

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04555

研究課題名(和文)心肺停止患者の心電図波形解析に基づく電気的除細動の効果予測システムの検証

研究課題名(英文) Verification for practical use of prediction systems of the effect of electrical defibrillation based on analysis of electrocardiograms

研究代表者

大屋 英稔(Oya, Hidetoshi)

東京都市大学・情報工学部・教授

研究者番号：30361835

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題の目的は、心肺停止患者の心電図波形解析に基づく除細動適用成否予測システム(基盤研究(C)，17K06505)の実用化に向けた検証を行うことである。そのため、まず種々の心電図波形データをウェーブレット解析し、自己心拍再開例や心室細動再発例などを特徴づけるパラメータ(特徴量)を抽出するとともに、これらの特徴量に対し、どの特徴量が予測に効果的であるのかを解析し、寄与率の高い特徴量を用いた場合には従来と比較して10%以上の精度向上を確認した。なお、得られた成果の一部については、国内学会、および国際会議で発表し、2023年度にも権威ある国際会議、および国際的なジャーナル論文に投稿予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題は、「心電図波形解析に基づく除細動適用成否予測システムの構築(基盤研究(C)，17K06505)」で開発を進めてきた予測システムの実用化に向けた検証を主目的としている。提案する予測システムは、心停止患者の心電図波形を解析することによって電気的除細動の成否を予測する機能を有するという従来にはない学術的な側面のみでなく実用面においても独創的なものあり、提案する予測システムの実用化に向けた検証、および改良が十分になされれば、電気的除細動や心肺蘇生、薬物投与など、医療従事者に処置選択の補助材料を提供し心肺停止患者の蘇生率向上に大きく寄与することが出来るという大きな意義のあるものである。

研究成果の概要(英文)：The goal of this study is to evaluate the effectiveness and usefulness for prediction systems (Grant-in-Aid for Scientific Research (C), 17K06505) for the effect of electrical defibrillation based on analysis of electrocardiograms which are obtained from patients suffering from sudden cardiac arrest.

In order to achieve our purpose, firstly various types of electrocardiograms obtained from patients such as non-resumable cases, recurrent cases of ventricular fibrillation and so on have been analyzed. Moreover, on the basis of analysis results, we have extracted effective feature parameters for prediction, and the connection between electrocardiogram waveforms and some states such as success for electrical defibrillation, recurrence of ventricular fibrillation and so on have been examined. Some of the obtained results have been presented in domestic/international conferences, and we are preparing manuscripts which will be submitted to prestigious international journals.

研究分野：制御理論，生体信号処理，システム工学

キーワード：除細動適用成否予測システム 自己心拍再開 心室細動再発 電気的除細動 特徴量抽出 ウェーブレット解析

1. 研究開始当初の背景

AED には心停止患者から得られる心電図波形を解析し、除細動を適用すべき波形か否かを判定するためのアルゴリズムが内蔵されており、その精度評価には、「感度」と「特異度」という指標が用いられる。既存の AED では、心室細動や自己心拍(正常洞調律)ではほぼ 100% の精度で識別が可能となっており、AED が普及していなかった頃には 1 か月後の患者の社会復帰率が約 18% であったのに対し、AED を適用することによって約 36% にまで向上したといわれている。しかしながら、現状の AED では、2 [Hz]以下の心室頻拍を除細動適用外と判定してしまうなど、課題も残されている。このような心電図波形の識別に関する研究は、従来から進められており、申請者らも時間-周波数解析が可能なウェーブレット変換を用いて心肺停止患者の心電図波形を解析し、得られた解析結果に基づき、除細動を適用すべきか否かを柔軟、かつ高い精度で識別が可能なシステムの構築・検証を進め、従来は識別が困難であった要除細動波形に対しても高精度で識別することが可能となった(基盤研究(C): 22560402, 25420443)。一方、除細動適用後に心電図波形が正常洞調律とならず、「心静止」や非常に振幅の小さい「無脈性電気活動」となってしまう場合もある。このような場合、自己心拍再開率は、心静止よりも心室細動の方がはるかに高いため、より不利な状況に陥ることになってしまう。すなわち、このような場合には除細動適用よりも心肺蘇生法を優先させた方が、蘇生率が高くなると考えられる。

以上で述べた除細動の効果が有効であるか否かという問題については、除細動前の患者の状態、すなわち除細動前の心電図波形の状態遷移が大きく関連していると考えられるため、申請者らは「心電図波形解析に基づく除細動適用成否予測システムの構築(基盤研究(C), 17K06505)」を進めてきた。具体的には、まず時間-周波数解析が可能なウェーブレット変換を用いて心電図波形の状態を特徴付けるパラメータ(特徴量と呼ぶ)を抽出し、得られた特徴量に対して機械学習・パターン認識手法等を援用することによって、自己心拍を再開した場合、すなわち除細動が効果的に働いたことを意味する「除細動成功」、除細動適用後に正常洞調律に戻るがその後心室細動に移行する「心室細動再発」、除細動適用後も心室細動のままであることを意味する「除細動失敗」の 3 つのパターンについて予測を行うシステムを構築した。ただし、構築したシステムでは、「除細動成功」、あるいは「除細動失敗」については 100% で判定を行うことが出来ているが、「心室細動再発」については正しく判定が出来ておらず、また「除細動適用後の心静止や無脈性電気活動」に関する予測という課題も残されていた。更に、実用化を考えた場合、より多くの検証用データに対して精度評価を行うことも必要であった。本研究課題では、申請者らが進めてきた除細動適用成否予測システムの高精度化を図り、その性能を評価して実用性を検証した。

2. 研究の目的

本研究課題は「心電図波形解析に基づく除細動適用成否予測システムの構築(基盤研究(C), 17K06505)」で開発を進めてきた予測システムの実用化に向けた検証を主目的としている。具体的には、「心室細動再発や除細動適用後の無脈性電気活動など、临床上重要なパターンを考慮した上で判定を行い、心停止患者の蘇生率向上により貢献し得る予測システム構築」、②「より多くの検証用データを用いて評価を行い、予測精度向上と高速化を図る」という 2 点を主目的とした研究課題である。提案する予測システムは、心停止患者の心電図波形の状態を監視し、その状態遷移に基づいて除細動の成否を予測する機能を有する従来にない学術的な側面のみでなく実用面においても独創的なものであり、提案する予測システムの実用化に向けた検証、および改良が十分になされれば、電氣的除細動や心肺蘇生、薬物投与など、医療従事者に処置選択の補助材料を提供し心肺停止患者の蘇生率向上に大きく寄与することが出来るという点で社会的にも非常に意義のあるものである。提案する予測システムの検証が進むことは、心電図波形の状態遷移と心肺停止患者の自己心拍再開や心室細動再発などとの関連性が明らかになることを意味し、このことは学術的にも大変有用な成果となる。

3. 研究の方法

本研究課題の主目的は、申請者らが進めてきた心肺停止患者の心電図波形解析に基づく除細動適用成否予測システムの構築(基盤研究(C), 17K06505)における成果の実用化にある。目的を達成するために、3年計画で以下の 2 点に絞って研究を推進した。

(1) 「除細動の効果予測システムの実用化に向けた検証」

University Ventricular Tachyarrhythmia Database (CU Database)、ならびに杏林大学病院高度救命救急センターにおいて記録・集積された心電図波形データに対し、自己心拍再開例や非再開例(心静止、心室細動再発等)など整理・分類し、心電図波形の状態の遷移と患者(生体)の状態との関連性、すなわち心電図波形の状態がどのように遷移している場合に除細動が効果的なのか、あるいは心室細動が再発してしまうのかといったことを詳細に検討した(有効なパターン抽出と特徴量抽出)。次いで、得られた結果を提案する除細動効

果予測システムに組み込み、実用化に向けた検証、ならび高精度化・高速化を図った。具体的には、自己心拍再開例や非再開例における心電図波形の特徴量を抽出するとともに、得られた特徴量がどのように予測に寄与するのかを検討した。さらに、サポートベクターマシン (SVM: Support Vector Machine) によって選定した特徴量を学習し、提案する除細動適用成否予測システムの有効性を検証した。

(2) 「日本人、及び外国人の心電図波形データの特徴の検討」

(1)と並行して外国人、及び日本人の心電図波形データの特徴を整理し、その差異を検討した。またその結果を申請者が構築した心電図波形高精度識別システム(基盤研究(C), 25420443)に組み込むことで、識別精度への影響を検討した。

なお、本研究課題の推進体制は、表1のようになっており、研究代表者、研究分担者(中野)が工学的な面から、研究協力者(宮内、五十嵐)が医学的な面から取り組む医工連携研究となっており、双方の視点から見た有用性・問題点を検討できる体制となっている。またシステム開発のサポートとして企業のエンジニア(岡井)の協力も得た。

表1：本研究課題の推進体制

	氏名	役割
研究代表者	大屋	研究統括、及び心電図波形解析、及び予測アルゴリズムの検証
研究分担者	中野	心電図波形の解析、及び予測アルゴリズムの構築
研究協力者	宮内	解析結果、及び予測アルゴリズムの医学的検証
	五十嵐	解析結果、及び予測アルゴリズムの医学的検証
	岡井	心電図波形の解析、およびシステム開発(実用化)のサポート

4. 研究成果

本研究課題では、申請者が取り組んだ「心電図波形解析に基づく除細動適用成否予測システムの構築(基盤研究(C), 17K06505)」において開発を進めてきた予測システムを検証するとともに、実用に耐え得るようにカスタマイズすることを主な目的としており、予定していた作業を完了し、目的を達成した。

初年度は、提案する除細動適用成否予測システムの検証を行うために、まず杏林大学病院高度救命救急センターで記録された心電図波形データ、ならびにCU Databaseに記録されている心電図波形データを解析し、自己心拍再開例、非再開例における心電図波形を特徴づけるパラメータ(特徴量)を検討・抽出した。またこれまでに開発した除細動適用成否予測システムについて、その精度、ならびに計算時間などについて検証を行った。前年度までに開発したシステムにおいては、その予測精度が十分でなく改善する必要があったため、2年目には心電図波形の特徴量を再度検討するとともに、得られた特徴量から予測に寄与する特徴量を選定検証した。また電気的除細動適用後の患者の容態と心電図波形の状態遷移についても調査し、その評価方法、ならびに外国人と日本人の心電図波形の特徴の差異について検討した。

図1, 2に心室細動, 正常洞調律の心電図波形の一例を示す。また, 図3, 4に除細動成功時の心電図波形の一例と除細動失敗時の心電図波形の一例を示す。これらの図では、横軸が時間[sec], 縦軸は電圧[mV]となっている。図3, 4では、16~17[sec]付近で大きく変動しており、この部分が除細動を実施したことを意味している。図3では、除細動適用後に自己心拍を再開し、心電図波形は正常洞調律となっているが、図4では自己心拍を再開せず再び心室細動となっている。このような各心電図波形における特徴を捉えるために NSI(Normalized Spectrum Index)などの特徴量を抽出した。また図5に図1(心室細動)の心電図波形から得られたスカログラム, 図6に図5から得られた NSI(Normalized Spectrum Index)を示す。NSIは申請者らによって提案され、次式のように定義されたものであり、図6からわかるように NSIも時系列信号となる。

$$NSI(k) = \frac{\sum_{l=1}^L E(k,l) f_r(l)}{\sum_{l=1}^L E(k,l)}$$

ここで、 $E(k,l)$ は時刻kにおける第l番目の周波数成分のエネルギー、 $f_r(l)$ は第l番目の周波数成分を示している。なお、NSIの他、SDW(Scale Distribution Width)、ポアンカレプロット、エントロピーに基づく特徴量など、様々なパラメータについて検討した。また検討した特徴量のうち、どの特徴量が予測に大きく寄与するのか、すなわち除細動の効果予測に寄与する特徴量の選定については、²検定の独立性の検定に基づく手法を採用し、選定された特徴量を用いて SVM を学習させて予測精度の検証を行った。

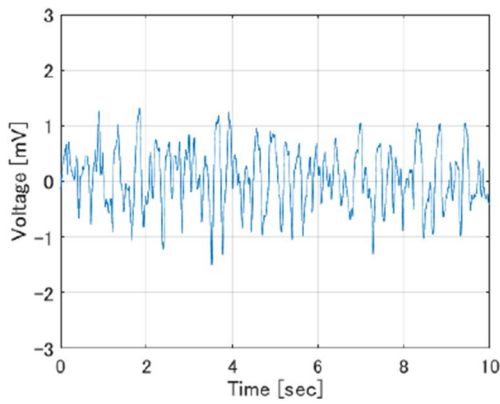


図 1：心室細動の一例

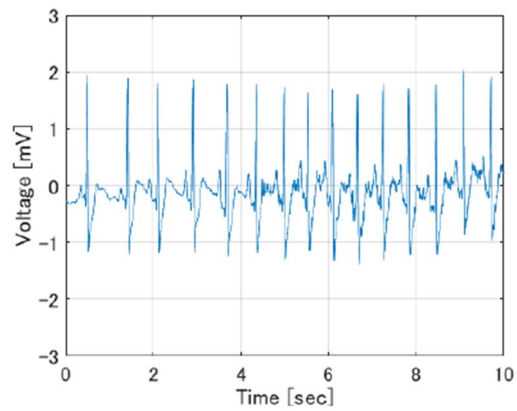


図 2：正常洞調律の一例

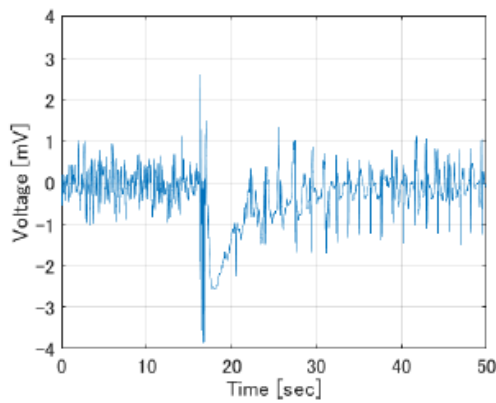


図 3：除細動成功時の心電図波形の一例

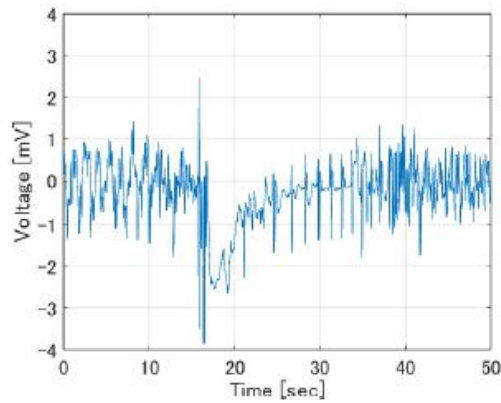


図 4：除細動失敗時の心電図波形の一例

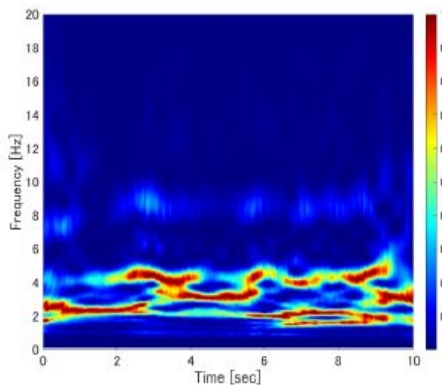


図 5：図 1 から得られたスカログラム

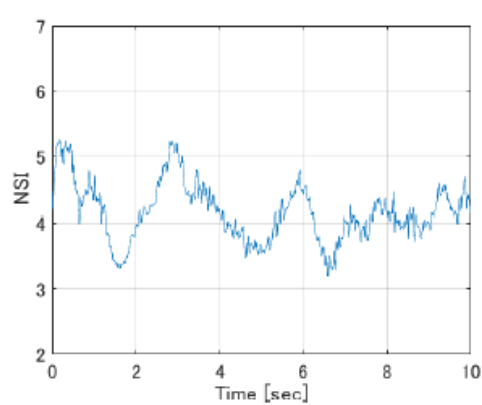


図 6：図 5 から得られた NSI

本研究課題で提案する予測システムにおいては、心停止状態の心電図波形に対する電氣的除細動の結果として、「除細動成功」、「除細動失敗」、および「VF 再発」の 3 種類について予測を行っている。ここで、「除細動成功」は心電図波形が心室細動 (VF) となっている患者に対する電氣的除細動後に自己心拍を再開 (心電図波形が正常洞調律 (SR) に移行) し、その後に再度 VF に戻ることがないことを意味している。また「除細動失敗」は、電氣的除細動後も心電図波形が SR に戻らず、VF のまま変化しないこと、「VF 再発」は、VF 波形の患者に対する電氣的除細動後に心電図波形が SR に戻ったものの、その後に再度 VF となってしまうことを意味している。すなわち、「除細動成功」、「除細動失敗」、および「VF 再発」は、同時には起こり得ない相互に排他的な事象であることに注意されたい。

最終年度である 2022 年度には、これまでに開発を進めてきた除細動適用成否予測システムにおいて、より高精度で予測が可能であることを確認した。提案する予測システムでは、心電図波形の状態遷移と除細動適用後の患者の容態については、閾値処理や LDA よりも高い識別性能を持つことが知られている非線形サポートベクターマシン (SVM: Support Vector Machine) を採用しており、SVM に用いる特徴量については心電図波形そのものを識別する手法に用いられている特徴量を含め、先行研究で用いられている特徴量以外に多くの特徴量を採用し、² 検定を用いてどの程度予測に寄与するのかを検証した。さらに、SVM においては、カーネル関数

を線形, RBF (Radial Basis Function), 多項式 (2 次 ~ 5 次) の 6 パターンを検討し, 正規化パラメータについて 5 パターンを検証した。

以上のような作業を実施し, 本研究課題でこれまでに開発を進めてきた予測システムの精度が従来に比べて大きく向上 (10% 以上) したことを確認した。本研究課題では, 提案する予測システムにおいて, 感度・特異度 80% 以上を目的としており, 感度・特異度ともに 93% 以上を達成することが出来た。また同時に外国人における心電図波形と日本人における心電図波形の特徴の差異についても継続して検討した。更に, 申請者らが進めてきた「ウェーブレット解析に基づく心電図波形高精度識別システムの構築・検証(基盤研究(C), 22560402, 25420443)」にも本研究課題で得られた成果を組み込むことにより, より高精度で要除細動波形を識別が可能であることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takayuki Okai, Shonosuke Akimoto, Hidetoshi Oya, Kazushi Nakano, Hiroshi Miyauchi, Yoshikatsu Hoshi	4. 巻 23
2. 論文標題 A New Recongnition System Based on Gabor Wavelet Transform for Shockable Electrocardiograms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Life Sciences International	6. 最初と最後の頁 1 - 12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9734/jalsi/2020/v23i1230203	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Takayuki Okai, Shonosuke Akimoto, Hidetoshi Oya, Kazushi Nakano
2. 発表標題 Development of A New Recognition System Based on Support Vector Machines for Shockable ECGs and Its Performance Analysis
3. 学会等名 The 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuta Yoshikawa, Takayuki Okai, Hidetoshi Oya, Yoshikatsu Hoshi, Kazushi Nakano
2. 発表標題 A Prediction System for the Effect of Electrical Defibrillation Based on Efficient Combinations for Feature Parameters
3. 学会等名 The 11th International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shonosuke Akimoto, Hidetoshi Oya, Yoshikatsu Hoshi, Takayuki Okai, Kazushi Nakano, Hiroshi Miyauchi
2. 発表標題 Development of the Detection System Based on Support Vector Machine for Shockable ECGs
3. 学会等名 The 8th IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉川雄大, 岡井貴之, 大屋英稔, 星義克
2. 発表標題 心肺停止患者に対する電氣的除細動の効果の予測
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉川雄大, 岡井貴之, 大屋英稔, 星義克
2. 発表標題 ボアンカレプロットを考慮した電氣的除細動の効果の予測
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉川雄大, 岡井貴之, 大屋英稔, 星義克
2. 発表標題 サポートベクターマシンに基づく要除細動波形識別システム
3. 学会等名 第66回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉川雄大, 岡井貴之, 大屋英稔, 星義克
2. 発表標題 ウェーブレット変換を用いた要除細動波形の特徴解析及び電氣的除細動の効果の予測
3. 学会等名 第66回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋元 爽之介, 岡井 貴之, 大屋 英稔, 星 義克
2. 発表標題 サポートベクターマシンを用いた要除細動波形識別システムの構築
3. 学会等名 第65回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	中野 和司 (Nakano Kazushi) (90136531)	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・名誉教授 (12612)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	宮内 博 (Miyuchi Hiroshi)		
研究 協力者	五十嵐 昂 (Igarashi Takashi)		
研究 協力者	岡井 貴之 (Okai Takayuki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------