3 Enumeração das articulações

Após a etapa de segmentação, as coordenadas de cada articulação foram enumeradas de 0 a 32, totalizando as 33 articulações do modelo utilizado pelo *Blaze Pose*. Dessa forma, basta realizar uma análise em paralelo entre esta topologia e a imagem de saída com as articulações em destaque para saber a quais membros corporais se referem àquelas coordenadas.

3.4 Cálculo do centro de massa dos segmentos corporais

Após a obtenção das coordenadas das articulações, foi desenvolvido o algoritmo para extrair o CoM dos segmentos corporais necessários para o cálculo do CoM total. Para esta etapa, foi realizado uma análise entre o modelo de corpo do *Blaze Pose*, visto na Fig.(1). A Tabela (1) de dados antropométricos dos segmentos corporais mostra apenas os dados dos segmentos que estão presentes no modelo da rede neural, o que corresponde a 79% dos segmentos corporais presentes na tabela original de (WINTER, 1990, p. 86). Na segunda coluna da tabela, existe a definição de cada segmento, ou seja, a



enebi 2022

exata localização das articulações que abrangem aquele segmento.

Tabela 1: Dados antropométricos utilizados para o cálculo do centro de massa. Adaptado de WINTER (1990).

Segment	Definition	Segment Weight/Total Body Weight	CoM/Segment Length
Hands	Wrist Axis/knuckle 2 middle finger	0.006M	0.506
Forearm	Elbow axis/ulnar styloid	0.016M	0.430
Upper arm	Glenohumeral axis/elbow axis	0.028	0.436
Foot	Lateral malleolus/head metatarsal 2	0.0145M	0.50
Leg	Femoral condyles/medial malleolus	0.0465M	0.433
Thigh	Greater trochanter/femoral condyles	0.100M	0.433
Trunk	Greater trochanter/glenohumeral joint	0.497M	0.50

Seguindo a tabela de dados antropométricos, as posições relativas do CoM para cada segmento são dadas como uma porcentagem de seu comprimento a partir da extremidade mais próxima ao CoM, também conhecida como extremidade proximal. Sendo assim, as posições das articulações detectadas foram usadas para calcular o comprimento de cada segmento e, em seguida, multiplicá-los pelas suas determinadas posições relativas para alcançar o valor estimado do CoM do segmento e plotá-lo na imagem de saída.

Os CoM de cada segmento do corpo em três poses distintas pode ser visto na Fig. (5), representados pelas bolinhas de cor azul. Portanto, é possível constatar que a localização anatômica dos CoM dos segmentos nas imagens é consistente com os dados das posições relativas tomados como referência da Tab.(1), em relação às extremidades proximais de cada segmento.

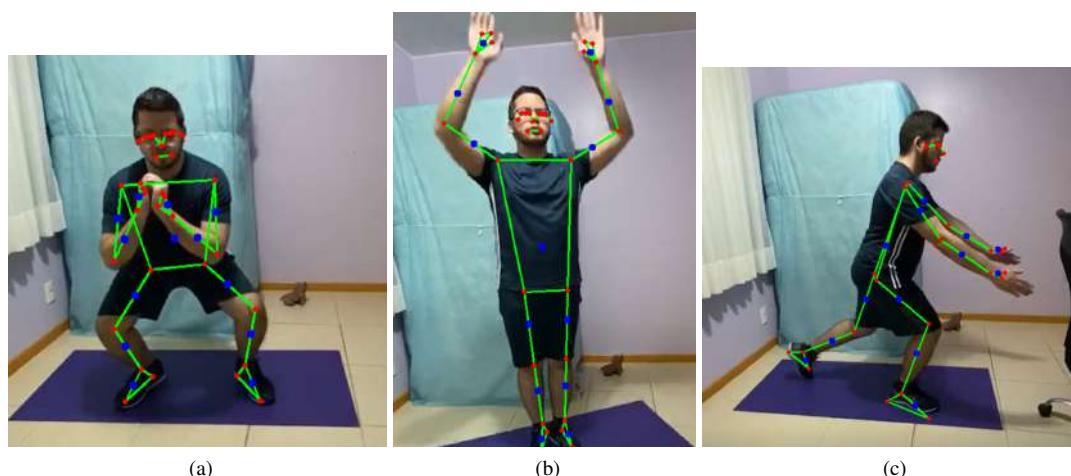


Figura 5: Centro de massa dos segmentos corporais estimados para três posições distintas. Autoria própria (2021).

3.5 Cálculo do centro de massa corporal

Por inspeção visual é possível constatar que a posição estimada do CoM, visto na Fig. (6), representada pela bolinha de cor amarela, é coerente com o que já é estabelecido na literatura: a posição deste parâmetro pode ser localizada aproximadamente na segunda vértebra sacral.

4. CONCLUSÕES

Os resultados preliminares deste trabalho mostraram que a ferramenta baseada em redes neurais *Blaze Pose*, apesar de nova e ainda em processo de aperfeiçoamento pelos desenvolvedores, é capaz de oferecer uma boa estimativa de pose corporal e cujos dados de posição podem ser utilizados para a estimativa de parâmetros biomecânicos como o centro de massa. Especificamente, os primeiros resultados experimentais ilustraram, ainda que apenas visualmente, que a posição 2D estimada do CoM é coerente com o esperado.

Por se tratar de um estudo instigante e em desenvolvimento, os próximos passos neste trabalho estão relacionados com a estimação da trajetória do CoM e de outras variáveis dinâmicas como velocidade do CoM a partir de vídeos de sujeitos executando uma série de movimentos simples. Também será feita uma comparação entre a estimativa do CoM calculada

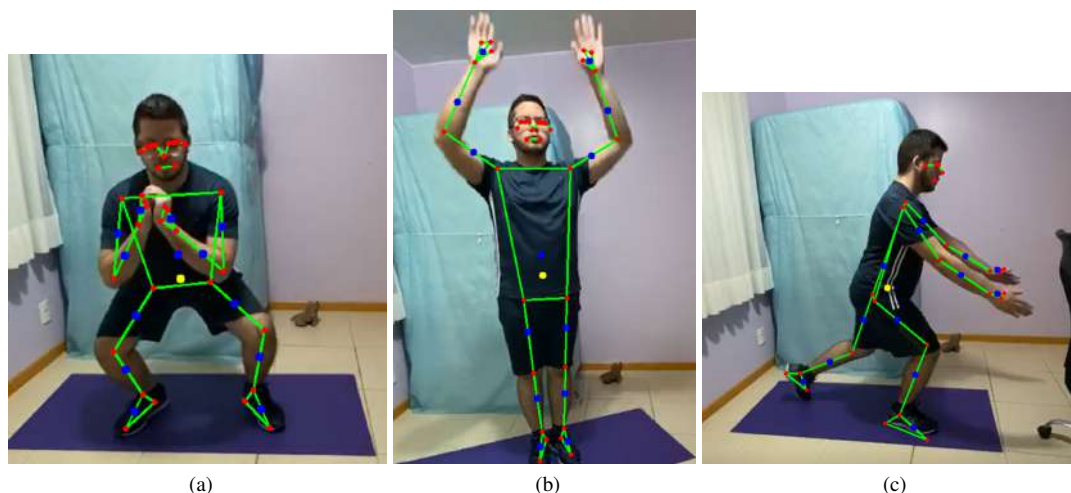


Figura 6: Centro de massa do corpo todo estimado para três posições distintas. Autoria própria (2021).

com o método proposto e aquela obtida a partir de sistemas de captura de movimento mais sofisticados considerados o padrão ouro para este tipo de medição.

5. REFERÊNCIAS

- BAZAREVSKY, V. ET AL. **Blaze-face**: Sub-millisecond neural face detection on mobile gpus. CVPR Workshop, Long Beach, CA, USA, 2019. Disponível em: <<http://www.https://arxiv.org/abs/2006.10204>>. Acesso em: 20 fev. 2022. doi:arxiv-1907.05047.
- BAZAREVSKY, V. ET AL. **BlazePose**: On-device real-time body pose tracking. CVPR Workshop, Seattle, WA, USA, 2020. Disponível em: <<http://https://arxiv.org/abs/2006.10204>>. Acesso em: 20 fev. 2022. doi:arxiv-2006.10204.
- DEMPSTER, W.T.; GAUGHRAN, G.R.L. **Properties of body segments based on size and weight**. American Journal of Anatomy, 1967. Disponível em: <<http://www.https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aja.1001200104>>. Acesso em: 20 fev. 2022. doi:10.1002/AJA.1001200104.
- DIAZ, C.P.O. **Characterization of amputee gait using a biomechanical approach**. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- GUTIERREZ-FAREWIK, E.M.; BARTONEK, A.; SARASTE, H. **Comparison and evaluation of two common methods to measure center of mass displacement in three dimensions during gait**. Human Movement Science, 2006; Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167945705001004>>. Acesso em: 02 mar. 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.humov.2005.11.001>
- JUNG, C. K.; PARK, S. **Compliant bipedal model with the center of pressure excursion.**, 2014. Disponível em: <<http://www.pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24161797/>>. Acesso em: 20 fev. 2022. doi:10.1016.
- MCKINON, W. ET AL. **The agreement between reaction-board measurements and kinematic estimation of adult male human whole body centre of mass location during running**. American Journal of Anatomy, 2004. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15712714/>. Acesso em: 20 fev. 2022. doi:10.1088/0967-3334/25/6/001.
- MUSCOLO, G. ET AL. **A method for the calculation of the effective CoM of humanoid robots**. IEEE. 2011. Disponível em: <<http://https://ieeexplore.ieee.org/document/6100864>>. Acesso em: 20 fev. 2022. doi:10.1109.
- WINTER, D. **Biomechanics and motor control of human movement**. v.28, p.82-104. 1990.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.