

計測信号で不規則発生する有限長要素波形を 実時間検出

九州工業大学 大学院 情報工学研究院
知能情報工学研究系 助教

永井 秀利

はじめに

- 時間変化する値の時系列を信号波形として捉えて解析するのは極めて一般的なこと
- 信号波形のタイプ ⇒ ざっくり分けると2種類
 - 調べたい内容の特性を**直接的**に表現しているもの
 - より小さな構成要素(**要素波形**)によって特徴付けられているもの

要素波形を含むタイプの信号はかなり多い



その割には、要素波形を直接的に分析することは少ないのでは？

要素波形解析の実例は
なぜ少ない？



要素波形の直接分析はなぜ少ない？

- 簡単に言ってしまうと、**難しいから**
- 要素波形は、
 - 短時間しか存在しなかったり、出現が不規則だったり、
 - 形状が複雑だったり、変動したり、重なり合っていたり、... 等々

やっかいな性質を持つことが多い

- 従来技術の大多数は**こういうものの解析は苦手**なので、

『要素波形解析は諦めて、
もやっとした平均的な特性での分析に甘んじる』

... などというように**妥協**するしかないことも頻繁に生じる

要素波形の直接分析はなぜ少ない？

- 簡単に言ってしまえば、**難しいから**
- 要素波形は、
 - 短時間しか存在しなかったり、出現が不規則だったり、
 - 形状が複雑だったり、変動したり、重なり合っていたり、... 等々

やっかいな性質を持つことが多い

そこで新技術!!

要素波形のリアルタイム解析を諦めずに済むかも

新技術の特徴

- 処理内容としての特徴
 - 単チャネルの信号だけで十分
 - リアルタイムでの処理が可能
 - AI等での根拠不明瞭な推定評価ではなく、単純な信号処理に近い処理
 - 中核となる処理はFPGA化も可能なくらいにシンプル
- 対応能力としての特徴
 - 様々な形状の要素波形に柔軟に対応可能
 - 要素波形としての「波形らしさ」の程度の評価が可能
 - 要素波形として許容される変形の範囲があっても評価可能
 - 要素波形の出現タイミングや振幅がランダムに変動しても対応可能
 - 多数の要素波形が重なり合った信号波形でも対応可能
 - 特徴次第では複数種類の要素波形が混合していても対応可能
 - 周期性のある波形の個々の山を要素波形と見なしての分析も可能

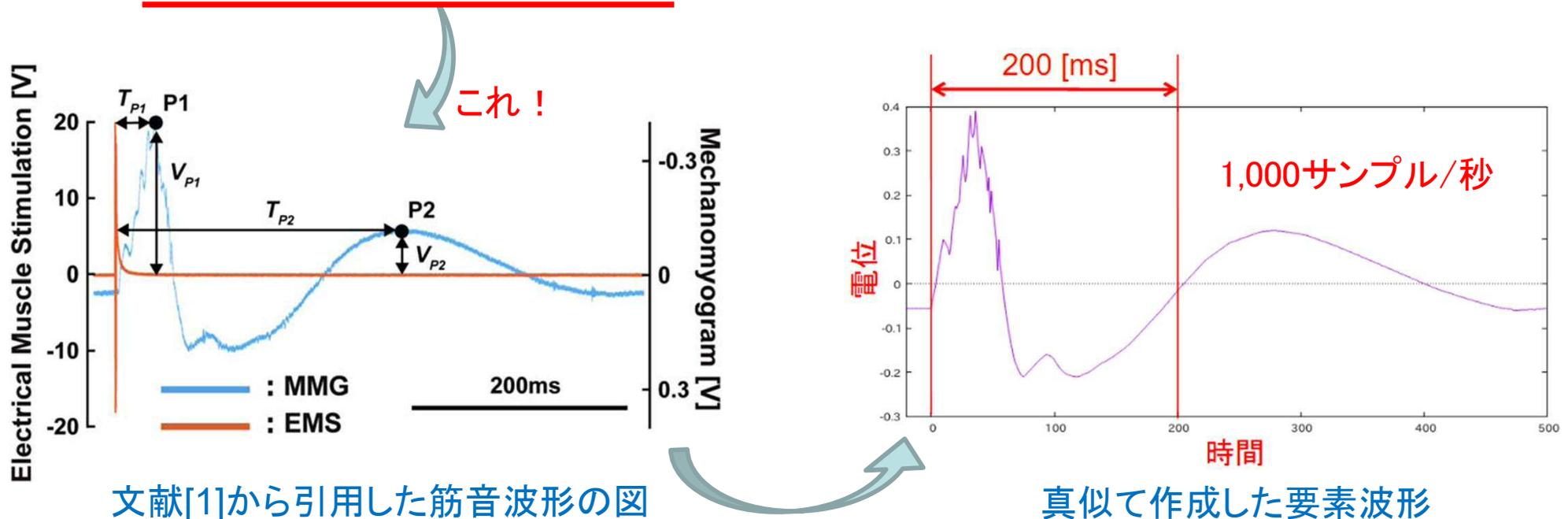


要素波形の観点でのより高度な信号分析の実現に繋がる

人工の要素波形・信号波形で試してみよう

- 人工の波形で波形検出実験 ⇒ 人工の波形なら「正解」情報あり
- 簡単な課題では面白みがない ⇒ 無茶にならない範囲で難しく！
 - 周期性を持たない要素波形 ← FFTが不得手なタイプ
 - 不規則時間間隔で重畳あり ← 規則性や閾値での検出が使えない

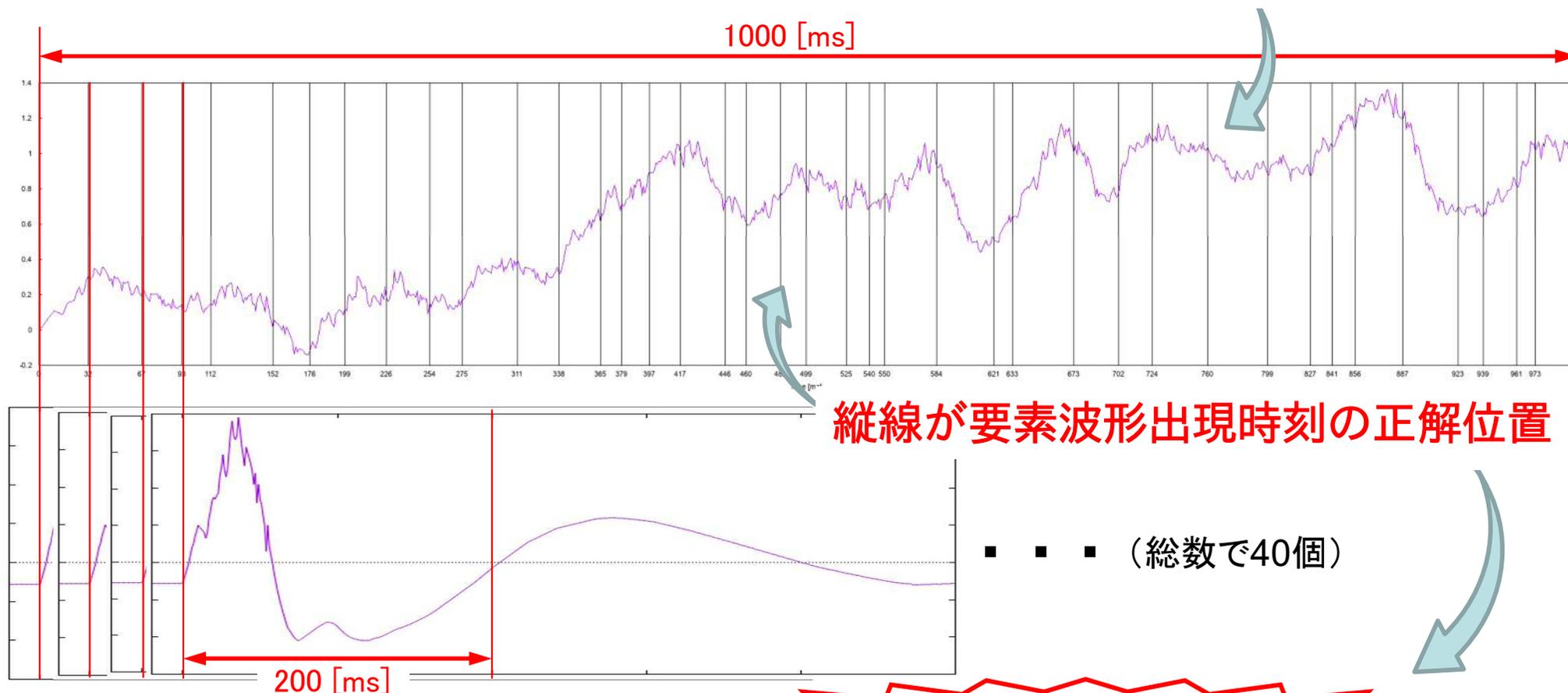
電気刺激時の筋音波形を真似て人工の要素波形としてみる



[1] Evaluation method for muscles, measuring mechanomyogram induced by electrical muscle stimulation using lead zirconate titanate-based acoustic sensor, Japanese Journal of Applied Physics 58, SLLD11 (2019)

課題となる人工の信号波形

- 要素波形を足し合わせることで信号波形を作成
 - 振幅と出現時間間隔をランダムに変更しつつ、高密度に足し合わせ



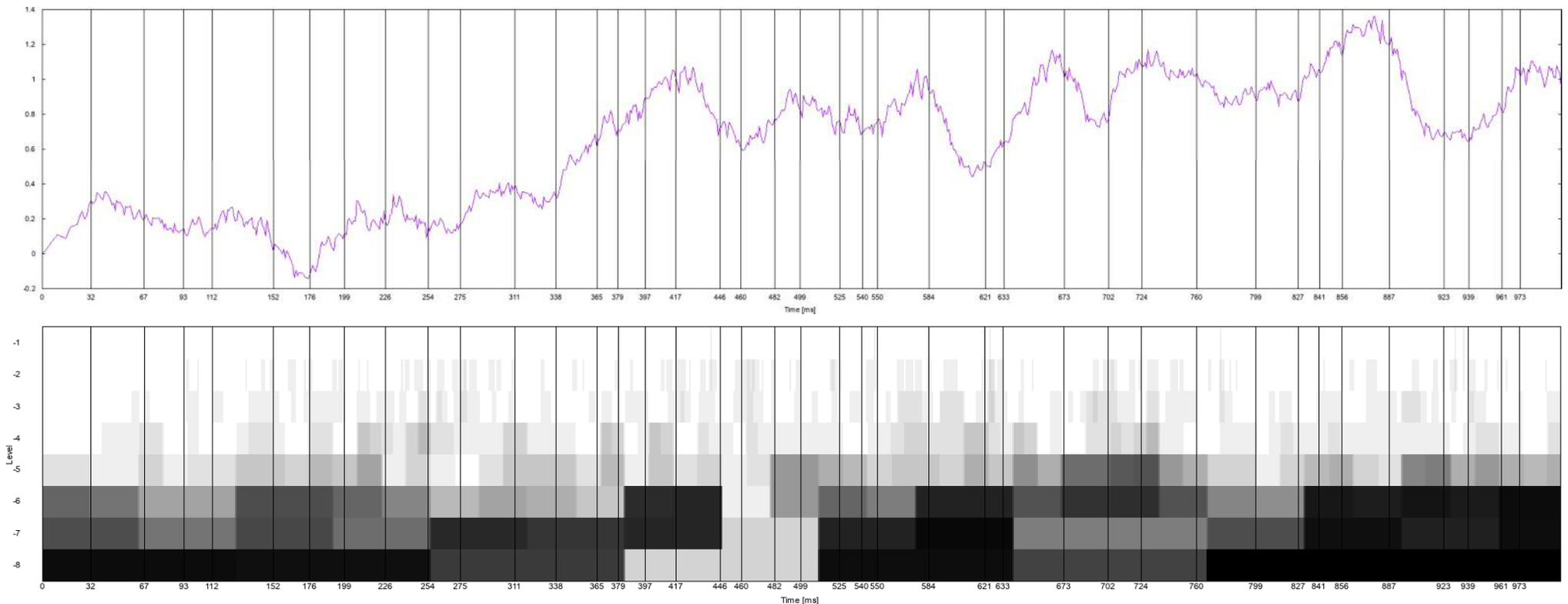
(振幅も変動)

これを見つけるのが課題!!

従来技術で解析してみるとどうなる？

■ 取り敢えずは周波数解析

- 要素波形の時間間隔は、狭いところだと10 [ms] (= 10サンプル)
- FFTでは厳しそう ⇒ ウェーブレット解析(多重解像度解析)ではどう？

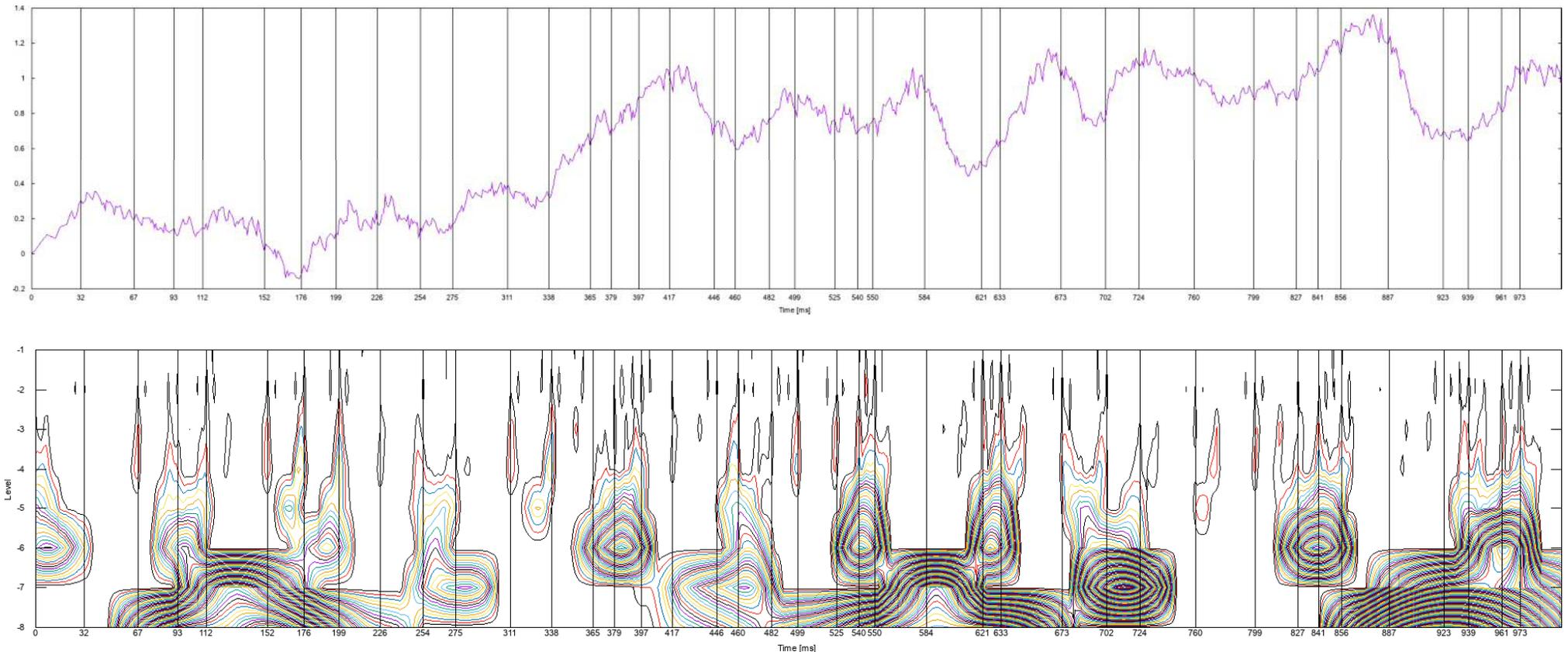


多重解像度解析結果の濃淡図

要素波形出現時刻との関係性は見いだせない

新技術に基づく可視化

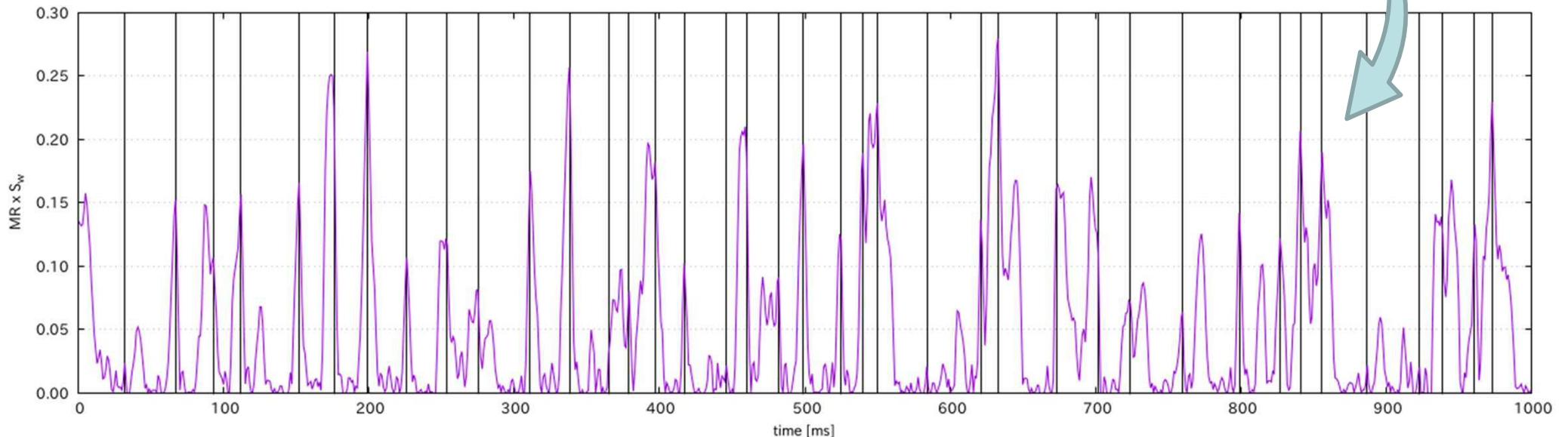
- 新技術を用いて解析した結果に基づき、要素波形の存在を可視化
⇒ 要素波形存在時刻との間に強い関係性あり
雨垂れ状の塊が要素波形の存在を示唆



※ 可視化についてはリアルタイム処理の対象外

新技術による要素波形の検出

- 要素波形の顕著な成分特徴をキーとして波形らしさを評価
- 要素波形として望ましい特性を補助特徴量として重み付け



- 基本的には局所ピーク位置を要素波形存在時刻として検出
⇒ 2種類の閾値で検出量をコントロール

人工の波形における検出数

Threshold block, zero	Success	Found in block (ave of time-diff)	Failure	Not found
0.04, 0.01	25	9 (1.56)	27	6
0.04, 0.02	23	11 (1.73)	17	6
0.06, 0.01	25	9 (1.56)	20	6
0.06, 0.02	23	11 (1.73)	11	6
0.08, 0.01	24	8 (1.62)	15	8
0.08, 0.02	22	10 (1.79)	8	8
0.10, 0.01	21	8 (1.62)	12	11
0.10, 0.02	20	9 (1.70)	6	11

※ 総数は40個

- “Found in block” ⇒ 評価値の山の中での近接位置において検出
 - 評価値の山は要素波形の存在時間内での値の時間変化に依存
 - 平均の検出位置ずれは2サンプル未満
- ⇒ 検出成功と見なしてもいいのでは？

人工の波形における検出精度 (F値)

完全一致のみを正解とした場合

近接検出も成功とした場合

Threshold block, zero	Found in the same block ⇒ failure		
	Precision	Recall	F-measure
0.04, 0.01	0.41	0.63	0.50
0.04, 0.02	0.45	0.58	0.51
0.06, 0.01	0.46	0.63	0.53
0.06, 0.02	0.51	0.58	0.54
0.08, 0.01	0.51	0.60	0.55
0.08, 0.02	0.55	0.55	0.55
0.10, 0.01	0.51	0.53	0.52
0.10, 0.02	0.57	0.50	0.53

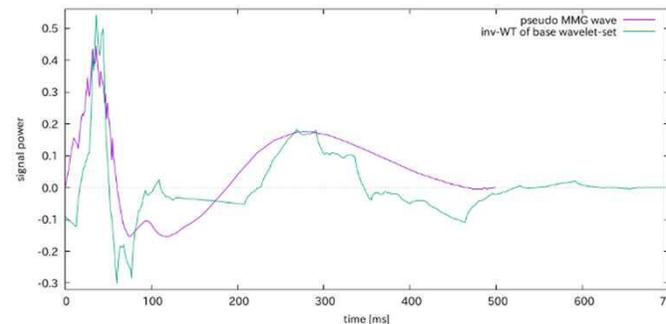
Threshold block, zero	Found in the same block ⇒ success		
	Precision	Recall	F-measure
0.04, 0.01	0.56	0.85	0.67
0.04, 0.02	0.67	0.85	0.75
0.06, 0.01	0.63	0.85	0.72
0.06, 0.02	0.76	0.85	0.80
0.08, 0.01	0.68	0.80	0.74
0.08, 0.02	0.80	0.80	0.80
0.10, 0.01	0.71	0.73	0.72
0.10, 0.02	0.83	0.73	0.77

- 完全一致のF値が0.55, 近接検出を許容した場合のF値が0.80
 - 課題の難しさとリアルタイム実行が可能な処理であることを鑑みれば, 8割の検出成功は十分に高精度と言えそう
- ↓
- 得られる精度は, 対象とする要素波形と信号波形の性質に依存
 - 有効性ありと捉えるか, 役に立たない精度と見るかは利用目的次第

要素波形の復元

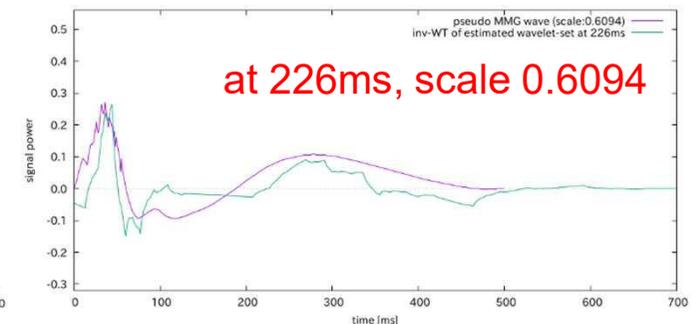
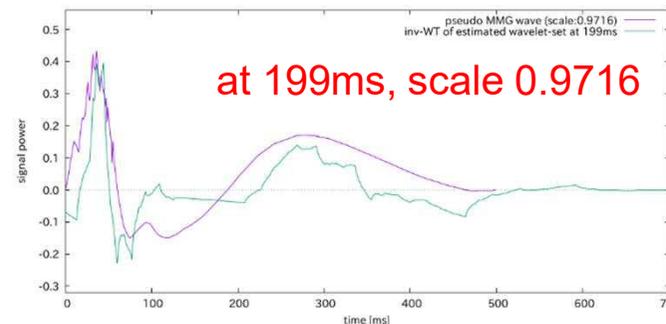
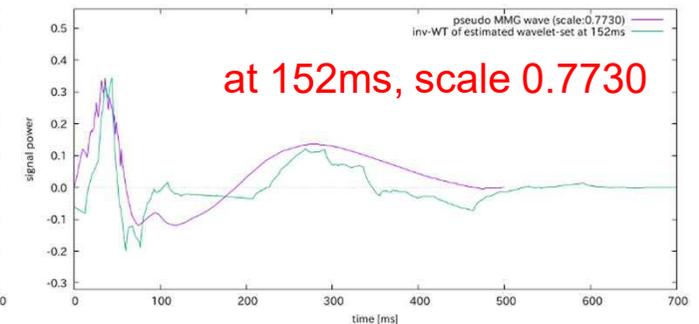
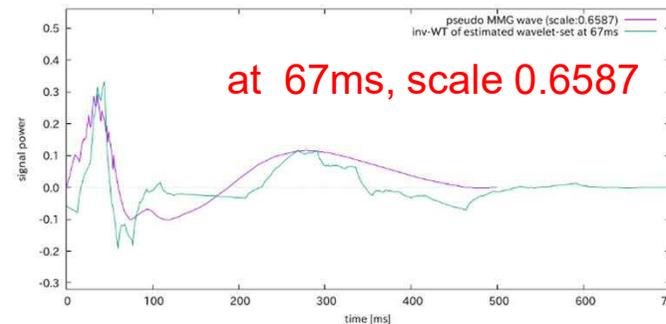
- 要素波形検出には顕著な特徴のみを利用
- 必要なら, 成分補完して波形の復元を試みることも可能
⇒ 復元波形の品質は補完用フィルタの設計に依存

- 作成した要素波形と
検出用特徴からの
復元波形



- 検出成功位置での
合成波形と復元波形

振幅も良好に捕捉



現実の信号波形における新技術実証例

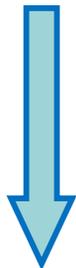
- 筋肉 = 多数の運動単位(一つの神経が支配する筋繊維の束)で構成
- 筋活動 = 多数の運動単位の活動の積み重ねで形成



本来であれば、筋活動の分析は運動単位活動の視点で行うべき

- 表面筋電: 筋活動を電氣的に捉える際に極めて一般的に利用

表面筋電信号 = 個々の運動単位活動電位波形の重畳



||
運動単位活動が励起された時に生じる単発の波形
= 表面筋電信号の要素波形

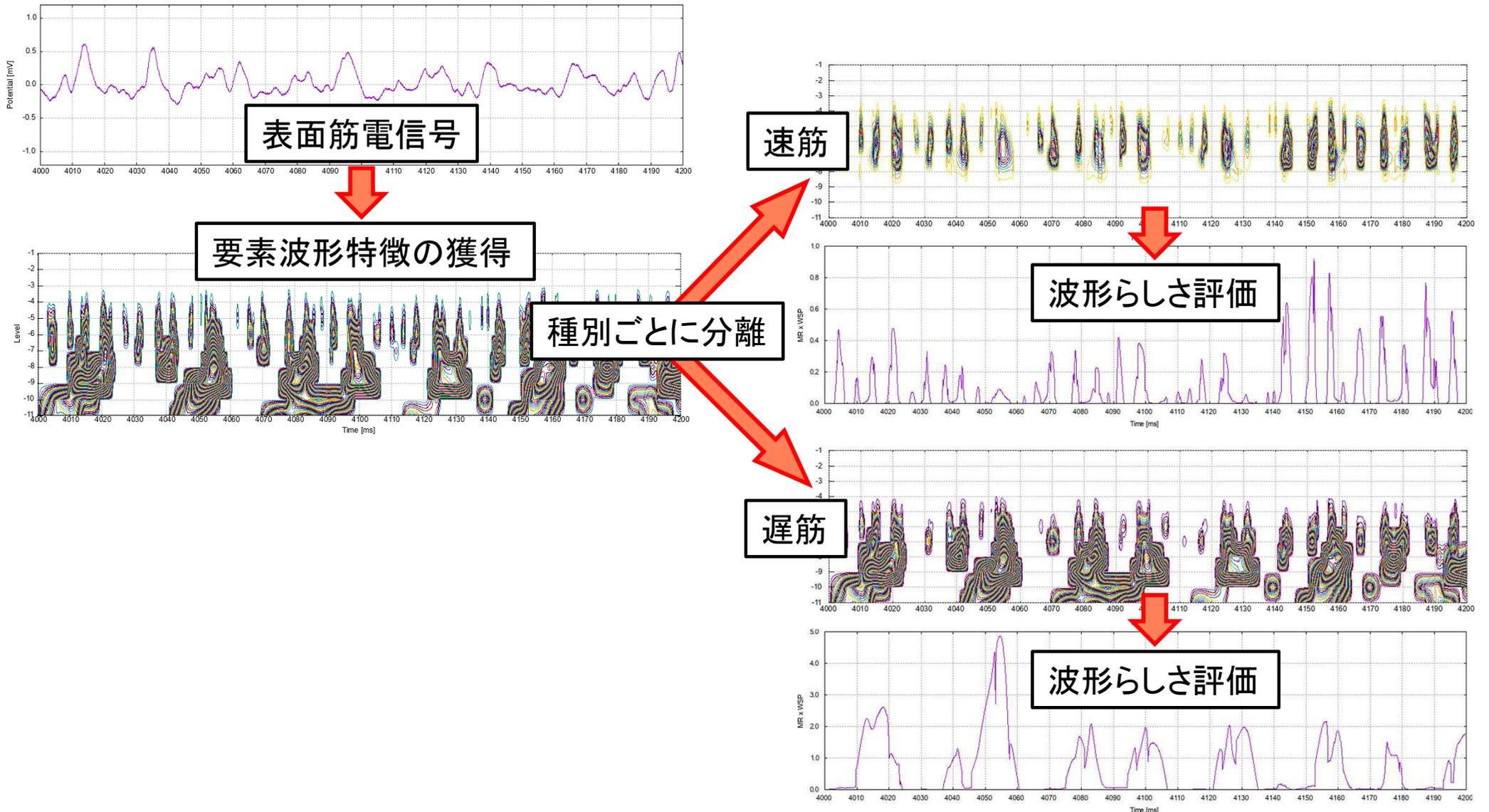
従来技術では表面筋電信号から運動単位活動を抽出できない



表面筋電信号の解析に新技術を適用

新技術による運動単位活動電位波形の検出

- 単チャンネルの表面筋電信号から速筋と遅筋の運動単位ごとに検出



新技術によって表面筋電活用にもたらされたもの

■ 従来技術

- 針筋電 ⇒ 電極刺入位置付近の局所的な運動単位活動電位は精度よく計測できるが、筋全体の活動把握はほぼ不可能
- 表面筋電 ⇒ 筋全体の活動を大まかに捉えることはできるが、それを成している運動単位活動は捉えられない

■ 新技術

- 精度は劣るが、表面筋電から針筋電に準じた運動単位活動情報を獲得
⇒ 従来技術での表面筋電と針筋電との中間的な情報
- **筋全体の活動を運動単位活動レベルで把握**できるようになったことで、
 - ✓ 負荷変動がある状況での筋疲労影響の評価
 - ✓ 筋疲労が無視できない状況での高精度な筋発揮力評価
 - ✓ 現在の負荷および筋状態において余力がどの程度あるかという新たな評価などの、**従来は不可能だった評価を実現**

新技術に基づくことでなぜ可能に？

- 従来技術での表面筋電に基づく筋活動分析
⇒ 表面筋電信号の振幅に基づく評価が一般的



新技術によって運動単位活動電位波形を捉えられるようになったことで初めて運動単位活動の変化を分析可能に

- 運動単位活動の励起頻度や励起タイミングの片寄り・集中
- 筋繊維疲労の影響による運動単位活動電位波形の低周波数化

新たに可能となった運動単位活動分析

筋発揮力や筋疲労の高品質・高精度な評価，従来にない新たな評価が可能に

想定される用途と企業への期待

■ 想定される用途

- 信号波形を要素波形に分解しての詳細分析
- 発生タイミングや形状に関する異常検知
- 稀に発生する波形の検知

など、短時間だけ出現、存在する波形の検知能力向上や、そのような波形の特性に基づいた解析や分析

汎用的な手法であるため、幅広い対象に応用可能

■ 企業への期待

- 表面筋電信号への適用については有効性を確認済
⇒ 解析ソフトウェアや計測機器の製品化につなげたい
- 新技術が有効に機能しそうな活用対象の提案
⇒ 要素波形の実時間分析が可能となることで、新たな知見・活用が見込めそうな対象は、表面筋電信号以外にもあるはず
- その他、新技術の活用に関する共同研究の実施

新技術に関する知的財産権

■ その1

- 発明の名称 : 信号波形解析システム及びそのプログラム
- 出願番号 : 特願2020-215284
- 公開番号 : 特開2022-100970
- 出願人 : 国立大学法人 九州工業大学
- 発明者 : 永井 秀利

■ その2

- 発明の名称 : 成分波形抽出システム、成分波形抽出方法及びコンピュータを成分波形抽出システムとして動作させるプログラム、並びに信号解析システム、信号解析方法及びコンピュータを信号解析システムとして動作させるプログラム
- 出願番号 : 特願2022-105826 (優先権主張番号 特願2021-200605)
- 公開番号 : 特開2023-086656
- 出願人 : 国立大学法人 九州工業大学
- 発明者 : 永井 秀利

お問い合わせ先

- 国立大学法人 九州工業大学
先端研究・社会連携本部 産学イノベーションセンター
知財コーディネータ 楯 純生
- TEL: 093-884-3499
- FAX: 093-884-3531
- E-mail: chizai@jimu.kyutech.ac.jp