筋電計に実装されている高域遮断フィルタが表面筋電図に及ぼす影響

花岡	正明	•	諸角	一記	•	大杉	紘徳	•	原田	恭宏
鳥野	大	•	池田	誠	•	栁澤	健			

【要旨】

表面筋電図の記録では、表面筋電図の周波数成分と筋電計に実装されている高域遮断フィ ルタの特性との関係が単純ではない。このため、高域遮断フィルタが表面筋電図に及ぼす影 響を考慮して、サンプリング周波数を決める必要がある。しかし、表面筋電図を扱う現場で は、単純にサンプリング定理に則って、解析したい周波数範囲の上限の2倍の周波数で表面 筋電図をサンプリングしている場合が少なくない。本研究では、表面筋電図の生成から筋電 計による表面筋電図の記録までを計算による処理で行い、高域遮断フィルタが表面筋電図に 及ぼす影響を定量的に把握した。具体的には、高域遮断フィルタをかけた後の表面筋電図に おけるエリアシング雑音の含有率を求め、その比を比較した。この結果、サンプリング周波 数、高域遮断フィルタの遮断周波数、解析したい周波数範囲の上限の関係が明らかになり、 表面筋電図のサンプリング周波数を決定するときの指針を得た。

キーワード:表面筋電図、筋電計、高域遮断フィルタ、エリアシング雑音

1. はじめに

表面筋電図(surface electromyogram: sEMG)は、ヒトが生活や動作をするときの筋の活動 状態を捉えることを目的に記録される。理学療法をはじめとするリハビリテーション分野で は、運動負荷の効果や筋疲労の程度を定量化するための指標を得るために表面筋電図が用い られている[1、2、3、4]。また、近年、スポーツや製品開発の分野においても、運動の動き や製品デザインの妥当性を評価するための指標の一つとして、マーカーを装着した体の部位 の位置、働く力の方向・大きさといった三次元動作解析装置で得られる情報とともに、表面 筋電図が同時に記録されることがある[5、6、7]。

このように表面筋電図が幅広い分野で使われるようになったのは、表面筋電図が筋電計 (electromyograph) と呼ばれる筋電図専用の生体アンプを用いて、無侵襲かつ簡便に記録で きるからである。筋電計には、商用の交流雑音(ハム)、呼吸や体動などによって生じる緩や かに変動するドリフト雑音、棘波のようなアーチファクトやエリアシング雑音といった高い 周波数成分の雑音など様々な雑音に対処するための仕組みが実装されている。交流雑音に対しては差動増幅器 (differential amplifier)、ドリフト雑音に対しては低域遮断フィルタ (low cut filter)、棘波のようなアーチファクトやエリアシング雑音に対しては高域遮断フィルタ (high cut filter、high frequency filter) がそれぞれ働くことにより、対象とする雑音が除去されるようになっている [8、9]。

しかしながら、表面筋電図は、1~3000Hzの広帯域な周波数成分の信号から成っているため[10]、筋電計に実装されているこれらの仕組みだけでは、混入している雑音を除去できないことが多い。生体信号として意味のある表面筋電図を取り出すようにするには、筋電計の差動増幅器、低域遮断フィルタ、高域遮断フィルタに関して、その仕様や性能を理解・評価できる知識を持つことが必要である。

特に、高域遮断フィルタでは、遮断周波数や減衰傾度といったフィルタの特性だけでなく、 表面筋電図の中にサンプリング周波数の2分の1を超える周波数成分の信号が含まれるとき に生じるエリアシング(aliasing)の影響が必ず存在することを考慮しなければならない[8、 9]。このように表面筋電図の周波数成分と高域遮断フィルタとの間の関係が単純ではないに も関わらず、表面筋電図を扱う現場では、サンプリング(標本化)定理[11]に則って、サ ンプリング周波数を設定し、表面筋電図を記録している場合が少なくない。

本研究では、表面筋電図の生成から筋電計による表面筋電図の記録までを計算による処理 で行うことによって、筋電計に実装されている高域遮断フィルタが表面筋電図に及ぼす影響 を定量的に把握するとともに、表面筋電図のサンプリング周波数を決定するときの指針を得 ることを目的とする。

2. 方法

2.1 概要

図1は、筋電計に実装されている高域遮断フィルタが表面筋電図に及ぼす影響を把握する までの手順を示している。

筋電計の高域遮断フィルタの影響を把握するためには、高域遮断フィルタをかける前と後の表面筋電図を比較しなければならない。ところが、筋電計では必ず高域遮断フィルタの処理が行われるため、高域遮断フィルタをかけた後の表面筋電図は得られるが、高域遮断フィルタをかける前の表面筋電図を得ることはできない。そこで、本研究では、まず、高域遮断フィルタをかける前の表面筋電図として、表1の①~③の周波数成分で構成される実験用の表面筋電図を生成する。なお、この表面筋電図のデータ間の時間間隔は0.1msec(サンプリング周波数:10000Hz)として設定し、5000Hz までの周波数成分の分布状況が把握できるようにする。



図1 筋電計に実装されている高域遮断フィルタの影響を把握するまでの手順

No	用油粉符用	ピーク周波数			
NO.	同次效軋田	位置	スペクトル値		
1	10~250Hz	50Hz	0.50mV		
2	500~1000Hz	750Hz	0.10mV		
3	1500~3500Hz	2000Hz	0.05mV		

表1 実験用の表面筋電図を構成する周波数成分の設定値

次に、生成した実験用の表面筋電図に対して、筋電計で行われる高域遮断フィルタとリサ ンプリングの処理を計算による処理に置き換える。ここでは、通常の筋電計〔12、13〕に実 装されている"遮断周波数が1000Hzで減衰傾度が12dB/oct"のバタワース型の特性を持つ2 次の IIR(infinite impulse response:無限インパルス応答)フィルタ¹⁾[9]を用いて、高速遮 断フィルタの処理を行う。そして、高速遮断フィルタの処理後の表面筋電図について、14 通 りの周波数(1000~2000Hz は 100Hz 刻みの 11 種類、3000~10000Hz は 3000Hz、5000Hz、 10000Hz の 3 種類)でリサンプリングしたものを筋電計で記録された表面筋電図とする。

さらに、14 種類の各周波数でサンプリングされた表面筋電図における高域遮断フィルタの 影響を把握するために、まず、14 種類の表面筋電図について高速フーリエ変換(fast Fourier transform: FFT)[14]を行い、表面筋電図の0~500Hzまで²⁾の周波数スペクトルを算出する。 続いて、実験用の表面筋電図では、本来殆んど存在していないはずの250~500Hzの信号を 高域遮断フィルタの影響を受けたエリアシング雑音であると解釈し、算出した周波数スペク トルにおける250~500Hzの信号成分の比率をエリアシング雑音の含有率として求める。

2.2 実験用の表面筋電図の生成

表面筋電図を時間領域で表わすと、図2の上段のように、電位の値が正と負の間をランダ ムに行ったり来たりしながら、時間とともに信号の統計的な性質(平均値や分散など)が変 化する非エルゴード的(非定常的)信号(non-ergodic signal (non-stationary signal)) [15] と なる。一方、表面筋電図を周波数領域で表わすと、図2の下段左側のように、裾が少し右に 伸びた1つのビークを持つ山型の周波数スペクトルが得られる。図2の下段右側は、このよ うな周波数スペクトルを標準正規分布(z分布)で近似することによって、周波数スペクト ルのトレンド(太い線)を算出した結果である。



図2 表面筋電図を周波数領域で表現した周波数スペクトルとそのトレンド

本研究では、次の a~f の手順により、設定した周波数スペクトルの周波数範囲、ピーク周 波数の位置とスペクトル値から z 分布で近似した周波数スペクトルを求めて、実験用の表面 筋電図を生成する。なお、この表面筋電図のデータ間の時間間隔は、5000Hz までの周波数成 分の分布状況が把握できるように 0.1msec (サンプリング周波数:10000Hz) とする。

- a. 周波数スペクトルの周波数範囲、ピーク周波数の位置とスペクトル値を設定する。
- b. 周波数範囲の開始位置からピーク周波数の位置までの左半分の z 分布の値を求める。
- c. ピーク周波数の位置から周波数範囲の終了位置までの右半分のz分布の値を求める。
- d. 手順 b と c で求めた z 分布の値を用いて周波数スペクトルのトレンドの値を算出し、 その値から cos 成分と sin 成分の振幅値を求める。
- e. 手順 d で求めた各周波数成分の cos 成分と sin 成分の振幅値から実験用の表面筋電図 のデータを計算する。
- f. 手順eで計算した複数の実験用の表面筋電図のデータを加算して、最終的な実験用の 表面筋電図を生成する。

手順 a では、図 3 のような表 1 の①~③に挙げた周波数スペクトルの周波数範囲、ピーク 周波数の位置とスペクトル値を設定する。次に、手順 b では、周波数範囲の開始位置とピー ク周波数の位置を通る 2 次関数を求める。その 2 次関数から周波数スペクトルの左半分(開 始位置~ピーク周波数の位置まで)の各周波数 f における z 分布の値 z_f を計算する。手順 c においても、手順 b と同様に、ピーク周波数の位置と周波数範囲の終了位置を通る 2 次関数 を求めて、その 2 次関数から周波数スペクトルの右半分(ピーク周波数の位置~終了位置ま で)の各周波数 f における z 分布の値 z_f を計算する。また、手順 d では、手順 b と c で求め た z_f から、周波数スペクトルのトレンドの値 G_f を $G_f = e^{-\frac{1}{2}z_f^2}$ で計算する。そして、0~1 の範囲で発生させた乱数 w_k を G_f の cos 成分の重みとし、次のように G_f の cos 成分と sin 成 分の振幅値 a_k 、 b_k を決定する。cos 成分の振幅値²+sin 成分の振幅値²=周波数スペクトル の値²より、 $a_k^2 + b_k^2 = G_f^2$ が成り立つ。よって、

$$a_k = w_k G_f \downarrow \emptyset, \quad b_k = \sqrt{G_f^2 - w_k^2 G_f^2} = \sqrt{1 - w_k^2} G_f \succeq t \downarrow \Im.$$

さらに、手順eにおいて、実験用の表面筋電図の時間t(単位:msec)における cos 成分と sin 成分を合成して、データ値 $d_i(t)$ を次の式で算出する。なお、iは実験用の表面筋電図の 番号、kは周波数成分の番号、nは実験用の表面筋電図のデータ数、 f_k はk番目の周波数成 分の周波数(単位:Hz)を表わしている。

$$d_{i}(t) = d_{i}(t) \oslash \cos \mathbb{R} : + d_{i}(t) \oslash \sin \mathbb{R} : = \sum_{k=1}^{\frac{n}{2}-1} a_{k} \cos 2\pi f_{k} t + \sum_{k=1}^{\frac{n}{2}-1} b_{k} \sin 2\pi f_{k} t$$



図3 実験用の表面筋電図の周波数スペクトルのパラメータ

最後に、手順fにおいて、手順eで計算した複数の実験用の表面筋電図のデータ $d_i(t)$ を次の式で合成して、最終的な実験用の表面筋電図のデータD(t)を求める。なお、mは手順 $a \sim e$ で生成した実験用の表面筋電図の数であり、本研究ではm = 3となる。

$$D(t) = \sum_{t=1}^{n} (d_1(t) + d_2(t) + \dots + d_m(t)) = \sum_{t=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} d_i(t)$$

2.3 高域遮断フィルタの処理

図4は、高域遮断フィルタの周波数特性のイメージを示したものである。縦軸が振幅(電位)、横軸が周波数となっている。振幅が平坦になっている台形の上底の部分を通過域、信号を通過させない部分を阻止域という。そして、通過域と阻止域の間にある台形の斜辺の部分の遷移域において、通過域の振幅に比べて70.7%³⁾ (= $1/\sqrt{2}$ 倍=-3dB) に振幅が減衰する位置の周波数を遮断周波数(cutoff frequency) という [16]。この遮断周波数の値は、信号を通過しにくくする境界の周波数として解釈される。また、遷移域の傾きは減衰傾度(attenuation slope) と呼ばれ、その単位には dB/oct や dB/dec⁴⁾ が使われている。筋電計に実装されている高域遮断フィルタでは、この遮断周波数と遷移域の減衰傾度で特性が表わされる。筋電計の高域遮断フィルタは、遮断周波数が 1000Hz、遷移域の減衰傾度が 12dB/oct の特性を持つものが多く、利得の値は次の式で計算される。

1oct 当たりの利得= $10^{-\frac{dB O 滅衰傾度}{20}} = 10^{-\frac{12}{10}} = 10^{-0.6} = 0.25 = 25\%$

従って、筋電計では、図4の $f_1 \rightarrow f_2$ のように周波数が2倍になると、利得は25%に減衰する。



図4 筋電計に実装されている高域遮断フィルタの周波数特性

図 5 は、筋電計に実装されているバタワース型 ⁵の 2 次 ⁶の IIR フィルタのブロック図である。なお、 z^{-1} は 1 データ分の遅れ、 $a_1 \sim a_2 \ge b_0 \sim b_2$ はフィルタ係数を示している。このフィルタの入力 $D(t) \ge$ 出力 D'(t)の関係は、次の式で表わされる [17]。

 $D'(t) = a_1 D'(t-1) + a_2 D'(t-2) + b_0 D(t) + b_1 D(t-1) + b_2 D(t-2)$ (2.1) また、この伝達関数は

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2}}$$

となる。

本研究では、図5のような遮断周波数が1000Hz、遷移域の減衰傾度が12dB/octとなるよう に高域遮断フィルタを設計して、その伝達関数H(z)からフィルタ係数 $a_1 \sim a_2 \ge b_0 \sim b_2 を$ 求める。そして、実験用の表面筋電図のデータをD(t)として、式(2.1)で高域遮断フィルタ をかけた後の表面筋電図のデータD'(t)を算出する。



図5 筋電計に実装されている IIR フィルタのブロック図

2.4 表面筋電図のリサンプリング

表面筋電図の周波数解析では、0~500Hz までの範囲で周波数成分の分布状況を把握することが一般的に行われている。このため、周波数範囲の上限である 500Hz の 2 倍以上のサンプリング周波数である 1000Hz 以上のサンプリング周波数で表面筋電図が記録されている。

本研究では、実験用の表面筋電図のデータ間の時間間隔は 0.1msec(サンプリング周波数: 10000Hz)であることから、1000~10000Hz までの範囲でサンプリング周波数を変えながら、 高域遮断フィルタをかけた後の表面筋電図のデータ *D*'(*t*)をリサンプリングする。なお、この リサンプリングは、筋電計で記録された表面筋電図を A/D 変換⁷⁾ する処理に相当する。 高域遮断フィルタの特性(遮断周波数:1000Hz、減衰傾度:12dB/oct)から、エリアシン グ雑音の含有率の変化を詳細に捉える必要があると考えられる 1000~2000Hz までの範囲で は、100Hz 刻みで周波数を増加させる。また、エリアシング雑音が殆んど除去されて含有率 の変化があまり見られないと考えられる 3000~10000Hz までの範囲では、3000Hz、5000Hz、 10000Hz の周波数とする。これらの 14 種類の周波数で高域遮断フィルタをかけた後の表面筋 電図のデータをリサンプリングし、そのデータを用いて 14 種類のサンプリング周波数におけ る高域遮断フィルタの影響を把握する。

2.5 表面筋電図の周波数スペクトルの算出

リサンプリングした 14 種類(1000~2000Hz は 100Hz 刻みの 11 種類、3000~10000Hz は 3000Hz、5000Hz、10000Hz の 3 種類)の表面筋電図について、FFT(高速フーリエ変換)を 行い、表面筋電図の周波数スペクトルを算出する。このとき得られる周波数スペクトルの上 限は、それぞれのサンプリング周波数の 2 分の 1 の周波数(ナイキスト周波数という)とな るため、14 種類全ての表面筋電図の周波数スペクトルで共通な周波数の範囲は、0~500Hz となる。本研究では、この 0~500Hz の範囲の周波数スペクトルを対象にする。

2.6 エリアシング雑音の含有率の計算

生成した表面筋電図を構成している表1の①~③に挙げた3つの周波数成分のうち、①の 周波数成分(10~250Hz)は、高域遮断フィルタの処理では除去されず、0~500Hzまでの範 囲の周波数スペクトルでそのまま分布状況が捉えられる。しかし、②の周波数成分(500~ 1000Hz)は、高域遮断フィルタの処理では除去されないため、0~500Hzまでの範囲の周波数 スペクトルにエリアシング雑音として反映される可能性がある。また、③の周波数成分(1500 ~3500Hz)については、高域遮断フィルタの処理でかなり減衰するため、0~500Hzまでの範 囲の周波数スペクトルにエリアシング雑音として反映されることは殆んどない。従って、14 種類の周波数でリサンプリングした高域遮断フィルタをかけた後の表面筋電図では、エリア シング雑音が混入していなければ、0~500Hz までの範囲において、①の周波数成分(10~ 250Hz)だけが存在することになる。

本研究では、0~500Hz までの範囲において、本来殆んど存在していないはずの 250~500Hz の成分をエリアシング雑音であると解釈する。そして、0~500Hz までの範囲の周波数スペク トルの振幅積分値(合計値)に対する 250~500Hz の成分の振幅積分値の比率をエリアシン グ雑音の含有率として、次の式で計算する。

エリアシング雑音の含有率(%) =
$$\frac{\sum 250 \sim 500 \text{Hz} \mathcal{O}$$
周波数スペクトルの値
 $\sum 0 \sim 500 \text{Hz} \mathcal{O}$ 周波数スペクトルの値

3. 結果

3.1 実験用の表面筋電図の生成結果

図 6 は、表 1 の①~③に挙げた設定値を用いて、手順 b~e で生成した周波数スペクトル(上 段) と実験用の表面筋電図 $d_1(t) \sim d_3(t)$ (下段) である。図 6 の上段の周波数スペクトルを 見ると、①~③の設定値の通りになっていることが確認できる。

そして、手順fにより、図7のように表面筋電図 $d_1(t) \sim d_3(t)$ を加算して、最終的な実験用の表面筋電図D(t)を得た。このとき、いずれの表面筋電図もサンプリング周波数は10000Hz、データ時間は1000msec(1sec)である。従って、時間tは 0.1msec 刻みで 0.1~1000msec までの値をとるので、データ数nは、 $n = \frac{1000}{0.1} = 10000$ となる。



図6 表1の設定値で生成した周波数スペクトルと表面筋電図



図7 表1の設定値で生成した表面筋電図を合成した実験用の表面筋電図

図 8 の左側は、サンプリング周波数=10000Hz、データ時間=1000msec の上段の D(t) につ いて、FFT を行い、下段の周波数スペクトル⁸⁾を算出した結果である。この周波数スペクト ルでは、表 1 の①~③に挙げた設定値の通りに、10~250Hz、500~1000Hz、1500~3500Hz の 3 つの範囲で周波数成分が分布している状況が確認できる。これにより、加算した後の表 面筋電図は、加算する前の 3 つの表面筋電図の周波数スペクトルにおけるそれぞれの特徴を 継承していることがわかる。



図8 高域遮断フィルタをかける前後の表面筋電図と周波数スペクトル

3.2 高域遮断フィルタの処理結果

遮断周波数が 1000Hz、遷移域の減衰傾度が 12dB/oct の特性を持つ高域遮断フィルタのフィルタ係数 $a_1 \sim a_2 \geq b_0 \sim b_2$ は、次のようになった。

 $a_1 = 1.14298050$ $a_2 = -0.41280160$ $b_0 = 0.06745527$ $b_1 = 0.13491055$ $b_2 = 0.06745527$

よって、高域遮断フィルタにかける前の表面筋電図D(t)と高域遮断フィルタをかけた後の表面筋電図D'(t)の関係は、

D'(t) = 1.14298050D'(t-1) - 0.41280160D'(t-2) +

0.06745527D(t) + 0.13491055D(t-1) + 0.06745527D(t-2)

となった。本研究では、この式を用いて、高域遮断フィルタの処理を行った。

図 8 の右側は、上段の D'(t) について、FFT を行い、下段の周波数スペクトルを算出した結 果である。この周波数スペクトルを図 8 の下段左側の周波数スペクトルと比べると、10~ 250Hz、500~1000Hz の範囲の周波数成分に違いは見られない。しかし、1500~3500Hz の周 波数成分では、ピーク位置の 2000Hz 付近の振幅が 17~20%程度に減衰しており、高域遮断 フィルタが設計した特性(遮断周波数:1000Hz、遷移域の減衰傾度:12dB/oct)の通り⁹に働 いたことが確認できる。

3.3 エリアシング雑音の含有率の計算結果

図 9 は、上段の高域遮断フィルタをかけた後の表面筋電図 D(t) (サンプリング周波数: 10000Hz)を1000Hz(中段)と2000Hz(下段)でリサンプリングした時の表面筋電図と周波 数スペクトルである。1000Hz では、0~500Hz までの周波数スペクトルの振幅積分値が 52.075mV、250~500Hz の振幅積分値が 12.557mV となり、エリアシング雑音の含有率は 24.11%になった。また、2000Hz では、0~500Hz までの振幅積分値は 58.991mV、250~500Hz の振幅積分値は 1.903mV となり、エリアシング雑音の含有率は 3.226%になった。この処理を 残りの 12 種類の周波数(1100~1900Hz の 9 種類と 3000Hz、5000Hz、10000Hz の 3 種類)に ついても行い、エリアシング雑音の含有率を計算した。



図 9 高域遮断フィルタをかけた後の表面筋電図を 1000Hz と 2000Hz で リサンプリングした時の表面筋電図と周波数スペクトル

表 2 は、14 種類のリサンプリング周波数とエリアシング雑音の含有率の関係をまとめた結 果である。1000~1200Hz では、エリアシング雑音の含有率が 18.27~24.71%と高い値を示し た。しかし、1300Hz になると、エリアシング雑音の含有率は急激に低下して 5.494%となり、 1600Hz までは 4.380~4.889%を推移した。さらに、1700Hz になると、含有率は 3.319%に低 下して、*D*'(*t*)のサンプリング周波数である 10000Hz までは 2.047~3.152%となった。

また、表2の右端の項目は、高域遮断フィルタをかけた後の表面筋電図 D'(t) (サンプリン グ周波数:10000Hz) に存在するエリアシング雑音の含有率に対する比を計算したものであ る。1000~1200Hz では 8.922~11.777、1300~1600Hz では 2.140~2.684、1700~5000Hz では 1.002~1.621 となった。この比の推移を折れ線グラフで表わすと図 10 のようになった。上段 左側は、リサンプリングした 1000Hz~10000Hz の全ての範囲を、上段右側は、最初に大きな 変化が見られた 1300Hz の 1 つ前の 1200Hz から比が 1.5 まで低下した 2000Hz までの範囲を 拡大したグラフである。そして、下段は、1300~2000Hz の縦軸の上限を 3.0 に拡大したグラ フである。ここでもエリアシング雑音の含有率の場合と同様に、比の値の傾向が上段右側と 下段の自抜き矢印で示した 1300Hz と 1700Hz の 2 地点で変化したことが確認できた。

リサンプリング 周波数(Hz)	0~500Hzの 振幅積分値 (mV)	250~500Hzの 振幅積分値 (mV)	エリアシング雑音の 含有率(%)	10000Hzの含有率に 対する比
1000	52.075	12.557	24.11	11.777
1100	76.207	18.831	24.71	12.070
1200	69.722	12.736	18.27	8.922
1300	60.151	3.3048	5.494	2.684
1400	59.295	2.5974	4.380	2.140
1500	60.149	2.9640	4.928	2.407
1600	59.865	2.9270	4.889	2.388
1700	59.514	1.9755	3.319	1.621
1800	59.238	1.8672	3.152	1.540
1900	59.094	1.8619	3.151	1.539
2000	58.991	1.9031	3.226	1.576
3000	81.955	1.6950	2.068	1.010
5000	115.831	2.7368	2.052	1.002
10000	163.802	3.3537	2.047	1.000

表2 リサンプリング周波数とエリアシング雑音の含有率の関係



図 10 10000Hz におけるエリアシング雑音の含有率に対する比の推移

4. 考察

図 8 で示すように、高域遮断フィルタをかけた後の表面筋電図 D'(t) (サンプリング周波 数:10000Hz)の周波数スペクトルでは、表 1 の③に挙げた 1500~3500Hz のピーク位置の 2000Hz 付近の周波数成分は、フィルタをかける前に比べて 17~20%程度まで減衰した。これ は、一般的な特性の高域遮断フィルタが実装されている筋電計を用いて表面筋電図を記録す る場合、5000Hz や 10000Hz のように高いサンプリング周波数で表面筋電図をいくら記録して も、2000Hz くらいになると必ず 80%以上の周波数成分は除去されてしまうことを意味してい る。従って、サンプリング周波数を高くしても、表面筋電図の高い周波数成分の詳しい情報 が得られる訳ではないことに注意しなければならない。高いサンプリング周波数で表面筋電 図を記録する場合には、"解析したい周波数範囲の上限<高域遮断フィルタの遮断周波数< サンプリング周波数"を満たすように、高域遮断フィルタの遮断周波数が変更できる筋電計 を用いることが必要であると考えられる。

次に、高域遮断フィルタをかけた後の表面筋電図 D'(t) (サンプリング周波数:10000Hz) における 0~500Hz までの範囲に存在するエリアシング雑音の含有率を1.0 として計算したリ サンプリング周波数が 1000Hz のときの含有率の比は、11.777 であった。これは、図 8 の下 段右側の周波数スペクトルに存在している 500~1000Hz の周波数成分が 500Hz を軸に折り返 された結果、エリアシング雑音として反映したためである。そして、リサンプリング周波数 を 2000Hz まで 100Hz 刻みに上げて行くと、周波数成分を折り返す軸は、50Hz 刻みで 1000Hz までになる。これとともに、折り返される図 8 の下段右側の 500~1000Hz の周波数成分は徐々 に少なくなって、2000Hz くらいになると 80%以上の周波数成分は除去される。この過程にお いて、リサンプリング周波数が 1300Hz では、650Hz を軸に折り返されたエリアシング雑音が 1 つ前の 1200Hz の 600Hz を軸に折り返されたときに比べて急激に減少した結果、含有率の比 に大きな変化(8.922→2.684)が出現したと考えられる。また、リサンプリング周波数が 1700Hz の場合も、850Hz を軸に折り返されたエリアシング雑音が 1 つ前の 1600Hz の 800Hz を軸に 折り返されたときに比べてより減少した結果、含有率の比が 2.388→1.621 へと変化したと考 えられる。高域遮断フィルタが実装されている筋電計を用いて表面筋電図を記録する場合、 サンプリング(標本化)定理に則って、サンプリング周波数を設定すると、真の筋電図に存 在しているサンプリング周波数を超える成分は、サンプリング周波数の 2 分の 1 の周波数を 軸に折り返される。この結果、折り返された周波数成分がエリアシング雑音として含まれる ことになる。可能な限り解析したい周波数の上限までの範囲にエリアシング雑音が含まれな いようにするには、

(解析したい周波数範囲の上限×2)×1.7≤サンプリング周波数 を満たす周波数で表面筋電図をサンプリングする必要があると考えられる。なお、この式の 1.7 は、次の式で算出した。

<u>エリアシング雑音の比が変化した周波数</u> 解析したい周波数範囲の上限×2 = <u>1700</u> = 1.7

以上から、次の関係が同時に成り立つことが、筋電計に実装されている高域遮断フィルタ の影響を考慮してサンプリング周波数を決めるときの指針になることが示唆された。

解析したい周波数範囲の上限 < 高域遮断フィルタの遮 断周波数 < サンプリング周波数 (解析したい周波数範 囲の上限×2)×1.7≤サンプリング周波数

5. まとめ

本研究では、高域遮断フィルタをかけた後の表面筋電図に含まれるエリアシング雑音の含 有率に対する比を指標として、筋電計に実装されている高域遮断フィルタが表面筋電図に及 ぼす影響を定量的に把握した。この結果、サンプリング周波数を高くしても、表面筋電図の 高い周波数成分の詳しい情報が得られる訳ではないこと、また、サンプリング(標本化)定 理に則って、解析したい周波数範囲の上限の2倍の周波数で表面筋電図をサンプリングする と、表面筋電図には殆んどの場合、かなりのエリアシング雑音が混入することがわかった。 これらの問題を回避するために、サンプリング周波数、高域遮断フィルタの遮断周波数、解 析したい周波数範囲の上限の関係を明らかにすることによって、表面筋電図のサンプリング 周波数を決定するときの指針を得た。

今後は、この指針を適用して実際に筋電計を用いて表面筋電図を記録したときと、サンプ リング(標本化)定理に則って記録したときの違いを比較する予定である。特に、表面筋電 図の記録において、どのような状態でどのような動作をした際に指針が有用であるかを検証 したいと考えている。

【注】

- IIR フィルタは、構造が単純で容易に実現でき、実行時間が短いという利点があるため、筋電計や脳 波計などの生体アンプに実装されている。
- 2) 表面筋電図では 0~500Hz までの周波数成分が多く含まれるため、0~500Hz までの範囲で周波数解 析を行うことが多い。
- 3) 遮断周波数の振幅の利得(単位:dB)で表わすと、次のようになる。
 遮断周波数の振幅の利得=20log₁₀ 1/2 = 20log₁₀ 0.707 = −3 dB
- oct は octave (オクターブ)の略で、1oct 上がると周波数は2倍、1oct 下がると1/2倍になることを 表わす。また、dec は decade (ディケード)の略で、1dec 上がると周波数は10倍、1dec 下がると1/10 倍になることを表わす。
- 5) 図 4 のように通過域と阻止域のどちらも振幅特性のゆらぎがなく、平坦になっているフィルタをバ タワース(Butterworth)型という。
- 6) ブロック図に存在する z^{-1} の数をフィルタの次数という。図 5 のフィルタの次数は、 z^{-1} が 2 つあるので 2 次となる。
- 7) 筋電計で記録された表面筋電図(アナログデータ)をコンピュータで扱えるようにするためにディ ジタルデータに変換する処理のことをいう。
- 8) 周波数スペクトルの上限は、サンプリング周波数の2分の1の 5000Hz となっている。
- 9) 理論上、2000Hzの振幅は、1000Hzにおける 70.7%(=-3dB)の 25%(=-12dB)になる(減衰傾度:12dB/oct)ため、高域遮断フィルタをかける前の振幅に比べて 17.7%(=0.707×0.25)に減衰することになる。

【参考文献】

- PV. Komi, P. Tesch : "EMG frequency spectrum, muscle structure, and fatigue during dynamic contractions in man", European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, Vol.42(1), pp. 41-50 (1979).
- [2] 山田洋・他: "Twitch interpolation 法と表面筋電図解析を用いたヒトの絶対筋持久力の評価"、
 バイオメカニズム学会誌、Vol.27(4), pp. 197-203 (2003).
- [3] H. Xie, Z. Wang: "Mean frequency derived via Hilbert-Huang transform with application to fatigue EMG signal analysis", Computer methods and programs in biomedicine, Vol.82(2), pp. 114-120 (2006).
- [4] 花岡正明・他: "表面筋電図解析のための連続ウェーブレット変換方法"、生体応用計測、Vol.5,

pp.29-37 (2014).

- [5] Y. Nakamura, et al. : "Somatosensory computation for man-machine interface from motion-capture data and musculoskeletal human model", IEEE Transactions on Robotics, Vol.21(1), pp. 58-66 (2005).
- [6] 砂田治弥・他: "モーションキャプチャシステムによる剣道打ち込み動作の解析"、電子情報 通信学会技術報告. MBE、Vol.111(121), pp. 31-35 (2011).
- [7] AL. Rincon, et al. : "Design of a video game for rehabilitation using motion capture, EMG analysis and virtual reality", Proceedings of 2016 International Conference on Electronics, Communications and Computers, pp. 198-204 (2016).
- [8] 橋本修治: "臨床電気神経生理学の基本"、pp. 166-194、診断と治療社、東京(2013).
- [9] 金井寛・他: "生体計測学"、pp. 126-152、コロナ社、東京(2013).
- [10] 米国保健福祉省 公衆衛生局 疾病予防センター 国立産業安全保健研究所 (瀬尾明彦・小木和孝 監訳): "表面筋電図の人間工学応用"、p.48、労働科学研究所出版部、川崎 (2006).
- [11] 城戸健一: "ディジタル信号処理入門"、pp. 31-35、丸善、東京(1989).
- [12] 日本光電工業株式会社: "筋電図・誘発電位検査装置 MEB-2300 シリーズ ニューロパック X1" (http://www.nihonkohden.co.jp/iryo/documents/pdf/H901528D.pdf).
- [13] ティアック株式会社: "小型4チャンネル生体アンプ BA1104" (http://tms.teac.co.jp/industry/me/ba1104/index.html).
- [14] J.W. Cooley, J.W. Tukey : "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series", Mathematics of Computation, Vol.19, pp. 297-301 (1965).
- [15] 馬杉正男:"信号解析"、pp. 1-2、森北出版、東京(2013).
- [16] 松田稔: "ディジタル信号処理入門"、pp. 75-86、日刊工業新聞社、東京(1986).
- 〔17〕 三上直樹: "ディジタル信号処理の基礎"、pp. 55-62、CQ 出版社、東京(2000).

Influences of High Frequency Filter implemented in the Electromyograph on Surface Electromyogram

Masaaki Hanaoka, Kazunori Morozumi, Hironori Ohsugi Yasuhiro Harada, Hirosi Karasuno, Makoto Ikeda, Ken Yanagisawa

Abstract

The relationship between frequency components of surface electromyogram (sEMG) and characteristics of high frequency filter (HFF) implemented in the electromyograph is complicated. For this reason, sampling frequency should be decided by considering influences of HFF on sEMG. However, we observe a lot of scenes that sEMGs are recorded according to the sampling theorem with twice frequency of the upper limit frequency in analyzing frequency range. In this study, we simulate the process from generating to recording sEMG with computer, and quantitatively capture influences of HFF in sEMG. Concretely, we compare the ratios of aliasing noise within sEMGs filtered by HFF. As a result, the relationship among sampling frequency, HFF cutoff frequency and upper limit frequency of analyzing frequency range is clarified, and we obtain the guideline of deciding sampling frequency in recording sEMG.

Key words: surface electromyogram, electromyograph, high frequency filter, aliasing noise