

BASIC による単一運動単位活動電位の分類支援プログラム

塚原 玲子・青木 久・矢部京之助*・間野 忠明**

(愛知県心身障害者コロニー発達障害研究所治療学部・

*名古屋大学総合保健体育科学センター・**名古屋大学環境医学研究所)

1. はじめに

各種の針電極によって記録された EMG には、しばしば複数の運動単位からの活動電位 (motor unit action potential, MUAP) が認められ、単一運動単位の MUAP の分離・分類が必要となる。MUAP の分類には、1960年代よりコンピュータが用いられ、数々のアルゴリズムが考案されている [1]。すなわち、MUAP の特徴を記述する方法として、波形を示す template [2-5]、各種の振幅や時間の計測値 (peak-to-peak, base line-to-peak など) [4]、波形の面積 [4]、カーブフィッティングなどがあり、MUAP 間のそれらの類似度あるいは非類似度として、差あるいは差の絶対値の和 [4]、相互相関係数と積率相関係数、偏差平方和 (あるいはユークリッド距離) [2, 4, 5] などが用いられている。

その中で、template を用いる方法は比較的良好的な MUAP 分離成績を示すことが知られているが、長い処理時間、大きな記憶容量を要するという問題点がある。しかし、近年のパーソナルコンピュータの大容量化、高速化により、少なくとも off-line での使用に関しては、この問題点はあまり大きなものではなくなっている。そこで、off-line でパーソナルコンピュータ上で使用する目的で template-matching による MUAP 分類プログラムを開発した。

template-matching に限らず、MUAP 分類のアルゴリズムが解決しなければならない問題に、MUAP の経時的な変化と複数の MUAP の重畳による波形の変化への対処がある。まず波形の経時的な変化については、新しく MUAP が分類される度にその template を更新する方法を取った。また、複数の MUAP の重畳した

波形から単一運動単位の MUAP を分離するため、分類対象のスパイクから template を算術的に減算する方法 [2, 3] と、2つの template から新しい template を合成する方法の 2通りの方法を用いた。重畳波形の分離に合成した template を用いる方法は、減算する方法と比較して処理時間・記憶容量の点から効率的ではないためか、文献 2, 3 では採用されていない。しかし、減算法では必ずしも最適な template の組み合わせに到達できるとは限らないのに対し、合成法では、template のあらゆる組み合わせを評価するので、すでにある template の中では最適な組み合わせを選ぶことができる。そこで、主に分類の修正用として第 2の方法によるプログラムを開発した。

Schmidt [1] の紹介によれば、類似度の判定の基準はしばしばオペレータの指示にゆだねられるが、開発したプログラムでは基準の 1つとして F 分布を利用した。EMG に含まれるバックグラウンドノイズが正規分布に近い分布を取るときには、F 値は、template からの偏差平方和がノイズによるものとみなしてよいかどうかのよい手がかりとなるからである。

開発した 2つの活動電位分類支援プログラムは、MS-DOS 上の N 88 BASIC で書かれたもので、NEC PC-9800 系のパーソナルコンピュータで使用できる。特殊な周辺機器は必要としないが、ディスプレイはノーマルモードで使用するよう書かれている。パーソナルコンピュータは対話型の処理が容易なので、これらのプログラムでは、個々のスパイクについて分類先の候補が提示され、それに対してオペレータが判断するという処理の進めかたにした。第一のプログラム "MUSKET-A" は、半ば自動的に MUAP の分類を行う。第二のプログラム

“MURETRV”は，“MUSKET-A”で分類できなかったスパイク、特に重なり大きい重畳波形を，template を2つずつ重畳させた波形を template として用いて単一運動単位の活動電位に分離するものである。いずれのプログラムも，12ビット，10～20kHz で A/D 変換された EMG のバイナリファイルをディスクから読み込んで処理を行い，結果をテキストファイルとして出力する。

II. プログラムの概要

A. “MUSKET-A”

このプログラムは，活動電位を含む記録から，指定した範囲の振幅を持つスパイク，あるいは，指定した範囲の peak-to-peak 振幅と peak-to-peak 時間のスパイクを選びだし，template との類似度から MUAP の分類を行う。分類の開始時には template はないので，最初のスパイクはそれ自身が template 0 になる。次のスパイクは，template 0 と充分似ていればユニット 0 とされ，template 0 は更新される。似ていない場合には別のユニット（この場合はユニット 1）に分類され，新しい template 1 をつくる。以下順に，スパイクと各 template の類似度を求め，分類と template の更新を行う。各ユニットの template は，それに分類されたスパイクの平均波形である。このプログラムでは，そのユニットに分類されたスパイクが10個を越えた時には単純平均ではなく，それまでの平均に重み10を掛けた値と新しく分類されたスパイクとの重み付き平均とした。これは，後から分類されたスパイクほど寄与が小さくなっていくを防ぐためである。

プログラムの実際の演算では，スパイクと template との類似度ではなく，非類似度としてスパイクから template を引いた偏差平方和を求めた。偏差平方和を求める範囲は，各 template の最も振幅の高い peak を挟む2つの peak の間で，template により duration(t) が異なるの t で除した値を求めた。すなわち，スパイクを $X_k(k=0, t)$ ，template を $Y_k(k=0, t)$ と

すると，偏差平方和 $D = \sum (X_k - Y_k)^2 / t$ となる。単位時間当たりの偏差平方和の最も小さい template をそのスパイクの分類先の候補とするが，以下の2つの条件を設けた。第1は，template との偏差平方和が記録に含まれるバックグラウンドノイズよりも大きすぎないことである。“MUSKET-A”では，バックグラウンドノイズ(V)として記録中の適当な範囲を指定して分散を計算し，template との偏差平方和(D)とバックグラウンドノイズとの比(D/V)を求める。この値がF分布の0.5%点($0.5\% = \Pr\{F > F_0\}$ なる値 F_0)より小さいときに，template との偏差平方和はバックグラウンドノイズよりも大きいとはいえないとした。第2は，template からの偏差平方和が template のパワー($\sum Y_k^2 / t$)より充分小さいことで，この判定基準にも，F分布を適用した。

どの template にも当てはまらないスパイクが見いだされた場合は，それを新しい template とするか，複数の MUAP への分離を試みる。複数のスパイクへの分離は，以下のような方法で行う。まず，最も D/V の小さい template i をスパイクから算術的に引く。残った波形について別の template と D/V を求め，最小の D/V を示す template j を見いだす。次に，もとのスパイクから template i の代わりに template j を引いて残りの波形がやはり template i に関して最小の D/V を示すかどうか確かめる。この段階で，別の template k が最小の D/V を示すことがあるが，同様の手順を繰り返すことにより，より小さい D/V を示す template の組み合わせを得ることが可能である。図1Aは，“MUSKET-A”による重畳波形の分離の例で，もとの波形から unit 0 の template を算術的に引いた残りの波形が点線で描かれている。この新しい波形は，unit 2 に分類される条件を満たしている。

“MUSKET-A”は，16個の template を作成することができ，各 template に対して1ファイルにつき最大150個のスパイクを分類することができる。また，出力は，MUAP の生起し

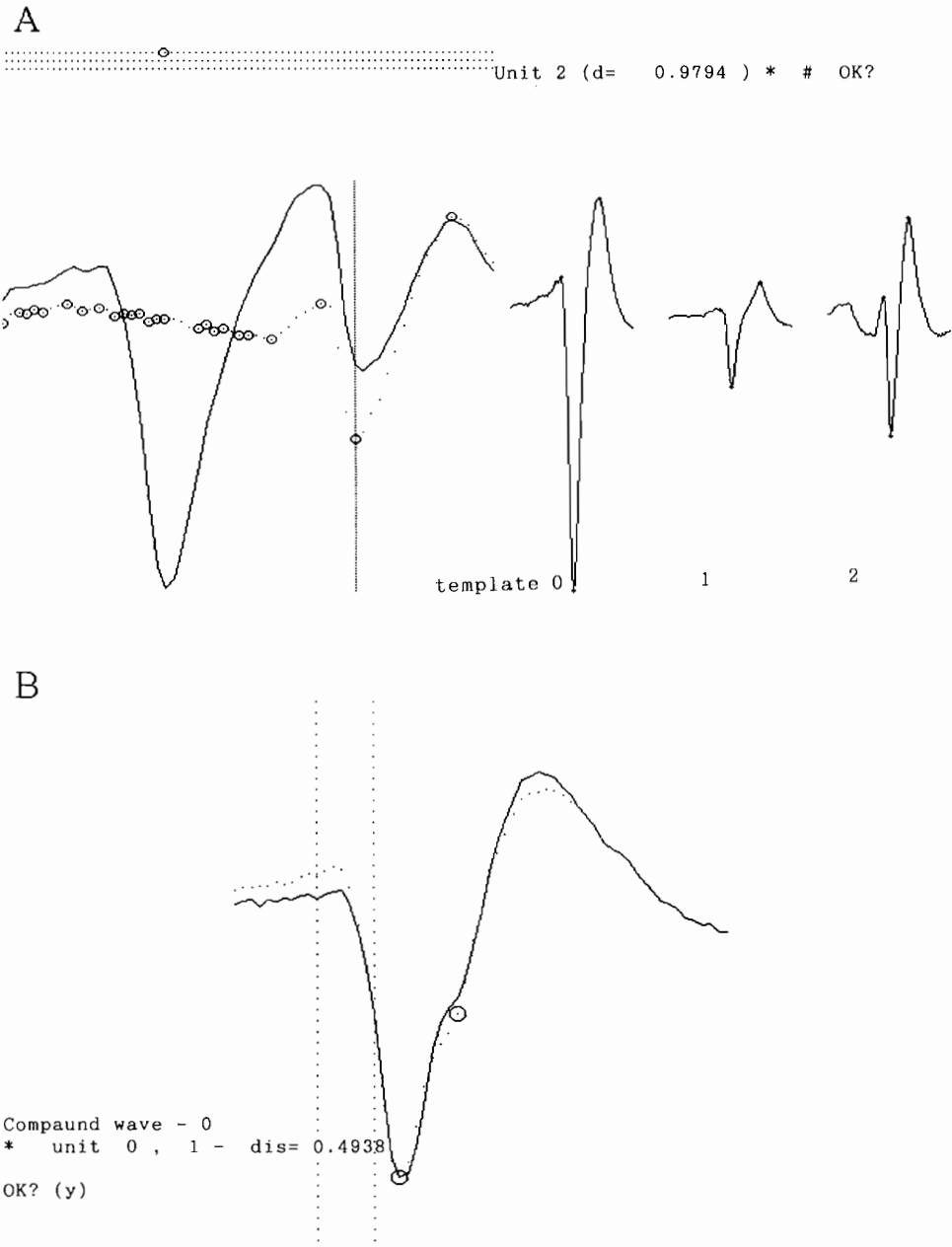


図1. 重畳波形から単一運動単位の MUAP への分離. A. "MUSKET-A" の方法. 画面左半分は分離対象の波形で, 原波形が実線, template 0 を引いた波形とそのローカルピークが点線と○印で示されている. 右半分は template で, 左から順に template 0, 1, 2 である. 引いた template 0 のピークの位置は図の上部の 3 本の横線上の○印で示されている. 減算後の波形は template 2 に最も近く, 点線の波形上の縦線の位置に template のピークを一致させた時の D/V 値が "d=" として示されている. * と # は, それぞれ D/V と D/power が基準に合っていることを示している. B. "MURETRV" の方法. 対象となっている波形(実線)に, template 0, 1 を組合わせた波形(点線)が最も近いことが示されている.

た時間をユニット毎に並べたシーケンシャルファイルであり、市販の表計算ソフトなどでテキストファイルとして読み込み可能である。また、template をバイナリファイルとして出力でき、同じユニットが記録された別のファイルに対し MUAP の分離を行う際、template として利用できる。

B. “MURETRV”

“MUSKET-A” で用いた重畳波形の分離法は、2つの MUAP の重なりが大きい場合に分離が困難なことがある。“MUSKET-A” で分離できなかった波形を処理するため、このプログラムでの MUAP の分離は、2つの template から合成した波形とのマッチングにより行う。2つの template は、ピークの前後 2 ms の範囲で重なり時間を調整して加算する。非類似度として合成した template に関して単位時間あたりの偏差平方和を算出し、バックグラウンドノイズとの比を求めて判定を行うことは MUSKET-A と同様である。図 1 B は、“MURETRV” による重畳波形の分離の例で、template 0 と 1 から合成された template が分離の対象となっているスパイクの形に最も類似していることを示している。

“MURETRV” は、“MUSKET-A” 同様、16 個の template を扱うことができるが、各 template に対して分離できるスパイクの数は 100 個である。

Ⅲ. 分類結果の評価

A. 評価用データ

次の 2 通りのデータに対し “MUSKET-A” と “MURETRV” を適用し、分類結果に検討を加えた。

その 1 つは、安静時の MUAP の認められない EMG をベースノイズとして、既知の波形を加えた人工的な EMG である。加えた波形は、実際の EMG から分離された MUAP の平均波形を用いた。ベースノイズも MUAP も 10 kHz でサンプリングされたものである。人工 EMG は、長さ 3.2 s のベースノイズに 2 種の波形 50

個づつを加算したもので、その内 20% の波形は重畳させず、80% については 2 波形のピーク間隔が 0 ~ 1.9 ms の範囲で互いに重畳させてある。なお、各波形について 100 個の分類結果が得られるように、同じ波形の組み合わせについて、ベースノイズに加算する位置を変えて 2 ファイル作成した。1 ファイルに含ませる個数を 50 個ずつとしたのは、誤分類により 1 波形に分類されるスパイク数がプログラムの限度 (“MURETRV” では 100 個) を越えるのを防ぐためである。この様な 2 種の波形からなる人工的な EMG を、波形間の非類似度 (D/V) を変えて 10 組作成した。作成した 10 組の D/V は 3.76 ~ 202.1 であった。ただし、どの組においても 2 種の波形は、振幅と時間幅が類似したものを選んであり、ピーク振幅の差の \sqrt{V} に対する比は 0.01 ~ 1.54、peak-to-peak time の差は 0 ~ 0.1 ms、波形全体の時間幅の差は 0 ~ 0.3 ms であった。なお、ベースノイズの振幅は、歪度 -0.22、尖度 3.18 で正規分布 (歪度 0、尖度 3) に近い値を示した。

第二の評価用のデータとしては、同じ筋から同時に記録した 2 つの EMG を用いた。2 つの EMG に共通して記録されている運動単位について MUAP 分類を別々に行いその一致率をもとめた。同時記録 EMG の記録電極間の距離は筋の長軸にそって約 3 cm であった。

人工的な EMG のもととなった記録及び同時記録 EMG は、健康成人の下腿三頭筋からタンクステン微小電極を用いて記録されたものである。

B. 分類結果

図 2 は、人工的な EMG の例で、“MUSKET-A” の 2 つの基準に従って分類した結果の一部が示されている。図 2 には、誤分類として、第 1、第 2 の template との D/V がともに基準を満たさないため、第 3 の新しい template に分類された例がみられる。

MUAP が生起時間の誤差 0.1 ms 以内で正しい template に分類された場合を正判定として正判定率を求めた。人工的なデータについての

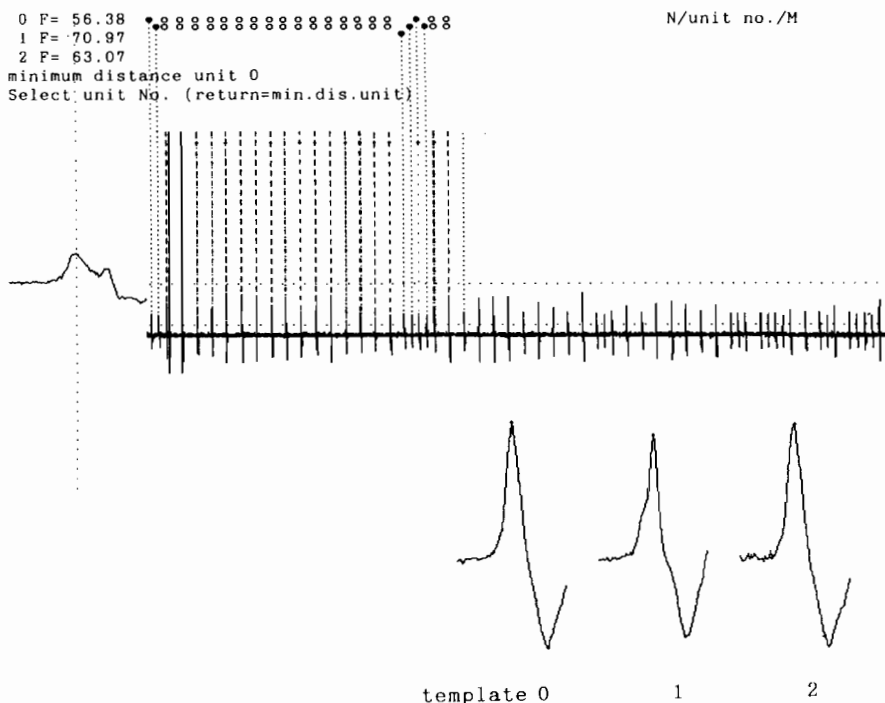


図2. 人工的なEMGと“MUSKET-A”によるMUAPの分類. 長さ3.2sのベースに2種の波形が50個づつ重ねてあり, その内40個づつは互いに重畳している. 分類されたMUAPは点線と●印(単波形)あるいは○印(重畳波形から分離)で示されている. ●○の1段目はユニット0, 2段目はユニット1, 3段目はユニット2である. 画面の左端に現在分離の対象となっているスパイクが表示され, 各templateとのD/Vが“F=”として示されている. EMGの下はtemplateで, 左からtemplate0, 1, 2であるが, ユニット2は本来ユニット0に分類されるべきスパイクが別のユニットとされたものである.

“MUSKET-A”による正判定率は, 全体で82.2%であった. 図3は, “MUSKET-A”の正判定率を10組の波形のD/Vに対してプロットしたものである. D/Vが小さい4組については正判定率は80%に満たないが, D/Vの大きい2組では90%以上が正しく判定された. また, “MUSKET-A”による誤判定は, 2つのMUAPのピークの時間差が0.7ms以内の重畳波形で多くみられた(正判定率は67.8%). しかし, これらの誤分類の大部分は“MURETRV”で修正することが可能で, “MUSKET-A”の結果に対してさらに“MURETRV”を適用したところ, 正判定率は99.5%(98~100%)に上昇した. “MURETRV”は, templateを組み合わせて重畳波形のtemplateを作るため, templateの数が増すと処理時間が極めて長くなるという

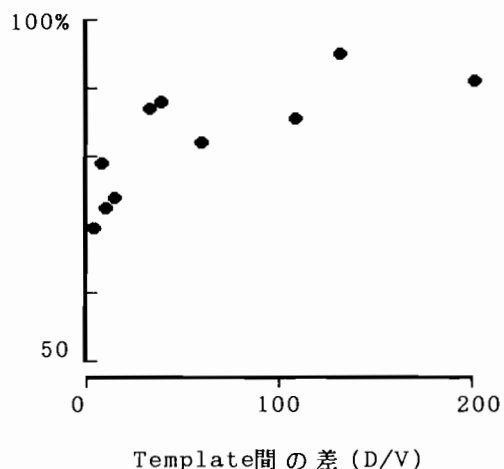


図3. “MUSKET-A”による正判定率とtemplate間のD/Vの関係.

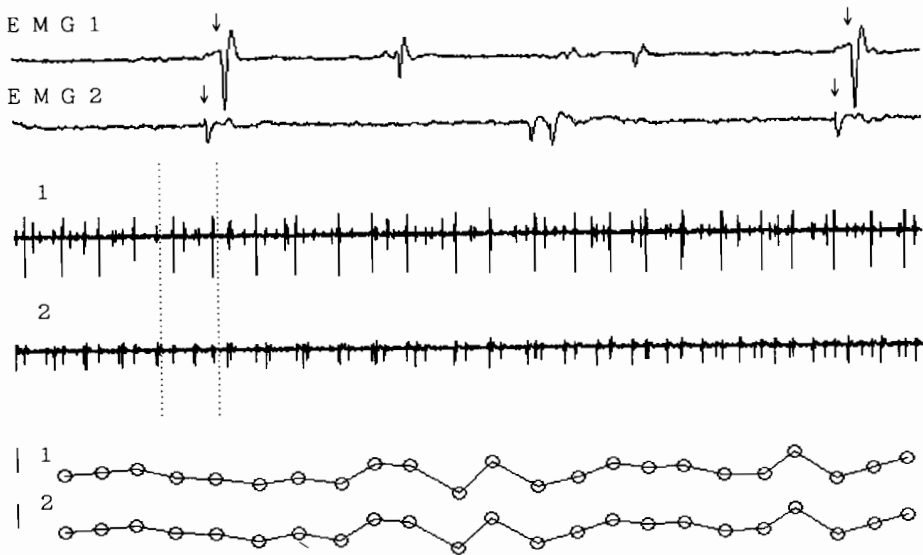


図4. 同時記録されたEMGのMUAP分類. 上段の2つのEMGの矢印で示されたMUAPが共通して観察された. 中段の2つのEMG(長さ3.2s)について, MUAPを分類した結果を瞬時発射頻度として下段に示した. 発射頻度の左端の2本の縦線は, それぞれEMG 1と2の発射頻度の9~10 impulses/sを示している. 上段のEMGは中段の縦の点線の間(200ms)を拡大表示したものである.

欠点があるが, 重なり大きい重畳波形の分離に関しては効果的といえよう.

図4は同時記録されたEMGの例である. EMG 1, EMG 2からそれぞれ3グループのMUAPが同定でき, その内の1グループのMUAPが同じ運動単位のものと考えられた. “MUSKET-A”によるMUAPの分類の一致率は100対のスパイク中85%であった. 誤分類は, 主にMUAPの振幅の低いEMG 2でみられた. “MURETRV”による分類により, 一致率は99%となった. 不一致となった1対は, EMG 2のMUAPが極めて類似した別のtemplate(template間のD/Vは2.10)に分類されたことによるものであった.

template-matchingによるMUAPの正判定率として, Andreassen[4]は99.88%, LeFever et al.[5]は99.8%を報告している. “MUSKET-A”の正判定率は明らかに低く, “MURETRV”によってこれらよりやや低い程度の正判定率に達している. しかし, Andreassenの正判定率は重畳波形を含まないデータ, LeFever et al.の

正判定率は435波形中57個の重畳波形を含むデータによるものであるのに対し, 80%の重畳波形を含むデータによる値である点を考慮すべきであろう. 実際には, 2, 3個の運動単位からのMUAPの80%が重畳することは希で, 図4の例では記録全体でスパイクの重畳は4.2%であった. “MUSKET-A”と“MURETRV”を組み合わせて用いることにより, 実用上問題のないMUAPの分類が可能と考えられた.

(注) 要望があれば, 全プログラムリストを提供する. このソフトウェアは無償ソフトウェアとして公開するが, 著作権は塚原玲子が留保する. 営利を目的としない限り, コピー, 譲渡, 使用は自由である.

文 献

- 1) Schmidt EM: Computer separation of multi-unit neuroelectric data. *J Neurosci Meth* 12:95-111, 1984.
- 2) LeFever RS & De Luca CJ: A procedure for decomposing the myoelectric signal into its consti-

- tuent action potentials-Part I: Technique, theory, and implementation. IEEE Trans Biomed Eng BME-29: 149-157, 1982.
- 3) Studer RM, Figueiredo RJP & Moschytz GS: An algorithm for sequential estimation and system identification for EMG signals. IEEE Trans Biomed Eng BME-31: 285-295, 1984.
- 4) Andreassen S: Computerized analysis of motor unit firing. In: Computer-Aided Electromyography, Prog clin Neurophysiol, Ed Desmedt JE, Karger, Basel, vol 10 pp 150-163, 1983.
- 5) LeFever RS, Xenakis AP & De Luca CJ: A procedure for decomposing the myoelectric signal into its constituent action potentials-Part II: Execution and test for accuracy. IEEE Trans Biomed Eng BME-29: 158-164, 1982.

付 録

MUSKET-A 操作手順の概要

- 筋電図のファイルのあるディレクトリ, 筋電図のファイル名, ファイル番号を入力する.
- もし template のファイルがあれば template の数を入力し, template のファイルを読み込む.
- 筋電図が画面に表示されるので, マウスを使ってバックグラウンドの分散を計算する範囲を指定する.
- バックグラウンドの標準偏差より大きな振幅を持つピークについて, peak-to-peak 振幅 (縦軸) と peak-to-peak 時間 (横軸) の散布図が表示される. スパイクを選ぶ基準として, peak-to-peak 振幅と時間の組み合わせを用いるか, 振幅のみを用いるか選択する. peak-to-peak 振幅と時間を組み合わせる場合は, 散布図上の適当な範囲をマウスを使って指定する. 振幅を用いる場合は, 矢印キーを使って筋電図上の点線を上下させ, 適当な範囲を指定する.
- 見いだされたスパイクが画面左端に表示され, 各 template について f 値が示される. 残差平方和が最小の template が分類の条件を満たせば, その波形がスパイクに重ねて表示される. この時, オペレータは以下の5通りの対応ができる. ①その template に分類する. ②別の template 番号を入力し, その template に分類する. ③新しい template 番号を入力して新たな template とする. ④複合波形として分離を行う. ⑤MUAP としてとりあげない. MUAP として分類されたスパイクには, ①の場合は白丸, ②と③の場合はひし形, ④の場合は中抜き丸で印が付けられる.
- ①と③の場合は template が自動的に更新されるが, ②の場合は template を更新するか否かはオペレータが指示する.
- ④の場合は, 対象としているスパイクが画面左半分, すべての template が右半分に拡大表示される.
 - 最も類似した template がスパイク上に重ねて表示されるので, もし適当なら採用する. 不適当なら template の番号を選び, 必要な場合はピークの位置を矢印キーを使って指定する. あるいは, 順次, 類似度の高い template 表示させ適当なものを選ぶ.
 - 対象の波形から第1の template を算術的に引いた残りの波形について, 最も近い template が表示される. この template をそのまま採用することもできるし, 別の template を選ぶこともできる.
 - この後, 以下の3通りの対応ができる. i) もとの画面 (筋電図全体の表示) にもどる. ii) 2)を繰り返し第3の template をさがす. iii) すでに採用した template を取消して2)を繰り返し, 1)での分類が適当かどうか確認する.
- 次のスパイクについて, 5からの手順がくりかえされる. 筋電図のおわりで, 記録の初めから分類をやり直すかどうか選択する. “やり直す”としたときは, 最初のスパイクに戻って5からの手順がくりかえされる.
- 記録の最後までスパイクの分類を行った後, 任意の部分をマウスで指定し, 7と同様の手順で MUAP の追加, 削除, 分類の修正を行うことができる.
- 各 MUAP の生起時間のファイルを出力する. あるいは, スパイクの分類を破棄し, 再度4からの作業を行うことができる.
- 次のファイル番号の筋電図を読み込み, 4あるいは5から繰り返す.

MURETRV 操作手順の概要

- 筋電図, MUSKET-A によって出力された MUAP の生起時間のファイルのあるディレクトリ, 筋電図のファイル名, 番号を指定し, これらのファイルを読み込む. 筋電図, 各 MUAP の生起した時点, 瞬時発射頻度が画面に表示される.
- もし template が記録されていれば template の数を入力する. のファイルが無ければ, 読み込んだファイルから, 各ユニットに分類されている MUAP を選んで template を作成する.
- マウスを使って, 判定を行う部分の開始時点を指定する. その時点から 50 ms 間の筋電図が時間軸を広げて表示されるので, 矢印キーを使って対象とする波形のピークを指定する. 対象とする波形は画面の左端に表示される. 単一の template, 合成した template とのマッチングはこのピークのまわりで行われる. ここで, 任意の template の番号を指定すると, 合成 template の中ではその template の含まれる合成 template のみとマッチングが行われる.
- 画面左端の波形に重ねて, 単一の template で最も非類似度の小さいもの, 2番目に非類似度の小さいもの, 合成した template で最も非類似度の小さいもの, 2番目に非類似度の小さいものが順に表示される. これらの非類似度も表示されるが, 単一の template, 合成した template の中で最も非類似度の小さいものはアスタリスクをつけて示してある. この中から適当なものを選ぶことができ, またどれも選ばないこともできる.
- すでに分類されていた MUAP が別のユニットとして判定された場合, 変更するかどうか指定する.
- もとの画面に戻る. MUAP のラスタ表示は, 判定が行われる毎に更新されるが, 瞬時発射頻度は更新されない. 次の判定箇所を指定する.
- 判定終了にすると瞬時発射頻度が更新される. 判定結果をファイルするかどうか指定する. その後で, 再び判定作業に戻るかそのまま終了するか, 指定することができる.

Subroutine

