

SISTEMA DE EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS CINÉTICOS E CINEMÁTICOS DO CORPO HUMANO PARA ANÁLISE DA MARCHA

ALANA DE MELO E SOUZA*, MARCELO RICARDO STEMMER*

*Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Automação e Sistemas
Florianópolis, 88.040-900, SC, Brasil

Emails: alana.melo@posgrad.ufsc.br, marcelo.stemmer@ufsc.br

Abstract— The analysis of human gait is leading to other applications, such as biometrics. Biometric identifiers have properties that technology can measure and analyze the characteristics of the human body, used as a form of identification and access control for security. This work has as purpose to develop an image processing system that is able to extract patterns of movement for gait analysis. The methodology is based on three-dimensional analysis made by Microsoft's Kinect camera, where it is possible to identify the human skeleton and automatically extract the kinematic and kinetic parameters, such as the angles of the joints, and the position coordinates to determine the variables of velocity, acceleration and force of the movement as a function of time. The software model was developed, using the Visual Studio platform in C# language that gets each intervening variable of the march through the behavior chart. The results obtained by volunteers showed consistency as to the approximate values of variables resulting from each individual and revealed the feasibility for the process of extracting the parameters of the human gait.

Keywords— Gait analysis, Kinect, Biometrics, Skeleton, Image, Gait parameters.

Resumo— A análise da marcha humana está se direcionando para outras aplicações, como a biometria. Os identificadores biométricos possuem propriedades que tecnologicamente podem medir e analisar as características do corpo humano, utilizados como forma de identificação e controle de acesso para segurança. Este trabalho possui como finalidade desenvolver um sistema de processamento de imagens que seja capaz de extrair padrões do movimento para a análise da marcha. A metodologia se baseia na análise tridimensional feita pela câmera Kinect da Microsoft, onde é possível identificar o esqueleto humano e extrair automaticamente os parâmetros cinemáticos e cinéticos, tais como os ângulos das articulações, e pelas coordenadas da posição determinar as variáveis de velocidade, aceleração e força do movimento em função do tempo. Desenvolveu-se um modelo de software, utilizando a plataforma Visual Studio em linguagem C# que obtém cada variável interveniente da marcha através do comportamento gráfico. Os resultados obtidos através de voluntários mostraram coerência quanto aos valores aproximados das variáveis resultantes de cada indivíduo e revelaram a viabilidade para o processo de extração dos parâmetros da marcha humana.

Palavras-chave— Análise de Marcha, Kinect, Biometria, Esqueleto, Imagem, Parâmetros da marcha.

1 Introdução

A marcha é um modo das pessoas andarem e é considerada como novo método biométrico de identificar os seres humanos. O fato de sua métrica ser obtida à distância, promove sua diferença com relação aos outros métodos biométricos. Seu estudo baseado em seqüências de vídeos tridimensionais aumentou relativamente devido às necessidades de interpretar os movimentos cinemáticos, tendo em vista facilitar a identificação de problemas físicos voltados à saúde e a biomecânica, ou também aplicados à área de segurança e tecnologia (Zerpa et al., 2015).

Um sistema promissor para a extração dos parâmetros da marcha é o sensor Kinect da Microsoft, uma câmera RGB lançada em 2011 juntamente com um pacote de desenvolvimento, *SDK-Software Development Kit*, que permite aos desenvolvedores criarem aplicações em linguagem de programação C# utilizando o *software Microsoft Visual Studio* (Geerse et al., 2015).

O sistema desta tecnologia é promissor, pois sua câmera consegue capturar os três componentes básicos da cor. Ligado a um sensor de profun-

didade, com um projetor de infravermelhos e combinado com CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) monocromático, ele gera imagens em um espaço 3D (três dimensões) e grava em condições bastante variáveis e até desfavoráveis de iluminação. Permitindo a identificação dos pontos de marcação no corpo, assim elimina a utilização de marcadores e procedimentos de calibração (Zerpa et al., 2015).

Uma etapa inicial do presente trabalho consiste em extrair os parâmetros da marcha humana para estudos direcionados à sua análise, a fim de reconhecer indivíduos no campo biométrico. Complementarmente, propõe-se o desenvolvimento de um software que consiga gerar valores por comportamento gráfico das variáveis, sejam elas definidas pelos ângulos das articulações, e pelas coordenadas da posição determinaremos a velocidade, aceleração e força do movimento em função do tempo.

Nas próximas seções será apresentada a metodologia aplicada nos testes, uma análise da validação dos valores das variáveis e seus respectivos resultados, seguido do debate sobre as perspectivas positivas e as insuficiências que resultaram na performance obtida no sistema desenvolvido.

2 Parâmetros da marcha

A análise deste movimento decorre da medição de características biomecânicas que estão associadas a várias tarefas (Best and Begg, 2006). O movimento é descrito quando é ligado ao sistema de coordenadas relativas à variação da posição e orientação durante uma caminhada. Os segmentos corporais devem trabalhar juntos com este sistema, uma vez que a orientação deve estar ligada aos eixos anatômicos do corpo, com propósito de chegar nos resultados desejados (Araújo et al., 2005). O sensor Kinect fornece as coordenadas espaciais distribuídas em 20 pontos específicos no corpo humano, formando um modelo tridimensional do esqueleto (Cuji et al., 2013).

2.1 Cinemática linear

A análise cinemática linear envolve o estudo do movimento em linha reta para determinar se o objeto está se movendo, qual a altura que atinge ou a que distância se desloca. As equações (1), (2) e (3) são utilizadas para calcular a velocidade instantânea, pois há necessidade de calculá-la em um instante específico, para melhor análise biomecânica (Hamill and Knutzen, 2012).

Por diferenciação numérica é possível descrever os meios para calcular a derivada da função (Demailly, 2012):

$$V_x = \frac{dx}{dt} = \frac{x_{(t+1)} - x_{(t-1)}}{\Delta t} \quad (1)$$

$$V_y = \frac{dy}{dt} = \frac{y_{(t+1)} - y_{(t-1)}}{\Delta t} \quad (2)$$

$$V_z = \frac{dz}{dt} = \frac{z_{(t+1)} - z_{(t-1)}}{\Delta t} \quad (3)$$

Pelo cálculo da magnitude vetorial é determinado pela equação (4) a velocidade total do movimento:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (4)$$

Segundo Hamill and Knutzen (2012), a aceleração consiste na variação da velocidade em função do tempo, assim foi aplicado o mesmo com a aceleração instantânea, calculada conforme as equações (5), (6) e (7).

Para o cálculo das derivadas de 2ª ordem é considerado as expansões por série de Taylor (Demailly, 2012):

$$A_x = \frac{dV_x}{dt} = \frac{x_{(t+1)} - 2x_{(t)} + x_{(t-1)}}{(\Delta t)^2} \quad (5)$$

$$A_y = \frac{dV_y}{dt} = \frac{y_{(t+1)} - 2y_{(t)} + y_{(t-1)}}{(\Delta t)^2} \quad (6)$$

$$A_z = \frac{dV_z}{dt} = \frac{z_{(t+1)} - 2z_{(t)} + z_{(t-1)}}{(\Delta t)^2} \quad (7)$$

Pela equação (8) calcula-se a aceleração total utilizando a magnitude vetorial:

$$A = \sqrt{Ax^2 + Ay^2 + Az^2} \quad (8)$$

2.2 Cinemática angular

Para determinar a posição da articulação, é preciso definir o ângulo de cada articulação. O sensor Kinect possui um algoritmo capaz de efetuar a conversão das medidas por pixels em unidades vetoriais, as coordenadas x, y e z, no que possibilita o cálculo dos ângulos das articulações (Cuji et al., 2013).

Na biomecânica calcula-se os ângulos de duas maneiras, o primeiro é chamado ângulo relativo, na qual é medido em relação a uma referência móvel e define o ângulo incluído entre o eixo longitudinal de dois segmentos (Hamill and Knutzen, 2012).

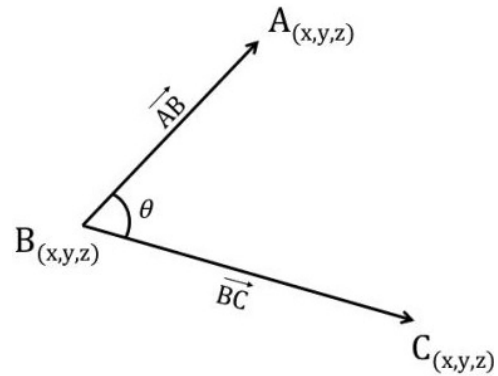


Figura 1: Demonstração dos segmentos.

O ângulo relativo dos segmentos produzidos será obtido pelas coordenadas tridimensionais de cada ponto anatômico (Sulino, 2014). As equações (9) e (10) determinam os vetores referentes aos dois segmentos, retratados na Figura 1:

$$\vec{AB} = \begin{pmatrix} Ax \\ Ay \\ Az \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Bx \\ By \\ Bz \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\vec{CB} = \begin{pmatrix} Cx \\ Cy \\ Cz \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Bx \\ By \\ Bz \end{pmatrix} \quad (10)$$

A magnitude dos vetores de acordo com as equações (11) e (12) define o seu comprimento em três dimensões. O mesmo é calculado utilizando uma variação do teorema de Pitágoras, devido a formação de triângulos quando o vetor é dividido em componentes. Estas representam as diferentes forças atuando sobre um objeto e o valor total destas forças, a magnitude (Lengyel, 2005).

$$\|\vec{AB}\| = \sqrt{ABx^2 + ABy^2 + ABz^2} \quad (11)$$

$$\|\vec{CB}\| = \sqrt{CBx^2 + CBy^2 + CBz^2} \quad (12)$$

É obtido o produto escalar pela equação (13), a fim de calcular o ângulo θ :

$$\vec{AB} \odot \vec{CB} = \begin{pmatrix} ABx \\ AB_y \\ AB_z \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} Cx \\ Cy \\ Cz \end{pmatrix} \quad (13)$$

E finalmente foi calculado o ângulo θ pela função (14) e (15) do cosseno e arco-cosseno, onde θ é o ângulo relativo resultante dos segmentos:

$$\cos \theta = \frac{\vec{AB} \odot \vec{CB}}{|\vec{AB}| \times |\vec{CB}|} \quad (14)$$

$$\theta = \left(\cos \theta \times \frac{180}{\pi} \right) \quad (15)$$

De acordo com Hamill and Knutzen (2012) o segundo é o ângulo absoluto, um ângulo de inclinação do segmento do corpo medido em relação a uma referência fixa e descreve a orientação do segmento no espaço. Este foi calculado utilizando a relação trigonométrica da tangente, onde ela é definida com base nos lados de um triângulo retângulo. A equação (16) demonstra como efetuar o cálculo:

$$\begin{aligned} \tan \theta &= \frac{y_{proximal} - y_{distal}}{x_{proximal} - x_{distal}} \\ \tan \theta_{perna} &= \frac{y_{joelho} - y_{tornozelo}}{x_{joelho} - x_{tornozelo}} \end{aligned} \quad (16)$$

2.3 Cinética linear

A cinética linear é a área de estudo que examina as forças que atuam em um sistema como o corpo humano, definindo as forças causadoras do movimento. O diagrama de corpo livre é um instrumento extremamente útil nos estudos biomecânicos (Hamill and Knutzen, 2012). A Figura 2 exibe o desenho do sistema, a identificação das forças atuantes definem o problema e determinam como a análise deve processar.

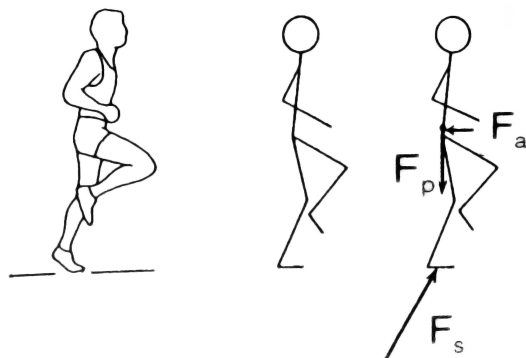


Figura 2: Diagrama de corpo livre, define o sistema pela F_a = Força de atrito, F_p = Força peso e F_s = Força de reação do solo.

A equação (17) determina o vetor peso que é direcionado para o centro da Terra, e se origina de um ponto chamado centro de gravidade.

Este ponto representa o equilíbrio entre todos os segmentos corporais, isto indica que a massa do sistema está em equilíbrio em torno deste ponto (Hamill and Knutzen, 2012). Assim temos que definir o cálculo estimativo da massa e a localização do centro de gravidade de cada um para encontrar a localização vetorial do centro de gravidade total. Os segmentos definidos para o cálculo são determinados pelo número de articulações em que ocorre o deslocamento angular durante o movimento. A partir de estudos feitos por Chandler et al. (1975) em cadáveres, temos dados mais concretos disponíveis para calcular as equações regressivas. Se somar o momento de força de cada segmento em função das coordenadas x, y e z pela equação (18), é possível determinar a localização do centro de gravidade do corpo humano, o mesmo cálculo é feito para os outros vetores (Enoka, 2000).

$$F_P = m \cdot g \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \sum M_x &= F_{P,S} \times X \\ CG_x &= \frac{\sum M_x}{F_P} \end{aligned} \quad (18)$$

A FRS (Força de Reação do Solo) foi calculada por um método utilizado por Bobbert et al. (1991), no qual os valores cinemáticos são derivados das acelerações dos centros de massa de cada um dos segmentos, onde a FRS retrata as acelerações deles individualmente, devido ao seu movimento. A FRS é o somatório das forças verticais de todos os segmentos do corpo, em função da gravidade. A equação (19) determina esta força:

$$FRS = \sum m_S(a - g) \quad (19)$$

Segundo Hamill and Knutzen (2012) a resultante da força de atrito é possível determinar pela equação (20), os componentes de cisalhamento F_x e F_y , respectivamente são as forças de atrito nas direções anteroposterior e mediolateral. O componente F_z é utilizado como a Força Normal (N), assim estima-se o coeficiente de atrito dinâmico pela equação (21):

$$F_a = \mu \cdot N \quad (20)$$

$$\mu = \frac{F_y}{F_z} \quad (21)$$

3 Procedimentos e análises da extração automática

O método teórico da análise cinética e cinemática do movimento, pode ser implementado computacionalmente por um aplicativo WPF (*Windows Presentation Foundation*) mostrado na Figura 3, um modelo de programação unificado pela

plataforma *Microsoft Visual Studio 2015*, na linguagem C#, que permite simular, visualizar o esqueleto humano e o movimento, e analisar os dados obtidos graficamente pelos cálculos citados. Para aquisição de imagens foi utilizado a câmera Kinect, a qual foi posicionada paralelamente ao indivíduo analisado nos planos sagital, frontal e transversal, seguindo as especificações técnicas que variam de 1.8m à 2.4m de distância (Cuji et al., 2013).

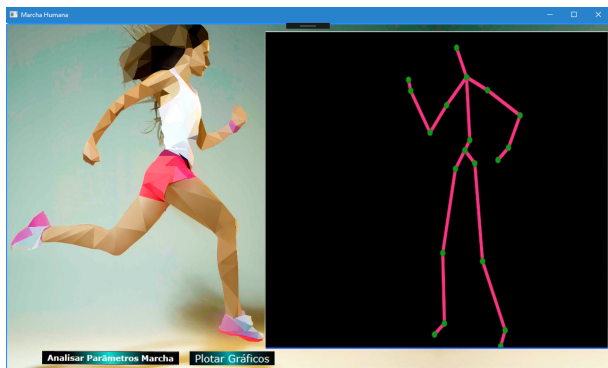


Figura 3: Aplicativo WPF.

Os valores alcançados foram gerados pelo software desenvolvido, comparados e julgados a partir de resultados presentes nos estudos da biomecânica apontados por Hamill and Knutzen (2012). Foi executado os testes em cada voluntário para avaliar a correlação entre os valores obtidos e validar os resultados.

No sistema 3D, para obter uma identificação precisa é necessário possuir como referência os eixos x, y e z. O conceito de profundidade pelo eixo z, medial e lateral, deve ser acrescentado aos outros vetores bidimensionais da altura pelo eixo y, para cima e para baixo, e largura pelo eixo x, para frente e para trás. A intersecção dos eixos é definida pelo ponto (0,0,0), no eixo x os movimentos são horizontais e para a direita, no eixo y são verticais e para cima e no eixo z são horizontais e para frente, assim todas as coordenadas no primeiro quadrante são positivas. Os movimentos negativos são para a esquerda em x, para baixo em y e para traz em z (Hamill and Knutzen, 2012).

Após o contato com o solo, a reação à carga agrega ao peso do corpo, assim a cinemática é descrita pelos movimentos angulares inferiores do corpo. As Figuras 4, 5 e 6 apresentam os resultados do voluntário 1 em função dos movimentos de flexão no quadril, joelho e dorsiflexão do tornozelo respectivamente. Estes movimentos dão continuidade até o final da fase de apoio onde o corpo continua sobre o pé, logo após inicia o movimento de extensão do quadril, joelho e flexão planar do tornozelo.

Por método de comparação, é possível analisar os resultados do voluntário 2 pelas Figuras

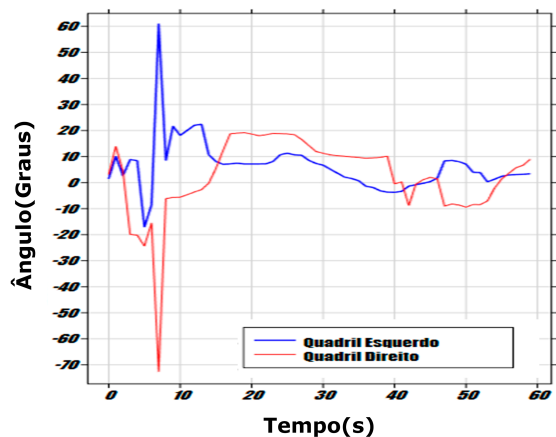


Figura 4: Movimento de flexão e extensão do quadril - Voluntário 1.

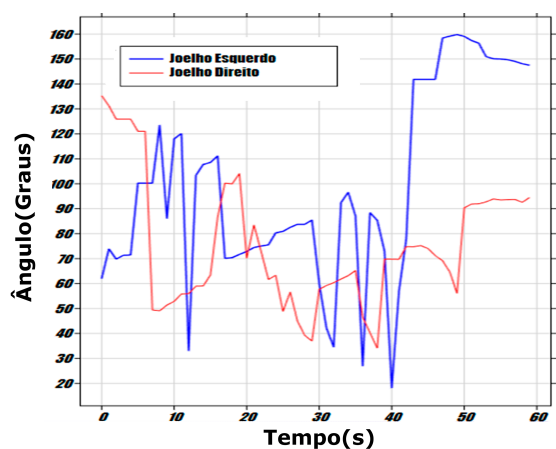


Figura 5: Movimento de flexão e extensão do joelho - Voluntário 1.

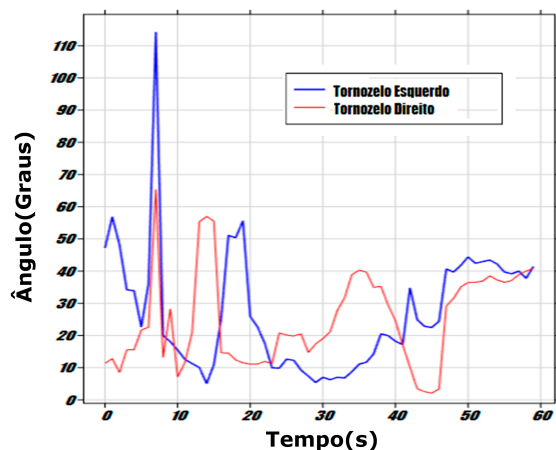


Figura 6: Movimento de dorsiflexão e flexão plantar do tornozelo - Voluntário 1.

7 e 8. Elas exibem os valores angulares do movimento de dorsiflexão e flexão plantar do tornozelo, resultantes de dois testes distintos. Estes gráficos

exibem o mesmo movimento e portanto podemos avaliar pontos específicos como a variação angular no momento inicial ao tempo de 10s, permanece com um valor aproximado no intervalo de 14° à 23° . Obtivemos o mesmo valor de pico máximo de 170° para o tornozelo esquerdo e 155° para o tornozelo direito aproximadamente. Durante o período total houve outros pontos com valores semelhantes e outros com algumas variações pois é evidente que existem diferenças na marcha em relação a magnitude vetorial do deslocamento em função da variação da velocidade e aos intervalos temporais. Os demais gráficos apresentaram as mesmas semelhanças aos intervalos angulares, ao analisar os testes de cada voluntário separadamente.

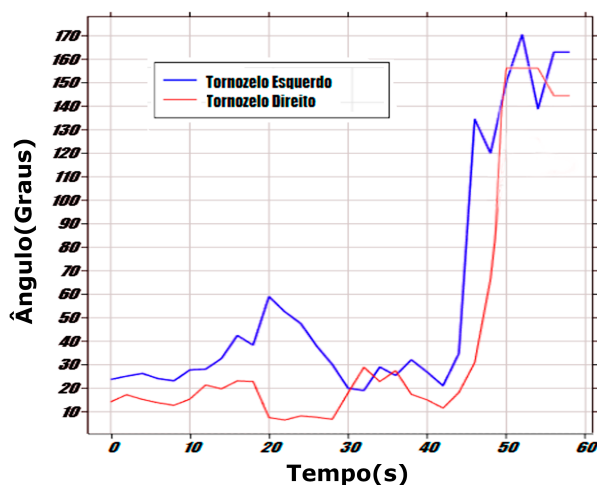


Figura 7: Movimento de dorsiflexão e flexão plantar do tornozelo - Voluntário 2.

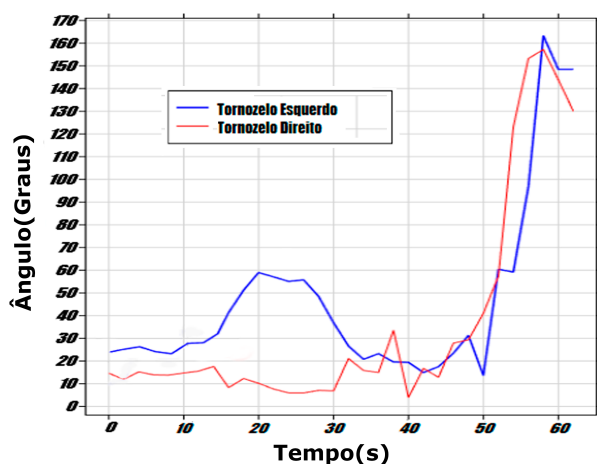


Figura 8: Movimento de dorsiflexão e flexão plantar do tornozelo - Voluntário 2.

Na caminhada ocorre o movimento de abdução e adução do quadril, quando há elevação dos dedos e o membro não está em contato com o solo,

na fase inicial e final de balanço respectivamente, representado na Figura 9.

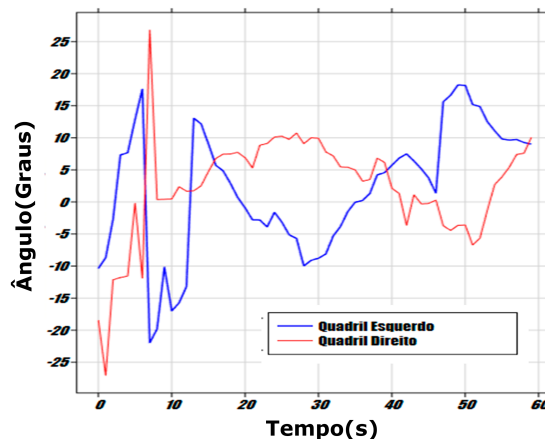


Figura 9: Movimento de adução e abdução do quadril - Voluntário 1.

Os resultados cinéticos são representados na Figura 10 pela força de reação do solo, seu conceito é descrito pela lei de ação e reação de Newton, admite as reações do solo em função da aceleração de todos os segmentos do corpo (Enoka, 2000).

A FRS se caracteriza por possuir uma forma bimodal, onde obtemos dois valores máximos, o primeiro pico representa a fase em que todo corpo é abaixado após o contato do pé, ocorrendo a sustentação completa do peso e a massa corporal é acelerada para cima. A força diminui quando o joelho flexiona, acarretando uma redução parcial da carga. O segundo pico representa o empuxo em função do solo, para o movimento do passo seguinte (Hamill and Knutzen, 2012).

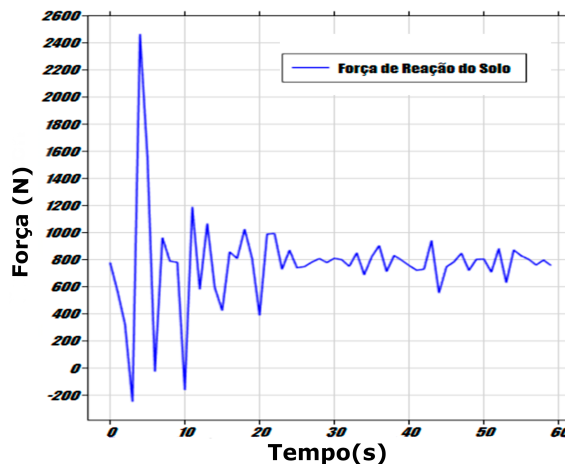


Figura 10: Força de reação do solo - Voluntário 1.

Por último os resultados na Figura 11 da força de atrito, para que tenha o progresso horizontal em função do centro de massa, é necessário sua existência, pois ela é quem fornece a base para

poder caminhar (Enoka, 2000).

A ação de caminhar depende do coeficiente de atrito existente entre pé e o chão, a partir do contato com o solo classifica-se em áspero ou suave, seco ou lubrificado, estático ou dinâmico. Quando o atrito é muito alto há risco de tropeçar e quando é muito baixo há risco de escorregar (Hamill and Knutzen, 2012).

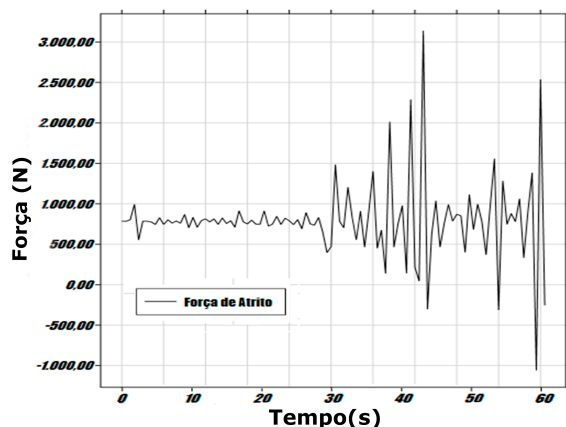


Figura 11: Força de atrito - Voluntário 1.

É visto que há uma grande variação dos valores angulares se compararmos o gráfico 6 com o 7 ou 8, pois pertencem à indivíduos diferentes. Os demais testes mostraram que os gráficos são suficientemente distintos entre cada voluntário. A critério de classificação poderemos utilizar este sistema para trabalhos futuros envolvendo a aplicação por reconhecimento de padrões, pois obtém-se um mecanismo que consegue determinar as características da análise de marcha humana para a identificação automática de pessoas.

4 Conclusão

Este trabalho apresentou um método automatizado de calcular os parâmetros da marcha humana, baseado na utilização da câmera Kinect, que forneceu uma ótima precisão na segmentação temporal e no desempenho para computar os dados.

Para validar os resultados efetuou-se múltiplos testes em pessoas, extraindo variáveis relacionadas ao movimento de caminhar humano com grande aproximação aos valores apresentados na teoria citada. Visto que foi realizado apenas a análise dos membros inferiores do corpo, o Kinect possui uma alta variabilidade e precisão de executar o rastreamento em todo esqueleto, podendo em futuras aplicações aprimorar os resultados com mais parâmetros.

Em função da implementação dispomos de uma ferramenta confiável, que representa o próximo passo para desenvolver um aplicativo que

possa reconhecer uma pessoa a partir da análise dinâmica dos parâmetros da marcha humana.

Referências

- Araújo, A. G. N., Andrade, L. M. and de Barros, R. M. L. (2005). Sistema para análise cinemática da marcha humana baseado em videogrametria, *Fisioterapia e Pesquisa* **11**(1): 3–10.
- Best, R. and Begg, R. (2006). Overview of movement analysis and gait features, *Computational intelligence for movement sciences: neural networks and other emerging techniques* **1**: 1–69.
- Bobbert, M. F., Schamhardt, H. C. and Nigg, B. M. (1991). Calculation of vertical ground reaction force estimates during running from positional data, *Journal of biomechanics* **24**(12): 1095–1105.
- Chandler, R., Clauser, C. E., McConville, J. T., Reynolds, H. and Young, J. W. (1975). Investigation of inertial properties of the human body, *Technical report*, DTIC Document.
- Cuji, D., Arpi, D., Arpi, P., Guerrero, F., Pauta, R., Carrión, M. and Urgilés, F. (2013). Gait cycle analysis through Kinect and stationary wavelet transform.
- Demailly, J.-P. (2012). *Analyse numérique et équations différentielles*, EDP Sciences.
- Enoka, R. M. (2000). *Bases neuromecânica da cinesiologia*, São Paulo: Manole.
- Geerse, D. J., Coolen, B. H. and Roerdink, M. (2015). Kinematic validation of a multi - Kinect v2 instrumented 10 - meter walkway for quantitative gait assessments, *Plos one* **10**(10): e0139913.
- Hamill, J. and Knutzen, K. M. (2012). *Bases biomecânicas do movimento humano*, 3ª edn, Manole.
- Lengyel, E. (2005). *Mathematics for 3D game programming and computer graphics*, Cengage learning.
- Sulino, R. M. (2014). Avaliação automatizada de uma habilidade motora fundamental com o Kinect.
- Zerpa, C., Lees, C., Patel, P., Pryzsucha, E. and Patel, P. (2015). The use of microsoft Kinect for human movement analysis, *International journal of sports science* **5**(4): 120–127.