

# TIPO DE FILTRO E CÁLCULO DAS DERIVADAS NA ANÁLISE CINEMÁTICA

Victor H.A. Okazaki<sup>1,2,3</sup>, Luis A.Teixeira<sup>2</sup>, André L.F.Rodacki<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro de Estudos do Movimento Humano – CEMOVH – Curitiba - PR.

<sup>2</sup>Laboratório Sistemas Motores Humanos – Universidade de São Paulo – USP – São Paulo - SP.

<sup>3</sup>Centro de Estudos do Comportamento Motor – Universidade Federal do Paraná – UFPR – Curitiba - PR.

**Resumo:** O objetivo do estudo foi analisar o efeito do tipo de filtro e das formas de derivar as variáveis cinemáticas. Para tal, um sinal foi criado para representar um deslocamento angular qualquer. Ruídos brancos aleatórios foram incluídos neste sinal. Os filtros digitais *Butterworth* e *Fourier* foram utilizados em três procedimentos para calcular as derivadas do deslocamento angular (velocidade e aceleração): (1) derivou-se a velocidade e aceleração e depois foram filtradas as variáveis; (2) filtrou-se o deslocamento e depois foram derivadas a velocidade e a aceleração; (3) filtrou-se o deslocamento e depois foi derivada a velocidade, após, foi filtrada a velocidade e derivada a aceleração. A raiz do erro médio quadrático foi utilizada para analisar o melhor filtro e procedimento para calcular as derivadas cinemáticas. À medida que o grau da derivada aumentou, a quantidade de ruído foi magnificada. Dependendo do tipo de filtro utilizado, podem ser utilizados quaisquer procedimentos para determinação das derivadas. Todavia, se o filtro não for capaz de atenuar adequadamente os ruídos, resquícios ainda podem ser carregados para as outras derivadas. Em geral, o filtro do tipo *Fourier* apresentou melhor atenuação dos ruídos em comparação ao filtro do tipo *Butterworth*.

**Palavras Chave:** Tipo de Filtro, Cálculo de Derivadas, Análise Cinemática.

*Abstract: This study aimed to analyze the effect of filter type and the ways to derivate kinematics variables. A signal was created to represent an angular displacement. White random noises were added to the signal. Butterworth and Fourier filter were used in three procedures to calculate the angular displacement derivate (velocity and acceleration): (1) velocity and acceleration were derived and then the variables were filtered; (2) displacement was filtered and then it was derived the velocity and acceleration; (3) displacement was filtered and then it was derived the velocity, after, it was filtered the velocity and derived the acceleration. The root mean square error was used to analyze the best filter and procedure to calculate the kinematics derivates. As derivates grade increase, the amount of noise was magnified. Depending on the filter used, it may be used any kind of procedures to determine the derivates. However, if the filter was not able to attenuate noise rightly, vestige still may be carried to the others derivates. In general, Fourier filter type showed the best noise attenuation compared to the Butterworth filter.*

*Keywords: Filter Type, Derivative Calculation, Kinematics Analysis.*

## INTRODUÇÃO

A presença de ruídos é inevitável nas análises biomecânicas. Na cinemática, os ruídos podem ser consequência de diversos fatores: movimento da pele onde está um marcador [1,2], saída do segmento / corpo no plano de movimento em análises em 2D [3], perda dos marcadores do modelo biomecânico no processo de digitalização [4], etc. Assim, procedimentos matemáticos têm sido propostos para atenuar estes sinais que não pertencem ao fenômeno observado e que não são de interesse do pesquisador [4].

Os procedimentos utilizados para atenuar o ruído do sinal são conhecidos como filtragem [5]. Entre os filtros mais utilizados na cinemática estão do tipo *Butterworth* e do tipo *Fourier*. O filtro do tipo *Butterworth*, normalmente passa-baixa de quarta ordem (ou de segunda ordem recursivo), atenua as frequências mais altas que sua frequência de corte. A determinação da frequência de corte teórica ótima é baseada na análise residual proposta por Winter [7]. O filtro do tipo de *Fourier* é baseado nos algoritmos das Séries de *Fourier* que permite decompor um sinal do domínio do tempo em sinais simples (harmônicos) no domínio da

frequência. Assim, as frequências que têm participação na composição do sinal podem ser analisadas para a atenuação dos sinais indesejados.

Apesar de estes dois procedimentos trabalharem no domínio da frequência (filtros digitais), repostas diferentes têm sido verificadas entre os filtros do tipo *Butteworth* e *Fourier* [7]. Entretanto, ainda não é completamente compreendido o efeito destes dois tipos de filtro sobre as variáveis cinemáticas (deslocamento, velocidade e aceleração).

Outra questão importante no tratamento dos ruídos diz respeito à ordem em que são filtradas e derivadas as variáveis cinemáticas [8]. Como os ruídos inclusos na variável de deslocamento são transferidos para suas derivadas, devem-se filtrar as variáveis para atenuar os ruídos de cada variável. Assim, diferentes ordens para derivar e filtrar as variáveis foram propostos [7]. Por exemplo, pode-se derivar o deslocamento, velocidade e aceleração, e após filtrá-los. O deslocamento pode ser filtrado e depois são derivadas a velocidade e a aceleração. Ou também, pode-se filtrar o deslocamento, derivar a velocidade, filtrar a velocidade e, então derivar a aceleração. Entretanto, ainda é pouco compreendido qual método é mais eficaz na atenuação do ruído nas variáveis cinemáticas.

Com propósito de abordar estas questões, o presente estudo objetivou comparar os dois tipos de filtro *Butteworth* e *Fourier*, em função de três métodos para derivadas as variáveis cinemáticas.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Procedimentos Experimentais

Um sinal D1 com amplitude e amostragem de 100 Hz foi gerado para representar um

deslocamento angular qualquer. As derivadas de velocidade e aceleração foram então calculadas gerando os sinais V1 e A1, respectivamente. Após, ruídos aleatórios foram adicionados ao sinal D1, gerando o sinal DR1. Posteriormente, foram derivadas de DR1 a velocidade e aceleração gerando os sinais VR1 e AR1, respectivamente (figura 1).

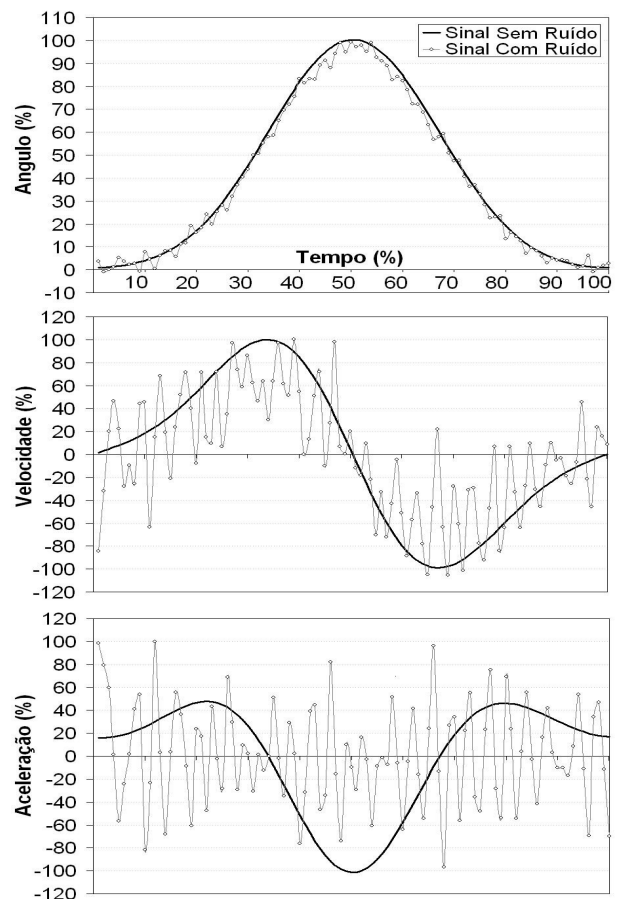


Figura 1 – Sinais gerados com e sem ruído para representar o deslocamento, velocidade e aceleração angulares.

Para atenuar os ruídos foram utilizados dois filtros digitais do tipo *Butteworth* e *Fourier*. Para determinar a frequência de corte do filtro *Butteworth* foi utilizada uma análise residual (para maiores detalhes ver Winter [6]). Para determinar a melhor frequência de corte do filtro de *Fourier* foi utilizada uma análise dos harmônicos no sinal [7].

A frequência de corte do filtro *Butterworth* variou entre 4 Hz e 8 Hz, enquanto a frequência de corte do filtro *Fourier* variou entre 2 Hz e 3 Hz.

Três métodos foram utilizados para calcular as derivadas. O primeiro método consistiu em derivar as variáveis de velocidade e aceleração diretamente do sinal com ruído de deslocamento angular. Após, foram filtradas as variáveis de deslocamento, velocidade e aceleração. No segundo método, foi filtrado o deslocamento antes de derivar a velocidade e aceleração. No terceiro método, o deslocamento foi filtrado e para depois a velocidade ser derivada. Após, a velocidade foi também filtrada e, então, foi derivada a aceleração.

A raiz do erro médio quadrático dos sinais filtrados por cada método de cálculo da derivada, em função dos sinais sem ruídos, foi utilizada para demonstrar o melhor método. Menores valores da raiz do erro médio quadrático apontam melhores ajustes entre o sinal filtrado e o sinal original sem ruído.

## RESULTADOS

Os filtros do tipo *Butterworth* e *Fourier* demonstraram atenuar a maior parte dos ruídos na variável de deslocamento angular. Todavia, quando derivada a velocidade e aceleração, o filtro de *Fourier* demonstrou melhor poder de atenuação dos ruídos (figura 2).

À medida que foi aumentado o grau da derivada a quantidade de ruído foi magnificada. O filtro do tipo *Fourier* demonstrou resultados muito próximos entre os três métodos utilizados para calcular as derivadas do deslocamento angular. Por outro lado, o filtro do tipo *Butterworth* apresentou resultados próximos apenas na variável de deslocamento e de velocidade angulares. A

variável de aceleração apresentou de forma mais evidenciada diferenças entre os métodos utilizados para determinar as derivadas utilizando-se o filtro *Butterworth*.

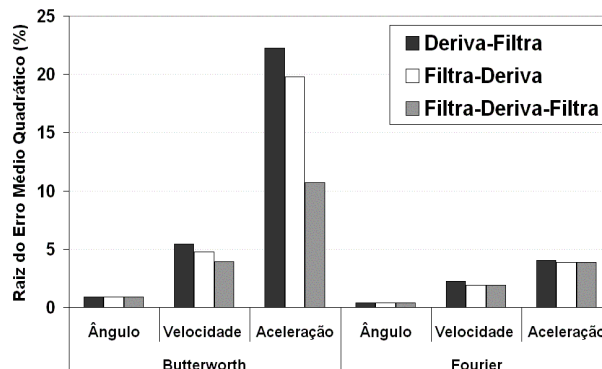


Figura 2 – Resíduo médio das variáveis em função dos métodos de cálculo das derivadas e dos filtros.

O método que melhor atenuou os ruídos nas variáveis de velocidade e aceleração com o filtro *Butterworth* foi o de filtragem dupla. O método em que o deslocamento foi filtrado antes de ser derivada a velocidade apresentou melhor atenuação em relação ao método de derivar e depois filtrar. Entretanto, os resultados dos três métodos de atenuação ainda apresentam grande quantidade de ruído na variável de aceleração quando tratada com o filtro do tipo *Butterworth*.

## DISCUSSÃO

Os ruídos inclusos num sinal foram magnificados quando as derivadas foram calculadas. Assim, quanto maior for o grau da derivada, maior será a quantidade de ruídos no sinal. Entretanto, estes ruídos demonstraram ser atenuados através dos procedimentos de filtragem.

O filtro do tipo *Fourier* apresentou um grande poder de atenuação dos ruídos, independentemente da variável calculada. Isto

ocorreu em função de dois fatores, a análise dos harmônicos que participam na composição do sinal e a resposta de frequência do filtro. Como o filtro do tipo *Fourier* possibilita a especificação dos harmônicos, suas respectivas amplitudes, que compõem o sinal, são mais evidentes as frequências compõem os ruídos brancos e as que fazem parte do sinal. A resposta de frequência do filtro *Fourier* também possui maior poder comparado à resposta do filtro *Butterworth* (figura 3). Conseqüentemente, as frequências de corte atenuadas na filtragem praticamente não possuem resquícios que são carregadas às derivadas seguintes calculadas.

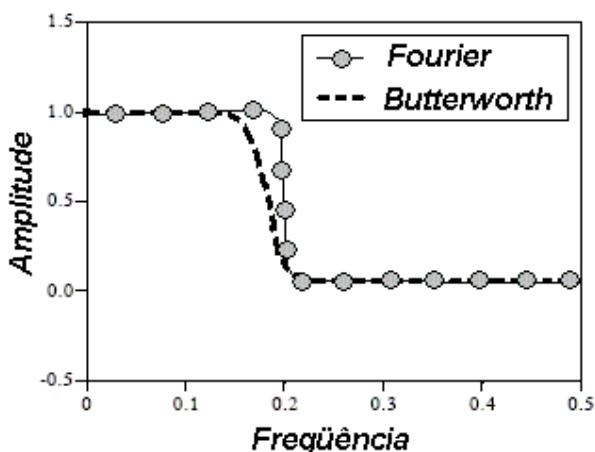


Figura 3 – Resposta de frequência dos filtros do tipo *Fourier* e *Butterworth*.

O filtro do tipo *Butterworth* apresentou resultados satisfatórios para atenuar os ruídos da variável de deslocamento e velocidade angular. Entretanto, a variável aceleração apresentou muita quantidade de ruído quando tratada pelo filtro do tipo *Butterworth*. Isto pode ter ocorrido em função da resposta de frequência do filtro que permite que parte das frequências atenuadas seja mantida no sinal.

Os três métodos utilizados para derivar a velocidade e aceleração do deslocamento angular

apresentaram resultados satisfatórios (menos que 5% de resíduo) quando o filtro utilizado foi o do tipo *Fourier*. Ao passo que, quando utilizado o filtro do tipo *Butterworth*, o método de filtrar o deslocamento, derivar a velocidade, filtrar a velocidade e, após, derivar a aceleração, foi o que melhor resultado apresentou. Isto ocorreu, pois o duplo processo de filtragem permite eliminar parte do ruído que foi transferido e magnificado da variável precedente no cálculo da derivação. O método empregando o filtro *Butterworth* com filtragem do deslocamento e depois a derivação da velocidade aceleração foi o segundo mais adequado. Pois, parte do ruído incluso no deslocamento foi atenuada, assim pouco ruído foi transferido e magnificado nas variáveis subsequentes derivadas. Todavia, quando as variáveis foram derivadas e, somente após, o filtro *Butterworth* foi utilizado, os ruídos foram magnificados a medida em que o grau da derivada aumentou. Como a resposta de frequência do filtro *Butterworth* não foi ótima, maior quantidade de ruído foi verificada nas variáveis em comparação aos outros métodos.

## CONCLUSÃO

À medida que o grau da derivada aumentou, a quantidade de ruído foi magnificada. Dependendo do tipo de filtro empregado, podem ser utilizados quaisquer procedimentos para determinação das derivadas. Entretanto, se o filtro não for capaz de atenuar adequadamente os ruídos, resquícios ainda podem ser carregados para as outras derivadas. De forma geral, o filtro do tipo *Fourier* demonstrou melhores atenuações comparado ao filtro do tipo *Butterworth*. Todavia,

mais estudos são aconselhados para firmar tais conclusões.

## AGRADECIMENTOS

Agrademos a CNPQ pela bolsa de doutorado concedida ao primeiro autor no período de realização deste trabalho (proc. nº 141573/2006-6).

## REFERÊNCIAS

- [1] Yuan X, Ryd L, Blankevoort L. Error Propagation For Relative Motion Determined From Marker Positions. *J of Biomech.* 1997; 30(9): 989-992.
- [2] Lundberg, A. On the Use of Bone and Skin Markers in Kinematics Research. *H Mov Sci.* 1996; 15: 411-422.
- [3] Sih BL, Hubbard M, Williams KR. Correctiong Auto-of-Planing Errors in Two-Dimensional Imaging Using Nonomage-Related Information. *J. of Biomech.* 2001; 34: 257-260.
- [4] Okazaki VHA, Rodacki ALF, Okazaki FHA. O efeito da frequência da amostragem e da intensidade do filtro na análise cinemática. *XVI SEFSUL; 2004.* 127-133.
- [5] Lees A. An optimized film analysis method based on finite difference techniques. *J. of Hum. Mov. Stud.* 1980; 6: 165-180.
- [6] Winter D. Biomechanics and Motor Control of Human Movement. Toronto-Ontario: Wiley-Interscience, 1990.
- [7] Giakas G, Baltzopoulos VA Comparison of Automatic Filtering Techniques Applied to Biomechanical Walking Data. *J. of Biomech.* 1997; 30(08): 851-855.
- [8] Wood GA. Data smoothing and differentiation procedures in biomechanics. *Ex. and Sport Sci. Rev.* 1982; 10: 308-362.
- [5] Nagamo A, Komura T, Himeno R, Fukashiro S. Optimal digital filter cutoff frequency of

jumping kinematics evaluated through computer simulation. *Int. J. of Sport and Health Sci.* 2003; 01(01): 196-201.

e-mail:

[vhaokazaki@gmail.com](mailto:vhaokazaki@gmail.com)