

氏名	陶 婷
授与学位	博士(工学)
学位記番号	理工博甲第687号
学位授与年月日	平成28年3月17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	Development of Multichannel Cardiac Murmurs Analysis Method and Monitoring System on Congenital Heart Disease
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 木戸 尚治 山口大学 教授 大林 正直 山口大学 助教 森田 実

## 【学位論文内容の要旨】

Congenital heart defect (CHD) is the most frequent form of major birth defects in newborns, common CHDs can not always be found and cured during pregnancy or at birth, and they must be monitored throughout life. Thus, if life-style related diseases could not be monitored continuously during a long period in the early stage, they might be difficult to be diagnosed appropriately in an early step. Furthermore, auscultating and analyzing heart murmurs from different positions during a physical examination are the vital diagnosis for CHDs. The needs for the primary health care physicians to improve the cardiac auscultation skill, and computer-aided analysis skill of heart murmurs, are still strong in the primary screening examination, and become stronger for the general users to perform the auscultation at home.

The aim of this study is to develop a multichannel cardiac murmurs analysis method and monitoring system on CHD. Firstly, the background of CHD, HS and common murmurs, reviews of cardiac murmurs analysis were introduced in Chapter one. Next, four electronic stethoscopes were fixed on the auscultation cloth, the HSs collection method which reflected the cardiac valvular opening and closure sounds at the same time was proposed, this measuring system helped to make the relation between four cardiac valvular opening and closure sounds

and murmurs clear in Chapter 2. The acquired data were transformed to analysis server by network for data transmission, save and analysis.

Heart murmurs are pathological sounds produced by turbulent blood flow due to cardiac defects. In order to make the murmurs features easy to use for general users, the murmur index extraction methods based on quantitatively analysis of cardiac murmurs was proposed in Chapter 3. Although, there are some evaluation studies about cardiac murmurs, the quantitative analysis of evaluation indexes has not been decided. In our study, the evaluation indexes of energy analysis under five frequency bands, and murmurs duration time parameters at systolic and diastolic periods were extracted. Firstly, the approach on analysis of the pathologic cardiac murmurs based on the wavelet packet decomposition technique was proposed. The HS signals were divided into five bands and the energy ratios at each frequency band were calculated and compared. Based on the analysis of clinic HSs data, three evaluation indexes of cardiac murmurs (ICM) were proposed for the analysis of the pathologic murmurs. Finally, the threshold values between the innocent and pathologic murmurs were determined based on the statistical results of the normal HSs. The statistic results showed that ICM of multichannel signals not only evaluated the murmur quantitatively, but also revealed the murmurs generating reason by analyzing signals from four positions simultaneously. Furthermore, in order to further quantitatively analyze the cardiac murmurs at each cardiac cycle, the murmurs time duration indexes extraction based on cardiac vibration state by describing the shape of different-scale window moment waveform (MW) was proposed in Chapter 3. Firstly, the homomorphic segmentation of multichannel HS cycle ( $T$ ) and fundamental HS (S1S2) were proposed based on homomorphic MW extraction with window length ( $l=T/2$ ), the HS cycle and S1S2 segmentation were implemented by locating the maximum and minimum of MW respectively. Secondly, considering the segmentation points of HS S1S2 and cycle as MW centers respectively, to extract the systolic MW (SMW) and diastolic MW (DMW) with different window lengths ( $T/8$  and  $3T/8$ ), furthermore, extracting systolic murmur index (SMI) and diastolic murmurs index (DMI) which were proposed based on SMW and DMW with window length  $T/4$ . Finally, many experiments show that the murmurs

indexes are efficient to judge the murmurs occurring periods and murmurs time duration. Importantly, DMF can be computed by moment analysis very fast and simple, and therefore it's very useful to auto-diagnosis or aided-diagnosis in an artificial intelligence cardiac murmur analysis system.

The noises coming from various sources contaminate HS signals and affect HS auscultation, in order to improve the auscultation, an unexpected noise reduction method based on frequency slice wavelet transform (FSWT) that can consummate the filtrating in time and frequency domain simultaneously was proposed. This method was assessed by signal noise ratio (SNR), correlation coefficient (CC) and mean square error (MSE) evaluation indicators and comparing with the total variation de-noise (TVD) and discrete wavelet transform (DWT) methods, experimental results showed HCA method was much more effective for external (ambient noise, speech noise, stethoscope device power interference) and internal (respiratory or lung sounds, and skin movements) disturbances noise reduction.

Finally, the multichannel murmurs monitoring system which is composed of multichannel HSs measuring system, analysis server and analysis result display was designed. The measuring system which consists of multichannel cardiac signals recorders acquires the signals and sends them to analysis server though internet network by computer. And the data transmission (upload and download) and analysis were implemented by the analysis server. The analysis results which show the multichannel heart murmur analysis indexes are useful and efficient to diagnose the CHDs, meanwhile, further reveal the heart murmurs physiological and pathological information. And the results data were not only saved in the server, but also displayed in the website for murmurs auscultation and diagnosis. Therefore, monitoring on CHDs by clinical HSs auscultation and analysis remain important for general daily health care. The pre-monitoring for CHD sounds will greatly improve the prevention of clinical CHD in advance, and helpful to the primary screening examination, and becomes stronger for the general users to perform the auscultation at home.

## 【論文審査結果の要旨】

近年、心疾患は死亡原因に2位となっている。また、新生児1000人中約8人が先天性心疾患を患っており、特に中国内陸山間部はより深刻である。先天性心疾患の発見と治療が遅れると、心不全さらに死亡をもたらすこともある。心疾患の検査方法として、超音波による心エコーやCT画像診断が最も有効視されているが、病院や関連施設等を通う必要がある。在宅などで簡便な検査法として心雑音の聴診は昔からある。しかしながら、聴診による診断は熟練の医師でないと判断は困難である。「入院より在宅」医療費抑制を目指すためにも、一般患者者が自宅で容易に心疾患進捗状況をモニタリングができるシステムへの要望が高まっている。本研究ではこのような現状に基づき、心雑音を中心に一般家庭で心音の聴診を簡便に行える多チャンネル同期聴診方法の開発を行う。また、主な先天性心疾患である心房中隔欠損症(ASD)や心室中隔欠損症(VSD)、ファロー四徴症(TOF)などの心雑音を定量的に評価する解析方法について検討・提案し、一般家庭でも使いやすい心音聴診と解析システムを開発する。本論文は緒論、結言を含め6章から構成されている。

第1章では、本研究の技術的な背景と本論文の目的・構成について述べている。

第2章では、心音の多点計測システム開発について述べている。医師は心音を聴診する場合、複数箇所の心音を聴診し、心雑音の様々な特性から心臓の病状を推定する。しかし、一般使用者は心音の聴診部位や聴診方法に関する知識がないため、正確な聴診を行うことは困難である。本章ではこの点に着目し、四つの聴診器を搭載した多点聴診ウェアラブルシステムを開発している。心臓の四つの弁が開閉時に発生する音を四箇所ですべて同時に採集することにより、心臓の四つの弁で発生する心雑音の相互関係がより分かるようになった、また、聴診服を装着することで子供の心音がより計測しやすくなった。

第3章では、心雑音の評価パラメータとして、五つの周波数領域における心雑音のパワー指数並びに心臓の収縮期と拡張期における心雑音の持続時間指数を提案し、これらのパラメータの解析方法と抽出アルゴリズムを提示している。具体的には、心雑音のパワー指数として、ウェーブレット解析法を用いて心雑音を五つの周波数域(VLF, LF, SF, MF, HF)に分割し、心雑音エネルギー評価パラメータ(ICM)を提示した。また、心雑音の持続時間指数を求めるには、心音の1音と2音を高精度に分割するアルゴリズムを開発し、心雑音の収縮期と拡張期における心雑音の持続時間を計算するガウス近似方法を開発した。さらに、臨床先天性心疾患データ(ASD: 心房中隔欠損症、VSD: 心室中隔欠損症、TOF: ファロー四徴症)ならびに健康者心音データ(NHS)を用いて検証を行い、その有効性を検証した。

第4章では、聴診データに含まれる環境ノイズの軽減方法について検討している。一般家庭で聴診する際に生活環境ノイズが聴診データに含まれることが多いため、遠隔聴診を行う際に医師に聞きやすい心音データの提供が必要である。本章では、当研究グループが開発している周波数スライスウェーブレット変換(FSWT)方法を画像処理技術と組み合わせることにより効果的な環境ノイズの軽減方法を提案している。具体的には、FSWT方法によるスペクトログラムを求め、特定周波数領域における環境ノイズのエネルギーを軽減する重み関数を自動的に計算し、スペクトログラムにかけて調整する。調整後のFSWTスペクトログラムに対して逆FSWT変換を施し、環境ノイズを軽減された心音信号に再構成する。本方法を適用することで、環境ノイズが軽減されると同時に心音の通常聴診と同等な聴覚効果を保つことが特徴的である。

第5章では、一般家庭在宅で利用できる心雑音のモニタリング用多チャンネル心音聴診解析システムの開発を行っている。このシステムの主要部分は2章で開発した四チャンネル心音同時計測システム、3章で開発した心雑音の定量解析方法により得られた評価指数、4章で提案した環境ノイズ軽減法による心音再構築アルゴリズムで構成されている。本システムにより、一般家庭でも簡便に利用できる心雑音の計測とモニタリング、遠隔による医師の聴診補助支援が可能となり、先天性心疾患の早期発見、術後の状況観察など心疾患モニタリング支援システムを構築している。本システムを用いることで、一般患者が自身の心雑音レベルと変化履歴を容易に把握でき、また、インタ

ーネットを利用することで遠隔で専門医による聴診を受けることも可能となる。さらに、本システムは高齢者の心雑音評価に適用したところ、その有効性も確認され、高齢者のヘルスケアに貢献できる。

第6章では、まとめと本研究の将来展望について述べている。

公聴会には、学外者も含め30余名の参加者があり、活発な質疑応答がなされた。その主な質疑内容として、

- (1) 本研究で提案した計測法は新たに計測可能になった事は何か。
- (2) 臨床データの分析から年齢分布や個人差による何らかの傾向が見られたか。
- (3) 多点心音の同時計測によって心雑音の解析に寄与することは何か。
- (4) 心音信号の前処理の方法と環境ノイズ軽減のため信号処理法がどのような違いがあるか。
- (5) 聴診服を用いて老若男女に対して測定する時に、特に困難な事は何か。
- (6) 心雑音評価システムの使用方法や使用場所等に関する質問

等の質問があり、いずれの質問に対しても申請者からおおむね的確な回答がなされた。

以上より、本研究は、新規性、信頼性、有効性、実用性ともに優れており、博士(工学)の論文に十分に値するものと判断した。

論文内容、審査会、及び公聴会での質問に対する応答などから総合的に判断して、最終試験は合格とした。

なお、査読のある関連論文の発表状況は以下の通りである。(下記以外 国際会議論文集 4編)

- (1) Zhongwei Jiang, Ting Tao, Haibin Wang, New Approach on Analysis of Pathologic Cardiac Murmurs Based on WPD Energy Distribution, Journal of Healthcare Engineering, Vol. 5, No. 4, pp. 375-392, 2014.
- (2) Ting Tao, Zhongwei Jiang, Yu Fang, Haibin Wang, Multichannel Cardiac Sounds Measuring System for Monitoring Children's Congenital Heart Disease at Home, 日本AEM学会誌, Vol. 4, No. 23, pp. 686-691, 2015.