

## 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	Parameter extraction and analysis of cardiorespiratory sound for sleep and heart state monitoring
--------	---

氏 名	FANG YU
-----	---------

Healthcare has drawn wide public concern in modern society. Sleep spending one third of the life is indispensable to support human's health. Not only for the aging but also for young adults, more and more people are suffered from sleep-related disorders. The sleep-related disorders will affect the sleep quality seriously, increase the complications risk of cardiovascular disease including apnea syndrome, heart failure and so on. They will threaten peoples' health and lives. Therefore, the monitoring and analysis for breathing sound and heart sound during the whole night sleep play a very important role on healthcare at home.

In clinic, polysomnography (PSG) is the golden standard to study and evaluate the sleep states. At present only PSG can provide exact apnea-hypopnea index (AHI) to diagnose obstructive sleep apnea (OSA) which is a typical sleep-related disorder. However, PSG should be tested in hospital because of the complex and professional operation. It is not suitable for daily monitoring at home.

This research keeps the ventilation of oxygen and carbon dioxide while sleep in mind and monitors sleep state with the breathing sound signal. The breathing data is acquired portably by a smart phone and a wireless earphone. The waveform segmentation method of breathing cycle and phase is proposed with high accuracy. Based on the segmented breathing cycles, the apnea and hypopnea identification method is introduced. And the AHI will be detected from the breathing sound analysis. Moreover the identification method of normal and abnormal breathing based on the Mel frequency spectrum analysis is proposed. Lastly, the analysis methods proposed for breathing sound signal are applied for the heart sound signal analysis. The efficiency is validation by abnormal heart sound analysis.

This thesis is composed of six chapters.

In chapter 1, the aims and significance, the current studying situation, research key points, nodus and studying methods of sleep state and heart state monitoring have been made a basic overview. The outline of this thesis is introduced as well.

There are stable and unstable breathing, snore, apnea during the whole night sleep. To guarantee the veracity of the sleep breathing signal analysis, the complex sleep breathing waveforms should be segmented correctly at the beginning. For the breathing signal during one night sleep, the fast and effective segmentation method is the base of this research. In chapter 2, the waveform segmentation method based on the moment waveform extraction is proposed. The time characteristic waveform (TCW) and characteristic moment waveform (CMW) are extracted. Then the breathing cycles and inspiration/expiration can be segmented successfully based on the local extremums of CMW and TCW. A set of testers including young students and a patient suffered from obstructive sleep apnea (OSA) is used to validate the efficiency of proposed method. The average successful rate can reach to 98.4% with the manually counting as reference.

The chapter 3 introduces identification of the apnea and hypopnea based on the results of the segmentation algorithm proposed in chapter 2. Then the AHI is detected for diagnosing the severity of OSA. Apnea can be defined by breathing pause lasting more than 10 seconds. But the hypopnea estimated by ventilation is less than 50% or breathing cycle lasting more than 6 seconds has not clear definition. In this chapter, AHI can be detected by computing the times of apnea and hypopnea events from the segmented waveforms. And the threshold values used to identify hypopnea is examined by comparing with the monitoring results of blood oxygen saturation. The detected AHI value is close to the diagnose result of PSG. The usefulness of the proposed AHI detection method has been confirmed.

In chapter 4, Mel frequency spectrum is introduced from speech signal processing to detect the snore and other abnormal breathing states. The Mel frequency spectrum transforms the linear frequency spectrum to the Mel frequency simulating the acoustic character of human ear. It has high resolution in low frequency part and roughs the high frequency part. For each frame in time domain, the Mel scale label is extracted to represent the maximum value of energy in Mel frequency domain. Then the present times of each Mel scale label are counted to display the frequency energy distribution clearly. The normal breathing component, abnormal breathing component and snoring component can be identified by the fixed Mel scale label set. The whole night monitoring results of sleep breathing sound signal are applied to validate the efficiency of the proposed algorithm. The proportion of the normal and abnormal breathing states is proposed as a new index to evaluate the sleep quality.

In chapter 5, the proposed breathing waveform segmentation method and Mel frequency spectrum analysis method are applied for abnormal heart sound signal identification. Heart sound signal is recorded by a portable acquisition system including stethoscopes, auscultation cloth and a smart phone or an IC-recorder. The segmentation method proposed in chapter 2 with adjusted parameters is applied to segment the cardiac cycles and systole/diastole. The proposed segmentation method is confirmed effective again by 99% successful rate for normal heart sound data and 95% for abnormal cases. Then Mel-scale spectrum is calculated for the systolic and diastolic murmurs intervals to identify the abnormal heart sound data from the data set including normal case and one kind congenital heart disease case. The Mel frequency spectrum analysis method introduced in chapter 4 is useful compared with the clinical diagnose results. The application will be expanded to all night monitoring for early detection of heart failure and other heart diseases in the future.

The conclusion is drawn and the future work is discussed in chapter 6.

# 学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

## (博士後期課程博士用)

山口大学大学院理工学研究科

報告番号	理工博甲 第 758 号	氏名	Fang Yu
最終試験担当者	主 査 江 鐘偉 審 査 委 員 陳 献 審 査 委 員 山口真悟 審 査 委 員 森田 実 審 査 委 員 中島翔太		
<b>【論文題目】</b> Parameter Extraction and Analysis of Cardiorespiratory Sound for Sleep and Heart State Monitoring (呼吸音のパラメータ抽出と解析および心肺状態モニタリングへの応用)			
<b>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</b> <p>健康管理は、現代社会において幅広い関心を集めている。睡眠は、健康な機能を維持するために不可欠であり、生活の質を向上させるための基本的な役割を果たす。終夜の呼吸音や心音をモニタリング・分析することで、生活習慣病の早期発見や心血管疾患の重症化の予防につながる。高齢者だけでなく若年成人にも、睡眠関連障害が増えている。睡眠関連障害は睡眠の質に影響し、特に、無呼吸症候群は心不全など循環器系疾患合併症の発生リスクを増大させ、人々の健康と生命を脅かす。したがって、夜間睡眠時の呼吸音と心音をモニタリングし、分析する技術を確認することは、在宅医療・看護に重要な役割を果たすことになる。</p> <p>睡眠状態を評価するには、睡眠ポリグラフ (PSG) システムがゴールドスタンダードとして使用されている。典型的な睡眠関連障害である閉塞性睡眠時無呼吸 (OSA) を診断するために、無呼吸・低呼吸指数(AHI)が用いられる。現在 AHI は、PSG による入院検査しか提供されていない。しかし、PSG 検査は煩雑で高度な専門性を要するため、自宅で手軽のモニタリングには適していない。</p> <p>本研究では、呼吸による酸素と二酸化炭素の換気状態に着目し、睡眠時の寝息呼吸音を無線マイクで計測し、呼吸の吸気相と呼気相による呼吸の周期を高精度に抽出するための波形分割方法を提案すると共に、分割した波形に基づく呼吸の周期情報から無呼吸並びに低呼吸を検出するアルゴリズムを開発し、呼吸音データから AHI を求めることを試みる。さらに、音声解析技術によく用いられるメル周波数解析法を展開し、正常呼吸並びに異常呼吸の判別方法を提案する。最後に本研究で提案した周期波形の分割方法とメル周波数解析方法を心音解析に応用することを試み、異常心音分析への有用性を検証する。</p> <p>本論文は、6章から構成されている。</p> <p>第1章では、睡眠研究及び心音研究に関する研究背景と目的、現状を説明する。また、本論文の概要について述べる。</p> <p>第2章では、睡眠時の寝息呼吸音に、リズムの正しいものや不規則なもの、いびき、無呼吸などがある。寝息呼吸音を正しく分析するため、様々な寝息呼吸波形を精度よく分割することが重要である。また、一晩の呼吸音データがかなり大きいことから、高速かつ効率的な呼吸波形分割アルゴリズムを開発することは本研究の基礎となる。本章では、呼吸波形を周期波形と見なした場合の寝息呼吸音を時間特徴波形 (TCW) と特性モーメント波形 (CMW) として抽出し、CMW と TCW の局所的な極値に基づき、吸気相と呼気相による呼吸の周期を分割する方法を提案する。正常例と閉塞性睡眠時無呼吸症候群 (OSA) 症例の終夜寝息呼吸音データに対して、提案された波形分割方法を適用し検証を行った。自動検出した結果を手作業で求めた結果と比較したところ、呼吸周期の平均抽出率が 98.4%であり、本分割</p>			

方法の有効性が確認された。

第3章では、第2章で提案した呼吸波形分割アルゴリズムを用い、睡眠時無呼吸と低呼吸の推定を行う。寢息呼吸音の分割波形から睡眠時無呼吸症候群の重症度を診断する AHI を推定する方法を開発する。睡眠時無呼吸は 10 秒以上呼吸停止と明確に定義されているが、低呼吸は、換気が 50%以下または呼吸周期が 6 秒以上という定義があるものの、曖昧さが残っている。本章では、分割した呼吸周期波形から睡眠時無呼吸・低呼吸の停止時間と回数を算出し、さらに、血中酸素濃度の計測結果と照らし合わせて低呼吸を推定するための閾値を精査し、AHI を推定するアルゴリズムを提案した。症例数がまだ少ないが、本提案方法で求めた AHI の推定結果が PSG の診断結果と近い値となっており、本 AHI 推定方法が有用であると言える。

第4章では、いびきや不規則な異常な呼吸を検出するため、音声解析技術によく用いられるメル周波数スペクトル解析法を導入する。メル周波数スペクトラムは、低周波数の部分を解像度高めに、高周波数の部分を粗めにする事で、線形周波数スペクトルを人間の聴覚特性に合うようにメル周波数に変換するものである。具体的には、まず各時間フレームに対し、メル周波数域におけるエネルギーの最大値をメルスケールラベルとして求める。次に、メルスケールラベルの度数分布を求め、正常な呼吸成分、異常な呼吸成分及びいびきの呼吸成分を、メルスケールラベルの度数分布として表し、正常呼吸、異常呼吸ならびにいびきの判別を試みた。終夜睡眠時寢息呼吸音の解析に本アルゴリズムを適用し、その有効性を確認した。

第5章では、呼吸データの波形分割方法とメル周波数スペクトル解析法を心音の解析に応用し、正常心音と異常心音の判別を試みる。第2章で提案した呼吸音波形分割法を心音の周期特性に合わせて計算パラメータを調整し、I 音と II 音を含む心音周期と、心臓収縮期および拡張期を分割することを試みた。正常心音の分割率が 99%、異常心音が 95%と高いことから、第2章で述べた呼吸音周期分割アルゴリズムの有効性が改めて確認できた。さらに、第4章で提示したメル周波数分析法が異常心音の判別にも有用であることが分かった。

第6章では、この研究の結論と今後の展望について述べる。

公聴会における主な質問内容は、中枢性無呼吸と閉塞性無呼吸症候群の違いは何か、高齢に伴いなぜ睡眠障害が増えてくるのか、AHI が何か、低呼吸指数 (HI) の算出するための閾値をどう決めるか、HI が AHI 値精度にどのぐらい影響するか、なぜメル周波数解析を使用するのか、終夜のデータを測定する必要性、症例数などについて活発な質問があった。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) の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、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5編)

- 1) Yu Fang, Zhongwei Jiang, Haibin Wang, Shuping Sun, Ting Tao, Diagnosis of Ventricular Septal Defect Based on Mel Frequency Cepstrum Analysis, International Journal of Engineering Innovation and Management, 4(1), pp.1-4, 2014.
- 2) Yu Fang, Zhongwei Jiang, Zhonghong Yan, Haibin Wang, Study on Automatic Snoring Extraction Method for Obstructive Sleep Apnea Analysis, Proc. of International Conference on Innovative Application Research and Education, 2014.
- 3) Haibin Wang, Yu Fang, Zhidi Gao, Yue Wang, Handan You, A Heart Sound Acquisition and Analysis System Based on PSoC4, International Journal of Engineering Innovation and Management, 7(2), pp.22-31, 2017.
- 4) Yu Fang, Zhongwei Jiang and Haibin Wang, A Novel Sleep Respiratory Rate Detection Method for Obstructive Sleep Apnea Based on Characteristic Moment Waveform, Journal of Healthcare Engineering, Vol. 2018, pp.1-10, 2018.
- 5) Yu Fang, Zhongwei Jiang, Haibin Wang, Zhidi Gao, Ting Tao, A heart murmur segmentation and analysis method for congenital heart disease, Beijing Biomedical Engineering, 37(4), pp.151-156, 2018.