論文

カオス的アプローチによる不整脈判別法[†]杉浦 敏文^{*1} 五百旗頭 正^{*2} 村田 昌司^{*2} 小山 雅也^{*2}

健康な人の心拍数は幅広いスペクトルを示し、そのアトラクタはカオスの軌道を持ち、病的状態では心拍数の変動が周期的になる事が知られている。また、埋め込み式除細動器は、ペースメーカ本体を胸壁皮下あるいは胸筋下に、または腹壁皮下あるいは腹直筋下に埋め込み、心室細動などの調和のとれていない心室の電気活動や、これ以外の不整脈、たとえば心室性頻拍や上室性頻拍などを検出し、これを素早く除去する事を目的としている。現在の埋め込み式除細動器で採用されている不整脈の検出方法は、大きく分けて脈拍あるいは周期に注目するものと、心電図波形に注目するものがありこれらを単独または組み合わせて用いているが必ずしも満足するものではない。

本論文では、はじめに従来の解析手法と埋め込み式除細動器の問題点に簡単に触れる。つぎに、筆者等が提案するカオス的アプローチについて説明し、最後に実データに適用した結果と今後の課題について述べる。

キーワード：カオス、局所ファジィ再構成、除細動器、不整脈、頻拍、細動、リアプノフ指数、フラクタル次元

1. はじめに

不整脈の判別法の研究は、致死的不整脈の代表である心室細動(VF: Ventricular Fibrillation、以降 VF と記述)を識別する為に行われてきた。心室細動は、心室が心室のさまざまな場所からバラバラに興奮する事により起こり、有効な心拍出量を確保できなくなる状態で、数分間で脳死に至るものである。

Bach ら(1)の調査によれば、形態学的アプローチによる研究としては、Lin(2)や Pannizzo ら(3)による FFT を用いた周波数領域分析法(frequency domain analysis)、Tomaselli ら(4)による心室電位の最大変化率や“Peak-Peak”を用いた形状抽出法(feature extraction)、テンプレートマッチング法(template matching)や差分領域法(area of difference method)などがある。また、Langberg ら(5)はテンプレートマッチング法と差分領域法を組み合わせた方法を提案している。この方法では測定条件(サンプリングレート、フィルター定数、サンプリングウインドウ)を適切に選べば 100%識別可能であると報告しているが、これは正常と VF 以外の不整脈である心室性頻拍(VT: Ventricular Tachycardia、以降 VT と記述)の判別結果である。しかしこれらの方法はいずれも判別パラメータのチューニングを必要としたり 100%の判別結果

が得られないといった問題がある。また、VT や上心室性頻拍(SVT: Supra Ventricular Tachycardia)を判別する上で優れた結果を得る事ができるものに、相関波形分析法(6)-(8) (correlation waveform analysis)があるが計算量が多すぎて埋め込み式除細動器(ICD Implantable Cardioverter/Defibrillator、以降 ICD と記述)に組み込むのが困難である。

現在 ICD で用いられている判別方法は、脈拍あるいは周期に着目したものは、基本的に周期が一定であるか不安定であるかを判断基準にしているが、以下のような問題点がある。

- (1) 一般に VF は正常に比べて周期が短く不規則であるが例外もある。
- (2) VT は毎分 150~200 程度、VF はそれ以上とされているがこれも絶対でない。
- (3) VT は正常に比べ周期が速く変動が少ない。これも絶対ではない。
- (4) 洞性頻脈の始まる時の周期変化は比較的穏やかであるのに対し、VT の始まりは突然である。

また、波形解析としては心電図波形の基線部分の水平部分がどの程度あるかを判断基準にする方法があるが、正常電位図は等電位部分が多いが、VF ではほとんどない。また VT でも一部の例外を除いて同様の事が言えるが、心内誘導波形そのものが使用する電極および検出位置により大きく異なるという問題がある。

ところで健康な人の心拍数は幅広いスペクトルを示し、そのアトラクタはカオスの軌道を持ち、病的状態では心拍数の変動が周期的になる事が知られている(9)-(11) また筆者らは、既に水車発電機の振動波形の

[†] A Method for Discrimination of Arrhythmia by Chaotic Approach

Toshifumi SUGIURA, Tadashi IOKIBE, Shoji MURATA and Masaya KOYAMA

^{*1} 静岡大学電子工学研究所

Research Institute of Electronics, Shizuoka University

^{*2} 株式会社明電舎システム技術部

System Technology Division, Meidensha Corporation

ダイナミクスの変化をカオス的アプローチにより数値的に捉え、水車発電機の異常診断への適用を行ってきた(12) これと同様に正常時の心電図波形のもつダイナミクスが異常時になると変化する事に注目し、カオス的アプローチによる判別法を提案するとともに、正常と VT および VF の識別のために心電図解析に適用した結果を以下に示す。

2. カオス的アプローチによる判別法

ある時系列データがカオス的かどうかの判別方法は、その定義により異なるが、参考文献(13)–(17)に示すように研究者の立場により様々である。しかし、Ott によるカオスの定義(15)に基づいたカオスの判別手法(18)は計算機処理上、実用的である。これは観測した時系列データをスペクトル解析を行い、幅広い周波数帯を持つ事、自己相関関数が遅れ時間の増加と共にゼロに収束する事、最大リアプノフ指数が正である事でカオスかどうかを判別するものである。しかし現実我々が実世界から観測しうる時系列データは、周波数成分比が無理数のトラスからカオスに至るものが大半で、特に自己相関関数が遅れ時間の増加と共にゼロに収束するものは極めて少ない。また ICD に内蔵する為には、正常か異常かのみならず不整脈の種類を何らかの数値として識別する必要がある。

上述した理由から筆者らは、正常時と異常時の心室電位の時系列データのダイナミクスの変化を、タケナスの埋め込み定理(19)を用いて、もとの時系列データの位相的性質を保存する最適埋め込み次元および最適遅れ時間、最大リアプノフ指数およびフラクタル次元の変化から求める方法を提案する。最適埋め込み次元の推定は Grassberger と Procaccia による相関次元に基づく方法や(20)、Sugihara と May による再構成モデルによる予測値と実測値との相関係数を用いる方法などがある(21)。また、最適遅れ時間を求めるには自己相関関数が最初にゼロになる時刻を遅れ時間とする方法が提案されている(22)。我々は、最適埋め込み次元および最適遅れ時間は、観測された元の心室電位の時系列データの持つ位相的性質を最も良く保存するものが必要であるため、Sugihara と May の方法に似た、元の時系列データを用いて、埋め込み次元と遅れ時間を変化させ再構成モデルによる予測値と実測値の相関係数が最も高くなる場合の埋め込み次元と遅れ時間を採用している。なお、予測手法として五百旗頭らの局所ファジィ再構成法(23)(24)を用いた。

3. 心電図データへの応用

心電図は心臓の活動電流を記録するもので、不整脈

と病態の解析、虚血性心筋障害の診断、心肥大・拡張の診断などを目的としている。筆者らは、犬の心室電位を 256 Hz で測定した時系列データを用いて、2 節で提案したカオス的アプローチにより、その波形から正常、VF および VT の識別を試みた。実際に使用したのは表 3.1 に示すように心内誘導、第 II 誘導それぞれ 5 種類であるが、図 3.1 に心内誘導による時系列データ 3 種、図 3.2 に第 II 誘導による時系列データ 3 種を示す。なお、第 II 誘導の正常データは人間のものである(人間も犬も基本的には同じ波形を示すため)。

具体的には、各々の時系列データをその位相的性質を保存できる多次元状態空間に埋めこんだ時の、次元

表3.1 最適埋め込み次元と遅れ時間

心内誘導		
種別	埋め込み次元	遅れ時間
正常	9	5
VF1m	2	2
VF2m	2	2
VF3m	2	2
VT160m	9	6
VT200m	7	6

第 II 誘導		
種別	埋め込み次元	遅れ時間
正常	9	2
VF1m	2	2
VF2m	2	2
VF3m	2	2
VT160m	8	6
VT200m	6	2

図3.1 心内誘導で観測した時系列データ

図3.2 第 II 誘導で観測した時系列データ

数と遅れ時間の比較、正常時の再構成状態空間に VF および VT を埋めこんだ時の最大リアプノフ指数およびフラクタル次元の比較を行った。

各データにおける最適埋め込み次元および遅れ時間を表 3.1 に示す。またそれぞれのアトラクタを図 3.3 から図 3.8 に示す。

つぎに、64 データ毎の最大リアプノフ指数の変化を図 3.9～図 3.10 に、フラクタル次元の変化を図 3.11～図 3.12 に示す。

以上の結果から心内誘導、第 II 誘導ともに正常時と VF、VT では、表 3.1 からは最適埋め込み次元および遅れ時間に明かな違いがあり、またそれぞれのアトラクタからもダイナミクスに明かな差異が見られる。また、最大リアプノフ指数を比較する事により正常と VT のグループと VF を分離する事ができ、フラクタル次元を比較する事により VT と VF のグループと正常を分離する事が可能であると言える。なお、図 3.11 の正常値のグラフが 600 から 700 で大きく変化しているのは、図 3.13 の正常値データの大きな周期が 600 から 700 に存在しているためと考えられる。

図3.3 心内誘導で観測した正常時のアトラクタ

図3.4 心内誘導で観測したVFのアトラクタ

図3.5 心内誘導で観測したVTのアトラクタ

図3.6 第II内誘導で観測した正常時のアトラクタ

図3.7 第II誘導で観測したVFのアトラクタ

図3.8 第II誘導で観測したVTのアトラクタ

図3.9 心内誘導での最大リアプノフ指数の変化

図3.13 第II誘導で観測された正常データ

図3.10 第II誘導での最大リアプノフ指数の変化

図3.11 心内誘導でのフラクタル次元の変化

図3.12 第II誘導でのフラクタル次元の変化

4. まとめ

本論文では、カオス的振る舞いをする時系列データのダイナミクスの変化が、正常時と異常時では異なる事に注目し、観測された時系列データからその対象が正常であるか異常かをカオス的アプローチにより、熟練者による観測波形やそれから得られるアトラクタなどを図形的に判断するのではなく数値的に判別する手法を提案した。

そして、本手法を犬の心電図を用いて不整脈の判別に適用した。この結果、3節に示すように最大リアプノフ指数とフラクタル次元を併用する事により、正常、VFおよびVTを分離可能である事を示した。また一回の計算に使用したデータ数は64で、これは250 msecで判定が可能ということを示している。なお、フラクタル次元による判定には少なくとも過去のデータを700個以上記憶するためのメモリが必要である。

今後の課題として、多数の事例についての検証と、如何に少ないデータで判定が可能かの調査およびICDにインストールする為の問題の把握と解決がある。

参考文献

- (1) S.M. Bach and J.C. Hsung : "Implantable Device Algorithms for Detection and Discrimination of Tachyarrhythmia", The Implantable Cardioverter/Difibrillator (eds. E. Alt and J.C. Griffin), Springer-Verlag, pp.67-81(1992)
- (2) D. Lin, L.A. Dicarlo and J.M. Jenkins : "Identification of ventricular tachycardia using intracavitary ventricular electrograms : analysis of time and frequency domain patterns", PACE 11 : pp.1592-1606(1988)
- (3) F. Pannizzo and S. Furmans : "Frequency spectra of ventricular tachycardia and sinus rhythm in human intracardiac electrograms application to

- tachycardia detection for cardiac pacemakers", IEEE Trans. Biomed. Eng.35, pp.421-425 (1988)
- (4) G.F. Tomaselli, A.P. Nielsen, W.L. Finke, L. Singupta, J.C. Clark and J.C. Griffin: "Morphologic differences of the endocardial electrogram in beats of sinus and ventricular origin", PACE 11, pp.254-262 (1988)
- (5) J.J. Langberg, W.J. Gibb, D.M. Auslander and J.C. Griffin: "Identification of ventricular tachycardia with use of the morphology of the endocardial electrogram", THERAPY AND PREVENTION, Vol.77, No.6, pp.1363-1369, June (1988)
- (6) C.L. Feldman, P.G. Amazeen, M.D. Klein et.al.: "Computer detection of ventricular ectopic beats", Comput. Biomed. Res. 4, pp.666-674 (1971)
- (7) R. Arzbaecher, P. Biancalana, T. Stibolt, G. Masek and R. Dean: "Computer technique for detection of cardiac dysrhythmias", J. Adv. Med. Instrum. 5, pp.104 (1971)
- (8) J. Jenkins, D. Wu and R. Arzbaecher: "Computer diagnosis of supraventricular and ventricular arrhythmias", Circulation 5, pp.977-987(1979)
- (9) A.L. Goldberger, D.R. Rigney and B.J. West: "Chaos and fractals in human physiology", Sci. Am., 262(2), pp.42-49(1990) ", (西江弘 訳著: "身体の中のカオスとフラクタル日経サイエンス, 244(4), pp.56-65(1990))
- (10) 西江弘: "生命現象を説明するカオス", 日経サイエンス, 246(3), pp.34-39(1992)
- (11) 西江弘: "生理機能系のカオス", 応用カオス(合原一幸編著), サイエンス社, pp.327-354 (1994)
- (12) 藤本泰成, 村田昌司, 谷村隆義, 五百旗頭正: "異常診断へのカオスの応用", 日本ファジィ学会関東支部第4回ワークショップ講演論文集, 1995/3/8, pp.54-57(1995)
- (13) Y. Oono and M. Oshikawa: "Chaos in nonlinear difference equations. I-Qualitative study of (formal) chaos", Progr. Theo. Phys., 64, pp.54-67(1980)
- (14) R.L. Devaney: "An introduction to chaotic dynamical systems, (Benjamin/Cummings Publishing, Menlo Park, 1986) (後藤憲一訳, 「カオス力学系入門」, 共立出版 (1987))
- (15) E. Ott: "Strange attractors and chaotic motions of dynamical systems", Rev. Modern Phys., 53-4/1, pp.655-671(1981)
- (16) H.G. Schuster: "Deterministic chaos - An introduction (2nd, ed.), (VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1989)
- (17) P. Berge, Y. Pomeau and C. Vidal: Order within chaos - Towards a deterministic approach to turbulence, (John Wiley and Sons, New York, 1984)
- (18) 片山立: "カオス応用研究のための開発ツール", 合原一幸, 五百旗頭正編著: カオス応用システム, pp.56-81, 朝倉書店 (1995)
- (19) F. Takens: "In Dynamical Systems and Turbulence", (eds. Rand and Young), Springer, Berlin, pp.366-381 (1981)
- (20) P. Grassberger and I. Procaccia: "Characterization of strange attractor", Phys. Rev. Letters, 50, pp.346-349 (1983)
- (21) G. Sugihara and R. May: "Nonlinear forecasting as a way of distinguishing chaos from measurement error in time series", Nature, 344(9), pp.734-741 (1990)
- (22) 片山洋志, 市瀬夏洋: "カオスを見る", 合原一幸編: カオスセミナー, pp.31-54, 海文堂 (1994)
- (23) T. Iokibe, M. Kanke, Y. Fujimoto and S. Suzuki: "Short-term Prediction on Chaotic Timeseries by Local Fuzzy Reconstruction Method", In Proc. of the 3rd International Conference on Fuzzy Logic, Neural Nets and Soft Computing, 1994/8/1-8/7, Iizuka, Japan, pp.491-492 (1994)
- (24) 五百旗頭正, 菅家正康, 藤本泰成, 鈴木新悟: "カオスの時系列の短期予測のための局所ファジィ再構成法", 日本ファジィ学会誌, Vol.7, No.1, pp.186-194 (1995)

(1995年5月22日 受付)

(1995年10月9日 受付)

[問い合わせ先]

〒103 東京都中央区日本橋箱崎町36-2

リバーサイドビル

五百旗頭 正

TEL : 03-5641-7507

FAX : 03-5641-9303

著者紹介

杉浦 敏文 (すぎうら としふみ)

静岡大学電子工学研究所 助教授

1979年 静岡大学大学院電子科学研究科修了, 工学博士. 同年 同大学院医用電子工学講座助手. 主として心臓ペースメーカー, マイクロ波ラジオメトリによる無侵襲体内分布推定に関する研究に従事. 1985年より現職. 1993年 博士(医学). 日本心臓ペースング学会, 日本人工臓器学会, 日本エム・イー学会, 日本ファジィ学会, 日本ハイパーサーミア学会, 電子情報通信学会, IEEE各学会員.

五百旗頭 正 (いおきべ ただし)

㈱明電舎 システム技術部システム開発課主任技師

1974年 大阪工業大学工学部電気工学科卒業. 博士(工学). 同年, ㈱明電舎入社. 主としてファジィ, ニューロ, カオスの産業応用研究に従事. 第39回オーム技術賞受賞, 1995年度日本ファジィ学会論文賞受賞. 計測自動制御学会, 日本ファジィ学会, 電気学会, IEEE各学会員.

村田 昌司 (むらた まさし)

㈱明電舎 システム技術部システム開発課

1991年 日本大学工学部機械工学課卒業. 同年, ㈱明電舎入社. 主としてカオス, GAの産業応用システムの研究に従事. 日本ファジィ学会会員.

小山 雅也 (こやま まさや)

㈱明電舎 システム技術部システム開発課

1994年 東京都立科学技術大学工学部機械システム工学科卒業. 同年, ㈱明電舎入社. 主としてニューロ, カオスの産業応用研究に従事. 日本ファジィ学会会員.

A Method for Discrimination of Arrhythmia by Chaotic Approach

by

Toshifumi SUGIURA, Tadashi IOKIBE, Shoji MURATA and Masaya KOYAMA

Abstract :

In a healthy state, the human heart beat shows an extensive spectrum and its attractor has a chaotic orbit. However, in a damaged state, fluctuations in the heart beat become periodical. An, Implantable Cardioverter / Defibrillator (ICD), along with an implanted pace maker unit in either the subcutaneous chest wall, or subpectoral or subcutaneous abdomen, or sub-muscles rectus abdomen serve to detect abnormalities as follows and eliminate them quickly. The abnormalities affected include : ventricular fibrillation (non-regulated electrical activity in a ventricle) and other arrhythmia, such as, ventricular tachycardia (VT) or supra ventricular tachycardia (SVT). There are two methods for detecting arrhythmia available with the present ICD. One is to investigate the heart beat or period, and the other is to investigate the electrocardiographic wave. However, the employment of these techniques, either singly or in combination doesn't always reach the accuracy that is needed. At first, this paper describes traditional analysis methods and the problems of ICD in brief. Subsequently, it covers the chaotic approach. Finally, the results suitable for real testing, as well as future topics, are given.

Keywords : Chaos, Local fuzzy reconstruction, Implantable cardioverter/defibrillator(ICD), Lyapunov exponents, Fractal dimension, Arrhythmia, Ventricular fibrillation, Ventricular tachycardia

Contact Address : **Tadashi IOKIBE**

System Technology Division, Meidensha Corporation

Riverside Building, 36-2 Nihonbashi Hakozakicho Chuo-ku Tokyo 103 Japan

TEL : 03-5641-7507

FAX : 03-5641-9303