

氏名（本籍）	孫 樹平（中国）
生年月日	1977年11月3日
授与学位	博士(工学)
学位記番号	理工博甲第617号
学位授与年月日	平成25年7月10日
学位授与の要件	学位規則第4条1項
研究科，専攻の名称	理工学研究科(博士後期課程)システム設計工学系専攻
学位論文題目	Study of Automatic Segmentation and Boundary Curve Methods for Heart Sound Analysis and VSD Diagnosis
論文審査委員	主査 山口大学 教授 江 鐘偉 山口大学 教授 田中 幹也 山口大学 教授 小河原 加久治 山口大学 教授 陳 献 山口大学 助教 森田 実

【学位論文内容の要旨】

先天性心疾は生まれつきの心臓構造欠陥である。新生児の1000人に8人が先天性心疾患患者であるといわれている。欠陥の種別や程度によって成人していくうちに自然に治る場合と，早期に検出できれば高い確率で治癒できる場合がある。その中，心室中隔欠損症（VSD）は，最も一般的な先天性心疾患であり，先天性心疾患の3割も占めている。臨床では欠損孔直径の大きさでその欠損の状態を分類することが多い。一般的に，直径が5mmより小さいものを小心中隔欠損（SVSD），直径が5mmから15mmまでのものを中心室中隔欠損（MVSD），直径が15mmより大きいものを大心中隔欠損（LVSD）と区別する。さらに，心室中隔欠損の程度によって治療方法が異なる。特に欠損孔の大きい場合はできるだけ早期に手術する必要がある。従って，先天性心疾患の進行状況を比較的簡便な方法で計測し判別することができれば，子供の成長過程に応じた適切な時期に適切な処置を行うことが可能となり，患者への負担も軽減できる。

本学位論文では，聴診音による心室中隔欠損状態を自動判別するシステムを構築することを目指して，新しい聴診音解析方法及び心室中隔欠損状態の自動判別アルゴリズムの開発を目的としている。聴診音の解析においてはまず，心音特徴パラメータを如何に精度よく抽出するかは重要な課題である。本研究では，心室中隔欠損を判別するための心音特徴パラメータとして，今までの研究で提案された時間域におけるものと周波数域におけるものを使用する。しかし，心室中隔欠損症の心音波形がかなり複雑の形状をしているため波形の自動分割と抽出が極めて困難であった。そのため，本研究では初めに，心音波形の分割とその特徴パラメータの抽出を高精度でかつ自動的に行えるアルゴリズムを開発した。

次に，VSDの損傷状態を判別することに当たり，抽出された心音特徴パラメータに対して，サポートベクターマシン（SVM）などの方法を用いて直接判別を行ってきた。しかしながら，VSD状態の異なるデータ分布において，その境界部分がかなり重なっているため，高精度の境界線

を得るには難しいことである。本研究では、サポートベクターマシン (SVM) 技術と確率統計理論を用いて、以下のような境界線決定アルゴリズムを提案した：

1. まず境界線を求めるための参照データ集合を作成する。ここでは、境界線を求めようとする臨床データ集合に対してその分布特性パラメータを正規分布として求めたうえ、これらのパラメータを用いて新しい参照データ集合を作成することで、重なる領域を自由に制御できるようにした。
2. サポートベクターマシンアルゴリズムを適用し、臨床データ集合と参照データ集合を分離する境界線を、可変パラメータを有するカーネル関数を用いて反復計算しながら求める。

以上の方法で決定された境界曲線を用いて、心室中隔欠損状態を判別すると、それぞれSVSDが94.8%、MVSDが93.7%、LVSDが94.1%という結果が得られた。

しかしながら、SVM方法から得られた境界曲線が複雑な形状を有しているため、コンピュータによる自動判別には計算量が多く容易ではない。特に、タブレットPCやスマートフォンの使用を考える場合、この方法は臨床応用や家庭用アプリケーションとしての使用に不向きである。これらの問題を解決するために、本論文では、最後に、楕円モデルに基づくVSD状態の判別する方法を提案した。具体的には、SVM方法より得られた境界曲線を楕円関数に近似し、複雑な境界曲線形状を楕円関数のパラメータに置き換えることで、より簡便な判別システムを構築した。提案した楕円関数パラメータを用いた判別手法について検証した結果から、SVSD、MVSD、LVSDに対してそれぞれ95.7%、94.7%と95.0%となり、SVMによる判別結果とほぼ同等の精度であることが分かった。さらに、本判別システムに、正常心音、心室中隔欠損症患者、その他心疾患の心音データについても判別を行い、その有効性を確認した。本論文各章の内容は下記の通りである。

第一章では、本研究の研究背景を説明し、心音分析に関する方法を紹介して研究目的を述べる。

第二章では、心音解析を行うための必要な前処理について検討を行った。本研究で信号の前処理として、ウェーブレットフィルタを適用し、21.5-689 Hz周波数領域における信号を用いることなど心音採集条件と信号処理条件について述べる。

第三章では、心室中隔欠損症の心音波形がかなり複雑で自動抽出が極めて困難であるため、心音波形の分割並びにこれらのパラメータ抽出を高精度でかつ自動的に行えるアルゴリズムについて紹介した。VSDの症例データに対して約97.6%の精度で心音基本波形を自動的に分割と抽出することに成功したことや、心音の時間領域特徴パラメータと周波数領域特徴パラメータの組み合わせが診断効率向上に有効であることを述べる。

第四章では、VSD状態の異なるデータ分布において、その境界部分がかかなり重なっているため、如何に高精度の境界線を求めるかについて、サポートベクターマシン (SVM) 技術と確率統計理論を用いて、新しい境界線の決定アルゴリズムを提案した。提案した境界線判別法を室中隔欠損症の心音データに応用した結果、約95%という高い識別率が得られたことを紹介する。

第五章では、SVM方法より得られた境界曲線を楕円関数に近似し、複雑な境界曲線形状を楕円関

数のパラメータに置き換え、より簡便な判別システムを構築することを述べる。また、検証結果は、近似的に求めた楕円関数パラメータを用いて判別した結果が、サポートベクターマシン (SVM) 方法で求めた境界線法を用いた判別結果とほぼ同等の精度であることを示した。また、他の症例に適用した場合の例を示し、本判別システムの有効性を確認したことを述べる。

第六章では、本論文の結論をまとめる。

【論文審査結果の要旨】

先天性心疾患は生まれつきの心臓構造欠陥である。新生児の 1000 人に 8 人が先天性心疾患患者であるといわれている。欠陥の種類や程度によって成人していくうちに自然に治る場合と、早期に検出できれば高い確率で治療できる場合がある。その中、心室中隔欠損症 (VSD) は、最も一般的な先天性心疾患であり、先天性心疾患の 3 割も占めている。臨床では欠損孔直径の大きさでその欠損の状態を分類することが多い。一般的に、直径が 5mm より小さいものを小心中隔欠損 (SVSD)、直径が 5mm から 15mm までのものを中心室中隔欠損 (MVSD)、直径が 15mm より大きいものを大心中隔欠損 (LVSD) と区別する。さらに、心室中隔欠損の程度によって治療方法が異なる。特に欠損孔の大きい場合はできるだけ早期に手術する必要がある。従って、先天性心疾患の進行状況を比較的に簡便な方法で計測し判別することができれば、子供の成長過程に応じた適切な時期に適切な処置を行うことが可能となり、患者への負担も軽減できる。

本学位論文では、聴診音による心室中隔欠損状態の自動判別システムを構築することを目指して、新しい聴診音解析方法及び心室中隔欠損状態の自動判別アルゴリズムの開発を目的としている。聴診音の解析においてはまず、心音特徴パラメータを如何に精度よく抽出するかが重要な課題である。そのため、心室中隔欠損を判別するための心音特徴パラメータとして、今までの研究で提案された時間域におけるものと周波数域におけるものを併用する。しかし、心室中隔欠損症の心音波形がかなり複雑な形状をしているため波形の自動分割と抽出が極めて困難であった。そのため、本研究では初めに、心音波形の分割とその特徴パラメータの抽出を高精度でかつ自動的に行えるアルゴリズムを新しく開発した。

次に、VSD の損傷状態を判別するに当たり、抽出された心音特徴パラメータに対して、サポートベクターマシン (SVM) を用いて直接判別を行ってきた。しかしながら、程度の異なる VSD のデータ分布において、その境界がかなり重なっているため、精度よく区別することは大変難しいことが問題であった。そこで本研究では、SVM に確率統計理論を適用し、以下のような境界線決定アルゴリズムを提案した：

1. まず境界線を求めるための参照データ集合を作成する。ここでは、境界線を求めようとする臨床データ集合を正規分布と見なして求めた分布特性パラメータを参照値として、新しい参照データ集合を作成し、重なる領域を自由に制御できるようにする。
2. サポートベクターマシンアルゴリズムを適用し、臨床データ集合と参照データ集合を分離する境界線を、可変パラメータを有するカーネル関数を用いて反復計算しながら求める。

以上の方法で決定された境界曲線を用いて、心室中隔欠損状態を判別すると、それぞれ SVSD が 94.8%、MVSD が 93.7%、LVSD が 94.1% という高い判別率が得られた。

しかしながら、本手法で求められた境界曲線は複雑な形状を有しており、コンピュータによる自動判別には計算量が多く容易ではない問題が新たに現れた。特に、タブレット PC やスマートフォンの使用を考える場合、演算コストの高い本手法は臨床応用や家庭用アプリケーションとして不向きである。

これらの問題を解決するために、楕円モデルに基づく VSD 状態の判別方法を本論文の最後に提案した。具体的には、SVM により得られた境界曲線を楕円関数に近似し、複雑な境界曲線形状を楕円関数のパラメータに置き換えることで、より簡便な判別システムを構築した。提案した楕円関数パラメータによる判別手法について検証した結果より、SVSD、MVSD、LVSD に対してそれぞれ 95.7%、94.7% と 95.0% となり、SVM による判別結果とほぼ同等の精度であり、本楕円近似手法の妥当性が

確認できた。さらに、本判別システムに、正常心音、心室中隔欠損症患者、その他心疾患の心音データを適用して判別を行い、その有効性も確認された。

公聴会における質問内容は、周波数領域における心音特徴パラメータに関するもの、囲む境界線の求め方に関するもの、先行研究に使用したパラメータとの相違点に関するもの、平均移動手法におけるパラメータの決め方に関するものなどについてであった。いずれの質問に対しても発表者からの確かな回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の学位論文に十分値するものと判断した。

論文内容および審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。（関連論文 計2編）

1. Shuping Sun, Zhongwei Jiang, Haibin Wang, Yu Fang, Ting Tao, Heart Sound Feature Parameters Distribution and Support Vector Machine-based Classification Boundary Determination Method for Ventricular Septal Defect Auscultation, Journal of Computational Science and Technology, Vol.6, No.3, pp.198-206, 2012.
2. Shuping Sun, Zhongwei Jiang, Haibin Wang, Ting Tao, Heart Sound Analysis for Discrimination of VSD, Advanced Engineering Forum, Vol. 2-3, pp.243-248, 2011.