

心表面興奮伝播図の自動表示

The computerized display of epicardial mapping

小林 弘明
岩瀬 孝明
三崎 拓郎
岩 喬
船田 哲男*

Hiroaki KOBAYASHI
Takaaki IWASE
Takuro MISAKI
Takashi IWA
Tetsuo FUNADA*

Summary

The epicardial mapping is necessary for the surgical treatment of drug-resistant cardiac arrhythmia. The procedure for the epicardial mapping consists of three stages: 1) recording of heart potentials, 2) extraction of excitation transmission time, and 3) display of epicardial mapping.

In this paper, our new microcomputer-based system was discussed. It was achieved by this system to simplify the method for the extraction and to make the colorgraphic display of epicardial mapping.

Two methods for extraction were used in this study to compare with manual operation: 1) D method; extracting the time, when the differentiated wave takes maximal potential, and 2) Wi method; extracting the time of $\sum_{n=1}^{200} n|x'(n)|^{2i} / \sum_{n=1}^{200} |x'(n)|^{2i}$ ($i=1, 2, 3$).

Results: 1) similar epicardial excitation maps were obtained by these computerized methods, and 2) the most approximate values of the transmission time was obtained by Wi ($i=2$) method.

Key words

Epicardial mapping Computerized display Surgical treatment of cardiac arrhythmia
Epicardial excitation time

はじめに

心臓電気生理に関する研究の進歩に伴い、WPW 症候群、心室性頻拍症などの難治性不整脈に対して外科的療法が試みられるようになってき

ている。とくに WPW 症候群については、1968 年 Cobb ら¹⁾、1969 年岩ら²⁾が手術根治例を報告して以来、多くの成功例が報告され今や確立された治療法となっている³⁾。しかし、これらの手術にあたっては、術前の電気生理学的諸検査に加え

金沢大学医学部 第一外科
金沢市宝町 13-1 (〒920)
*金沢大学 工学部
金沢市小立野 2-40-20 (〒920)

The Department of Surgery, Kanazawa University
School of Medicine, Takara-machi 13-1, Kanazawa
920
*The Faculty of Technology, Kanazawa University,
Kodatsuno 2-40-20, Kanazawa 920

Presented at the 21st Meeting of the Japanese Society of Cardiovascular Sound held in Tokyo, September 14-15, 1980

Received for publication October 17, 1980

て、術中の心表面興奮伝播図の作成が不可欠のものである⁴⁾。

この心表面興奮伝播図の作成の過程は、①心表面上にあらかじめ設定された多くの測定点からの心臓電位波形の記録、②えられた電位波形からの興奮伝達時間の抽出、③心表面展開図上への伝播図の作図、という3段階より成り立ち、従来はすべて人手を介して行われていた。我々はこれらの作業の効率化をめざして、一昨年来、ミニコンピュータを中心とした②の自動計測、③の作図のための実験的システムの開発を行い、手作業による結果とよく一致した、しかも客観性のある伝播図の作成に成功した^{5,6)}。

しかし、このシステムにおいては、興奮伝達時間の抽出の段階で電位波形のパターンを代表的な5つのパターンに分類する方法を採っており、多くの時間を要するという問題点があった。この欠点を克服する目的で、抽出アルゴリズムの簡素化に務め、マイクロコンピュータを導入し、その結果、自動計測の高速化、伝播図のカラー表示が可能となった。

本稿では、この新システムの概要を紹介し、併せて臨床例での適用結果について述べる。

方 法

1. ハードウェア構成 (Fig. 1)

本システムのハードウェアは、SORD製マイクロコンピュータ M 223 Mark II (容量 64 KB) を中心としたものであり、350 KB のミニフロッピーディスク 2 台、12 ビット、16 チャンネルの A-D 変換器、カラーグラフィックディスプレイを接続している。フロッピーは電位波形の集録、心表面形態や測定点座標の記憶などに用いられる。コマンド入力はコンソールを介して行われる。A-D 変換器は 2 チャンネルを使用することとし、データレコーダーと接続されている。カラーグラフィックディスプレイは A-D 変換された波形の表示、および作成された心表面興奮伝播図を表示するために用いられ、ライトペンにより心表面上の座標の指定が行われる。

2. 興奮伝達時間の計測

心表面電位波形は、心表面上の約 70 カ所の測定点より、直径 0.5 mm、電極間距離 2 mm の近接双極電極を用いて順次誘導され、基準電位波形とともに、いったんデータレコーダに集録される。この電位波形を A-D 変換器 2 チャンネルを使用して、サンプリング時間 1 msec 量子化レベル 12 ビットで 2 秒間のデジタル波形とする。

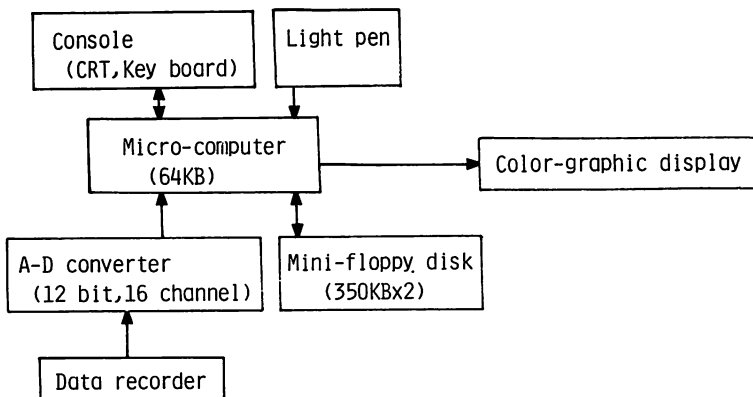


Fig. 1. The hardware of the system for computerized display of epicardial mapping.

つぎに、2秒間のデジタル波形を 40 msec ずつの 50 フレームに分割し、各フレームの電位の絶対値の最大値を求めて、その時間的変化をカラーグラフィックディスプレイ上に棒グラフの形で表示する (Fig. 2)。ここで、グラフに規則性が認められる場合には、抽出すべき波形が収録されているものと考えてアクセプトライトペンを用いて4個以内の範囲で、時間計測すべき波形のフレーム号を指定する。こうして指定されたフレームを中心として 200 msec の間のデジタル波形が順次カラーグラフィック上に表示されるので、この波形から基準時刻と興奮到達時刻を自動抽出することとなる (Fig. 3)。

以前のミニコンピューターによる方法 (以下 P 法と略) では⁴⁻⁶⁾、心表面電位波形を ① R (または S) 型, ② RS (または SR) 型, ③ RSR' (または SRS') 型, ④ RsR' (または SrS') 型, ⑤ RS 部分に notch を有する型または以上のいずれにも属さない型の5群に分類し、おのおの①では主棘の頂点を、②ではRS部分のもっとも急峻な部分を、③,④では波形中央部の頂点

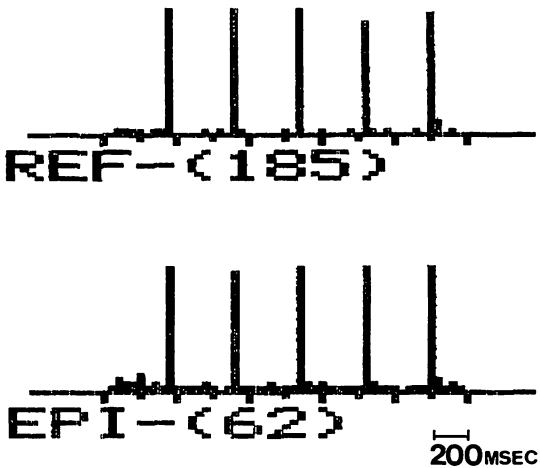


Fig. 2. A histogram of potential signals.

The height of bar explains maximal potential in a wave packet of 40 msec.

REF=reference potential; EPI=epicardial potential.

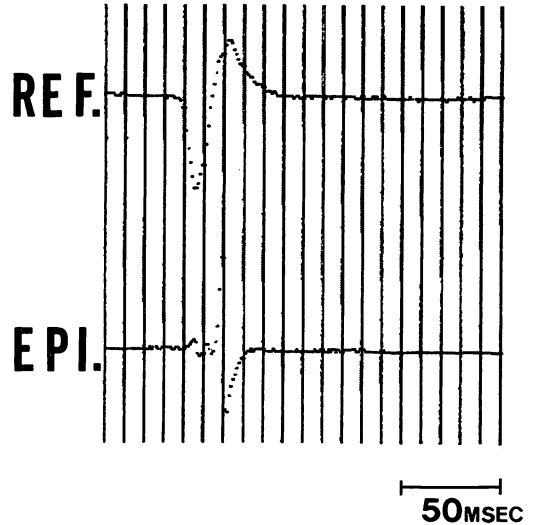


Fig. 3. Potential signals.

REF=reference potential; EPI=epicardial potential.

を、⑤ではRS部分の notch を興奮到達時点とみなして時間抽出を行っていた。したがって、このさいの波形分類のために多くの時間を要した (Fig. 4)。

今回、抽出時間を短縮するために、心表面電位波形に関して波形分類を省略したいくつかの抽出法を試みた。

基準時刻 t_r の抽出は、単極誘導波形では下向きの振れが最大となる時点、双極誘導波形ではもっとも急峻に波形が変化する時点 (微分波形の最大点) をもって基準時刻とした。

各測定点における興奮到達時刻 t_e の抽出に関してはつぎのとおりである (Fig. 4)。第一法 (以下 D 法と略称) はデジタル波形を微分フィルターにかけ、えられた微分波形の絶対値が最大となる時点と興奮到達時刻とする方法、第二法 (以下 W_i 法と略称、ただし $i=1, 2, 3$) は微分波形の瞬時値の2乗、4乗あるいは6乗を重みとする重心を算出し、この時点と興奮到達時刻とする方法であり、つぎの式によって定義されるものである。

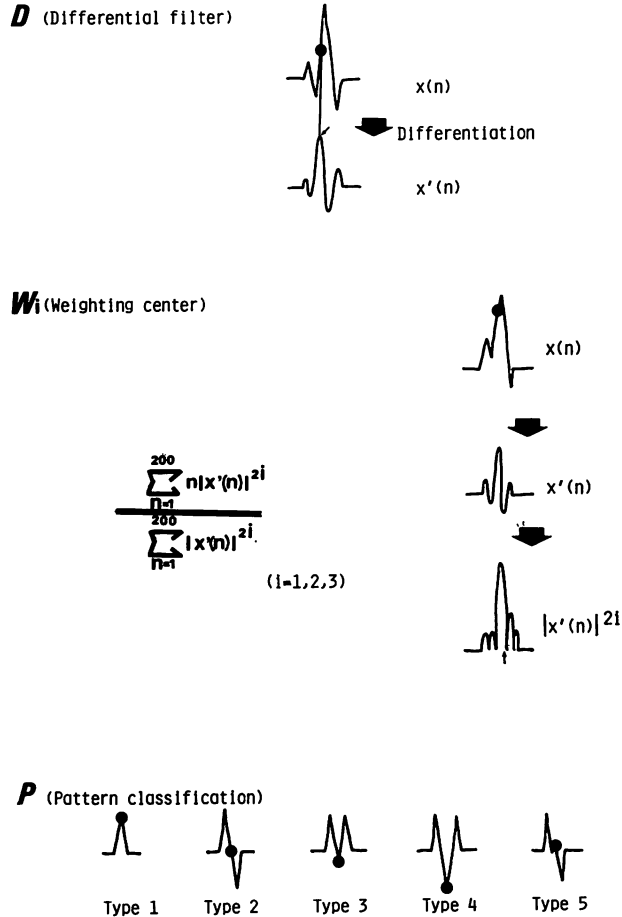


Fig. 4. Method for extracting the epicardial excitation time.
●: time of epicardial excitation.

$$\frac{\sum_{n=1}^{200} n|x'(n)|^{2i}}{\sum_{n=1}^{200} |x'(n)|^{2i}} \quad (\text{ただし } i=1, 2, 3)$$

各方法について興奮到達時刻 te と基準時刻 tr との差 ($te-tr$) を 2 秒間のいくつかの波形 (最大 4 個) について計算し, 平均値をもってその測定点における興奮伝達時間 τ とした (Fig. 5). 以上により自動抽出の過程を完了する.

3. 心表面形態の表示法 (Fig. 6)

心表面形態については, 左右心室を後室間溝に

において切り裂いて平面上に展開した図を用いて表現しており, 左側より右室横隔膜面, 右室前面, 左室前面, 左室後面の 4 面に区別されている. そして, 左右両心室 (測定点 69 点), 右室のみ (測定点 39 点), 左室のみ (測定点 38 点) という 3 種類の座標を適宜使い分けている.

4. 心表面興奮伝播図の自動作図

心表面上の各測定点における興奮伝達時間には, 各心拍ごとの測定誤差や生体固有の変動分が含まれていると考えられ, 測定値をそのまま真の値とすることは正しくない. この点を考慮して,

```

MEASUREMENT POINT NO. = 1

TIME INTERVAL IN 1 -st WAVE PACKET = 23
  ( REFERENCE TIME = 76  EXCITATION TIME = 99 )

TIME INTERVAL IN 2 -st WAVE PACKET = 22
  ( REFERENCE TIME = 54  EXCITATION TIME = 76 )

TIME INTERVAL IN 3 -st WAVE PACKET = 22
  ( REFERENCE TIME = 30  EXCITATION TIME = 52 )

TIME INTERVAL IN 4 -st WAVE PACKET = 22
  ( REFERENCE TIME = 7   EXCITATION TIME = 29 )

AVERAGE TIME INTERVAL AT # ( 1 ) = 22.2

```

Fig. 5. Display of the result of extraction.

reference time=reference excitation time; excitation time=epicardial excitation time; time interval=epicardial excitation transmission time.

抽出された測定値を近似的に表現する二次元関数を求め、その等高線表示法により等時点を結び心表面興奮伝播図を自動作図している。

作図に用いる関数は以下の方法で決定される。心表面上の測定点 $P_i(x_i, y_i)$ における測定値 d_i は、真の興奮伝達時間 f_i と誤差 ε_i により、

$$d_i = f_i + \varepsilon_i \quad \dots\dots(1)$$

と表現される。また興奮伝播様式を表わす関数 F_M は、 k 次のチェビシエフ多項式 T_k を用いて、

$$F_M(x, y) = \sum_{0 \leq k+1 \leq M} \alpha_{kl} T_k(x) T_l(y) \quad \dots\dots(2)$$

で表現されるものとする。このとき係数 α_{kl} の最小二乗推定値 $\hat{\alpha}_{kl}$ は、

$$\sum_{i=1}^N (d_i - F(x_i, y_i))^2 \quad \dots\dots(3)$$

を最小にする α_{kl} の値となる。したがって、最小二乗法により $\hat{\alpha}_{kl}$ を求めることにより、各測定点における興奮伝達時間を表わす関数は、

$$\hat{F}_M(x, y) = \sum_{0 \leq k+1 \leq M} \hat{\alpha}_{kl} T_k(x) T_l(y) \quad \dots\dots(4)$$

としてえられる。

心表面興奮伝播図は、上記の関数の等高線表示法によりカラーグラフィックディスプレイ上に自動表示されるので、必要に応じて放電プリンタで

印刷した。またカラー表示にあたり、興奮の早期のものより青、水色、緑を用いて等高線の3段階色分けを行い、興奮伝播様式が一目りょう然となるようにした。

結果および検討

正常イヌ心における電位波形を用い、各抽出法により興奮伝導時間の自動抽出および心表面興奮伝播図の自動作図を行った。Fig. 7 はおのおの① M法(目測による)、② P法、③ D法、④ W_1 法、⑤ W_2 法、⑥ W_3 法により作図された伝播図である。心表面上の69測定点のうち、波形の抽出しえた62点を見ると、目測値との誤差1 msec 以内の点の数については抽出方法により34~43点と有意差があるが、ほとんどの点において誤差は3 msec 以内であり、それ以上の大きな誤差を生じた点はD法で6点、 W_1 法で1点、 W_3 法で1点存在したにすぎない。この結果は以前に行ったP法における結果に比して、満足すべきものである。

一般に大きい誤差の生ずる原因は、① かなり高い周波数成分を含んだ複雑な波形である場合、② 逆に棘波のほとんど存在しない非常になだらかな波形である場合、③ 心興奮波形以外の関係のない波形が多く記録されている場合、④ 電極

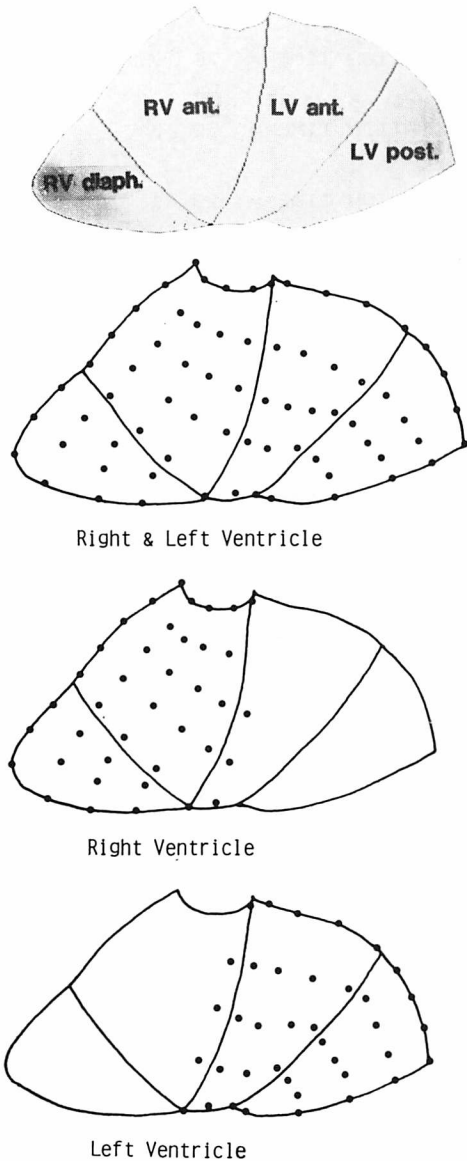


Fig. 6. The epicardial surface and coordinates.
 The epicardial surface is drawn as if the heart is cut from the apex to base along the posterior interventricular groove, and the measurement points are plotted on it.

の移動により各心拍ごとの波形にばらつきが多い場合, ⑤ 不整脈の出現している場合, などが想定される. このうち, ③, ④ は主としてマッピング手技に由来するものと考えられる. そこで, 実際に大きな誤差を生じた点について, 個別に波形を分析してみた. W_1 法において 9.2 msec の誤差を生じた点が存在したが, この点における波形には基線の著しい動揺が認められた. 興奮波形が存在しない時間領域でも興奮波形のレベルに比し無視できない値をとるため微分波形においても, 二乗したときにこの部の影響が色濃く残り, 重心の位置にズレを生じたものである. このことは, 同じ波形を W_2 法, W_3 法のように 4 乗, 6 乗で処理した場合にその影響が相対的に減少するため, 誤差が 2.0 msec, 0.5 msec と改善していることから確認される. D 法において 3 msec を超える誤差を生じた点は 6 点存在したが, いずれも高い周波数成分を含み数個以上の棘を有する波形であり, 微分係数最大となる時刻が各心拍ごとに異なってしまった結果と考えられる.

D 法, W_1 法, W_2 法, W_3 法のうち, いずれの方法がすぐれているかのパラメーターとして, 各法における各測定値の誤差の二乗の平均を求めてみた. 結果はおおの 3.06, 2.78, 1.26, 1.34 であり, W_2 法がこれらの中でもっともよいと考えられる.

しかし, 表示された伝播図を比較すると, 大きな誤差を生じた点が数点あったにもかかわらず, 目測によるものとよく一致し, 各抽出法相互間の違いもほとんど認められなかった. これは興奮伝達時間の測定値には誤差が付随しているものとして, 関数近似法により作図した結果であり, Fontaine ら⁷⁾, Ideker ら⁸⁾のように誤差がないものと仮定して作図した場合には, 抽出法の違いにより興奮伝播図は大きく変わってしまうことが考えられる.

つぎに臨床適用例を示す. 第 1 例は右室前壁と左室自由壁とに 2 本の副刺激伝導路が存在した WPW 症候群の 1 例であり, 切断前の D 法, M

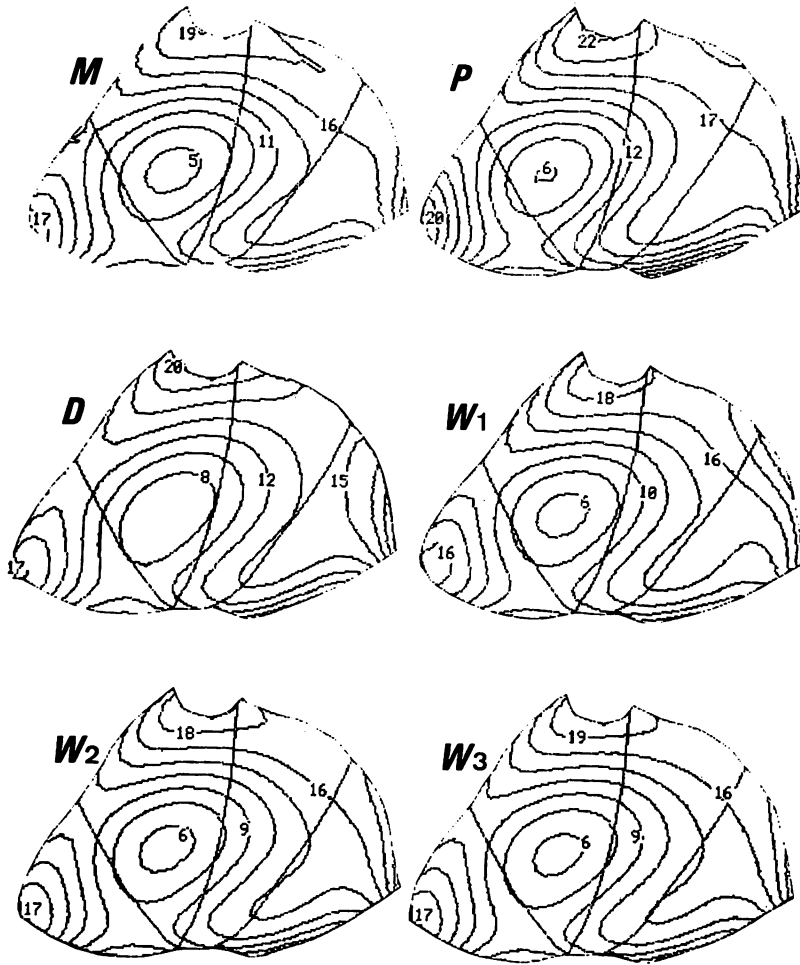


Fig. 7. Epicardial mapping in a normal dog.

The reference electrode is placed in the cavity of the left ventricle.

M=by manual operation; P=by P method (Pattern classification); D=by D method (Differential filter); W1-3=by W_i method (Weighting center) ($i=1, 2, 3$).

法による心表面興奮伝播図を示す (Fig. 8). この例では各心拍ごとの波形にばらつきが多く、しかも複雑な波形を呈したため、D法により抽出した値には目測値との間に大きな誤差を生じた点が多く、20 msec におよぶ誤差の点も存在した。他の方法は試みていないが、 W_2 法によれば誤差はある程度小さくなるのではないかと考えている。しかし、いずれの図においても右室前壁、左室自由

壁に早期興奮部位が出現しており、仮に D 法を用いたとしても手術自体に影響を与えるような本質的な相違は現われていない点は注目される。

第2例は WPW 症候群 (左心型) の副刺激伝導路切断後の手術操作を加えていない右室のみについてのマッピング例であり、したがって正常例ともいふべきものである (Fig. 9). D 法、M 法とも右室前面傍中隔付近に最早期興奮部位が存在

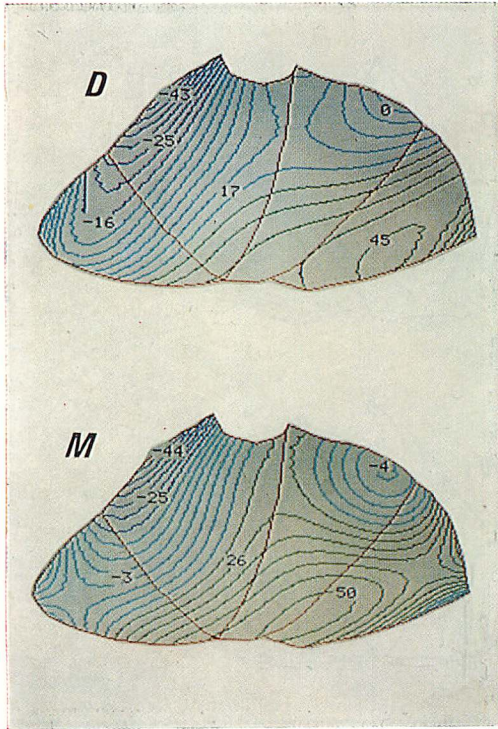


Fig. 8. Epicardial mapping in a patient with a left and a right cardiac accessory conduction pathways.

D=by computer extraction (D method); M=by manual operation

The reference electrode is placed on the right ventricle.

し、右室後基底部に伝播終了する正常興奮伝播様式を示しており、D法においてもまったく遜色なく、むしろD法が自然な伝播様式を示していると思われた。

結 論

1) マイクロコンピュータを使用して、D法、 W_1 法、 W_2 法、 W_3 法の各抽出法により、心表面電位波形からの興奮伝達時間の自動抽出を行い、とくに W_2 法において目測値との間にほとんど誤差のない値を得ることができた。また、この方法により、以前のミニコンピュターを使用した方法に比して大幅な作業のスピードアップが達成された。

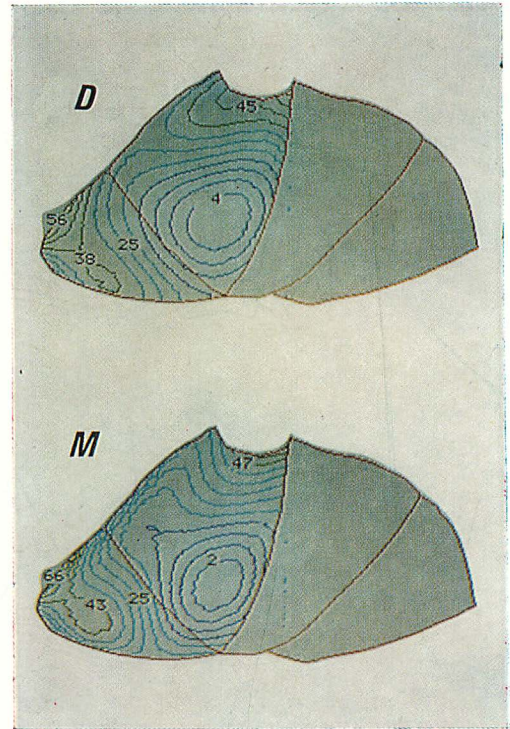


Fig. 9. Epicardial mapping in a patient with a left cardiac accessory conduction pathway (post-division).

D=by computer extraction (D method); M=by manual operation.

The reference electrode is placed on the right ventricle.

2) 心表面興奮伝播図のカラー表示が可能となった。

3) このシステムを正常犬、臨床例に適用し、いずれも目測によるものとよく一致した心表面興奮伝播図を得ることができ、臨床的に有用であると考えられる。

要 約

心表面興奮伝播図の作成は、難治性不整脈の外科治療のさい不可欠のものである。

心表面興奮伝播図の作成の過程は、(1)心臓電位波形の記録、(2)興奮伝達時間の抽出、(3)伝播図の作図の3段階より成り立っている。

本稿では我々が新しく開発した、マイクロコン

ピューターによるシステムについて述べた。このシステムにより、抽出方法の簡素化および心表面興奮伝播図のカラー表示が可能となった。

本研究では2種類の抽出法を試み、目測による方法と比較検討した。(1) D法: 微分波形が最大値をとる時刻を抽出する方法、および、(2) W_i 法: $\sum_{n=1}^{200} n|x'(n)|^{2i} / \sum_{n=1}^{200} |x'(n)|^{2i}$ により求められる時刻を抽出する方法 ($i=1, 2, 3$) である。

結果: (1) これらの自動表示法により、目測による場合と類似した心表面興奮伝播図を得た。(2) W_i 法のうち $i=2$ とした場合に、目測による値ともっとも近いと考えられる測定値を得た。

なお、本研究の一部は昭和55年度文部省科学研究費507080および448272の助成によった。

文 献

- 1) Cobb FR, Blumenschein SD, Sealy WC, Boineau JP, Wagner GS, Wallace AG: Successful surgical interruption of the bundle of Kent in a patient with Wolff-Parkinson-White syndrome. *Circulation* **38**: 1018, 1968
- 2) 岩 喬, 数井暉久, 杉井重雄, 和田寿郎: Wolff-Parkinson-White 症候群の外科治療. *胸部外科* **23**: 1225, 1970
- 3) Iwa T: Surgery of supraventricular tachycardia. I. Operative treatment of Wolff-Parkinson-White syndrome. *Jpn Circulat J* **42**: 287, 1978
- 4) 岩 喬, 岩瀬孝明, 川筋道雄, 麻柄達夫, 小林弘明, 渡辺洋宇: WPW 症候群の外科と心表面電位図. *日本臨床* **37**: 3639, 1979
- 5) 船田哲男, 岩瀬孝明, 三崎拓郎, 岩 喬: 心表面興奮伝播図の自動表示システム. *医用電子と生体工学* **18**: 21, 1980
- 6) 岩瀬孝明, 船田哲男, 岩 喬, 小林弘明, 川筋道雄, 三崎拓郎: 心表面興奮伝播図の自動表示とその臨床応用. *心臓* **11**: 1055, 1979
- 7) Fontaine G, Guiraudon G, Frank R, Coutte R, Dragodanne C: The conduction system of the heart. ed by Wellens, HJJ, Lie KI, Janse MJ, Stenfert Kroese, 1976, p 545
- 8) Ideker RE, Smith WH, Wallace JK, Harrison LA, Klein GJ, Kinicki RE, Gallagher JJ: A computerized method for the rapid display of ventricular activation during the intraoperative study of arrhythmias. *Circulation* **59**: 449, 1979