

学 位 論 文 の 要 旨

学位論文題目

A Simple Detection System of Sleep Stage and Apnea Syndrome by Breath Sound Measurement
(呼吸音計測による睡眠状態ならびに睡眠時無呼吸症候群の簡易検出システム)

氏 名

Luo Yuzhou

Sleep is indispensable to keep healthy functions and further physical functions and it plays a fundamental role to improve the quality of life. However, in modern society, we have sacrificed sleep so much that living activities and economic interests are emphasized and more and more adults are suffering from disturbed sleep. Recently monitoring sleeping conditions has gained more interest, which is an important step to solve the sleeping problem and to improve sleep quality.

In sleep studies and evaluation the polysomnography (PSG) system represents the gold standard in the state of art. The patient has to hospitalized at least one night and measuring a lot of physiological signals such as, electroencephalogram (EEG), electrooculogram (EOG), electromyogram (EMG), respiration (RSP) and diagnose the sleep stage and apnea/hypopnea situation. Since many sensors are attached to the body, it is uncomfortable all-night laying down on the bed. Almost patients could not get sleeping well as usual in the home. Further, the medical checking cost is also very high. It make the most patient undergo unchecking.

Recently, various measuring systems and applications have been developed and marketed in order to simply monitor the sleeping state. These systems basically evaluate sleep stages by sensing and analyzing the body movements caused generated due to the respiration and heartbeat, the turning over in the bed etc.

Different from conventional study, this study is paying the main attention to respiratory ventilation state, by measuring and analyzing the respiratory sound in sleep with a wireless microphone. In this study, the breathing rhythm and the variation in amplitude are taken into account to analyze sleep apnea syndrome and the sleeping stages. The sleep stage monitoring system and the detecting analytical method are developed and the aim of this study is to provide sleep measurement apparatus for general households that is superior in operability, performance, and

cost.

This doctoral dissertation consists of 6 chapters.

In chapter 1, generalities and basics about sleep study are explained. The outline of the thesis is also given.

In chapter 2, the sleeping breath sound measurement system developed previously by our research group is described first. The possibility and the usefulness of detecting sleeping state and apnea state from respiratory sound waveform is demonstrated in detail. The measurement system consists of Bluetooth microphone, smartphone and analysis server. Sleeping breathing sound during sleeping is collected by the Bluetooth microphone and sent and saved to the smartphone in real time. The breath sound data stored on the smartphone is sent to the analysis server automatically at a given time intervals for analysis, record and management.

In chapter 3, in order to evaluate sleep stage, the breath strength, respiratory variation, breath period are defined from the sleep breathing sound waveform as sleep evaluation parameters and the these parameters calculation algorithm are explained in detail. A simple algorithm multiplying these evaluation parameters by weighting coefficients is proposed to distinguish the four sleep stages. These weighting coefficients are determined by trial and error on many sleep data. In order to verify the effectiveness of the algorithm proposed in this research, the sleep experiments are conducted in combination with the commercial SleepScan made by TANITA. It is shown that the results of the four sleep stages (wake, REM, shallow sleep, deep sleep) detected by SleepScan are almost similar to the results obtained by the sleeping breath sound method proposed in this study. It is confirmed that the proposed measuring system and sleep stage evaluation method is useful and effective.

In chapter 4, in order to automatically determine sleep stages, a support vector machine (SVM) classifying method is introduced. Firstly how to construct a sleep state database representing four sleep stages is describe. In order to construct the sleep state database corresponding to each sleep stage, the result of the sleep stage according to the weighting coefficient method as described in Chapter 3, the result

obtained by using the SleepScan device, and the result estimated by observing the respiratory waveform, are considered integrally. Next, using the support vector machine (SVM) classifier learned based on the sleep state database, the sleep stage is predicted. As the sleep evaluation parameter, six characteristic parameters were adopted, the average values of respiratory strength, respiratory variation, and breath period proposed in Chapter 3 and their deviation values. Similarly, compared with the results of TANITA's SleepScan device, it is succeeded in obtaining more accurate estimation results compared with the SleepScan's ones. In addition, the contribution of these six characteristic parameters to the sleep stage estimation was examined and it was found that the average value of the respiratory period contributed most.

In chapter 5, a simple method based on the processing of breath sound signal for the detection of apnea episodes is explained. Measurement of SpO₂ during whole night sleep was conducted together with the breath sound measurement at the same time. The value of SpO₂ was found being strongly correlated with the respiratory variation presented in this study. This means that the respiration variation can be used to estimate arterial oxygen saturation. In this study, the apnea episodes are detected by calculating the difference between respiratory variation and its moving average of respiration variation. As the result it was demonstrated that the number of apnea episodes were detected almost perfectly comparing with the breath sound waveform. Furthermore, as an example, the clinical diagnosis result of an apnea syndrome patient is used for comparison. It is confirmed again the number of apnea episodes during the whole night, which is detected by the respiratory sound calculation, is almost in same number. It can be said that the sleep state inspection system based on the breathing sound proposed in this research is in a level usable for clinical examination.

In Chapter 6, summary of this thesis and future work are described.

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 726 号	氏名	Luo Yuzhou
最終試験担当者		主査	江 鐘偉
		審査委員	南 和幸
		審査委員	森川 治
		審査委員	森田 実
		審査委員	中島翔太
【論文題目】 A Simple Detection System of Sleep Stage and Apnea Syndrome by Breath Sound Measurement (呼吸音計測による睡眠状態ならびに睡眠時無呼吸症候群の簡易検出システム)			
【論文審査の結果及び最終試験の結果】			
<p>睡眠は、身体の高い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。しかし、現代社会では、生活習慣や経済的利益が重視されるほど睡眠を犠牲にしてきており、多くの人々が睡眠障害に苦しんでいる。最近、睡眠の問題を解決し、睡眠の質を改善するための重要なステップとして、常に睡眠状態をモニタリングすることの重要性が挙げられている。</p> <p>睡眠の研究と評価には、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。患者が一晩入院し、脳波 (EEG)、眼電図 (EOG)、筋電図 (EMG)、心電図 (ECG)、呼吸 (RSP) などの生理学的信号を計測し総合解析することで、睡眠のステージや無呼吸・低呼吸状態を判断する。しかし、多くのセンサが身体に取り付けられているため、一晩中ベッドの上で動けず、大変不快を感じ、通常の睡眠ができないケースが多い。さらに入院が必要で検査コストも非常に高い。そのため、睡眠ポリグラフ検査を受けない人が多い。</p> <p>簡易的に睡眠状態をモニタリングする方法として、最近様々な計測システム並びにアプリケーションが開発され市販されている。これらのシステムは、基本的に睡眠時に発生する寝返り、呼吸や心拍などによる動きをセンシングし、その動きを解析することで睡眠ステージを評価するものである。</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、寝息呼吸音を無線マイクロフォンで計測し、呼吸のリズム、呼吸強さの変動などを解析することで、睡眠時無呼吸状態ならびに睡眠ステージを検出できる簡便な睡眠計測システム並びに解析方法を開発し、操作性と機能性さらにコスト面が共に優れる、一般家庭向けの睡眠計測装置を提供することを目指している。</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、当研究グループが今までに開発した寝息呼吸音の計測システムを説明し、呼吸音波形から睡眠状態と無呼吸状態を検出する可能性とその有用性について述べる。本計測システムは、Bluetooth マイク、スマートフォンと解析サーバーから構成されている。睡眠時の寝息呼吸音を Bluetooth マイクで採集し、リアルタイムでスマートフォンに送信・保存する。スマートフォンに保存されている音声データを一定間隔で解析サーバーに送信し、解析・記録・保存を行う。</p>			

第3章では、初めに寢息呼吸音波形から、呼吸強さ、呼吸変動、呼吸周期を睡眠評価パラメータとして定義、その算出方法を説明する。次にこれらの睡眠評価パラメータに重み係数をかけ、睡眠ステージを判別することを試みる。これらの重み係数は、数多くの睡眠データに対して試行錯誤で決定する。本研究で提案するアルゴリズムの有効性を検証するため、市販のTANITA社 SleepScan装置と併用して睡眠実験を行う。SleepScanにより得られた4段階の睡眠ステージ（覚醒、REM、浅い睡眠、深い睡眠）結果が本研究の寢息呼吸音により得られた結果とほぼ一致していることを確認でき、本研究で提案する睡眠計測システムと睡眠ステージ評価方法の有用性と有効性が確認された。

第4章では、睡眠ステージを自動判別するため、サポートベクターマシン（SVM）分別方法を導入する。初めに、4つの睡眠ステージを表す睡眠状態データベースの構築について述べる。睡眠状態データベースを構築するに当たり、第3章で述べた重み関係数による睡眠ステージの結果と、SleepScan装置を用いた得られた結果と、さらに呼吸波形を観察して推定した結果と照らし合わせて、4つの睡眠ステージに対応する睡眠状態データベースを構築する。次に睡眠状態データベースに基づき学習されたサポートベクターマシン（SVM）分類器を用いて、睡眠ステージを予測する。睡眠評価パラメータとして、第3章に提案した呼吸強さ、呼吸変動、呼吸周期の平均値にさらにそれぞれの偏差値を加え、合計6つの特徴パラメータを採用した。TANITA社のSleepScan装置の結果と比較したところ、より高い精度の推定結果を得ることに成功した。また、これらの6つの特徴パラメータが睡眠ステージへの寄与度についても調べ、呼吸周期の平均値が最も寄与していることを判明した。

第5章では、無呼吸発作の検出について、寢息呼吸音信号から簡単に求める方法を説明する。睡眠時のSpO₂の計測を同時に行った。SpO₂の値は本研究で提示した呼吸変動と強い相関があることが判明した。これは呼吸変動を用いて動脈血酸素飽和度を推定することができることを意味する。本研究では、呼吸変動と呼吸変動の移動平均との差を算出し、無呼吸発作の検出に試みた。その結果を実際の睡眠時の寢息呼吸波形と比較した結果、無呼吸発作回数がほぼ正確に検出されたことを実証した。さらに無呼吸症候群患者の臨床診断結果の一例と比較したところ、無呼吸の回数がほぼ一致していることから、本研究で開発している寢息呼吸音による睡眠障害検出アルゴリズムは、臨床検査にも使用可能なレベルを有することが言える。

第6章では、本論文のまとめ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、市販されている睡眠計測装置に比べ、本提案したシステムの優位性と有用性、なぜ呼吸情報から睡眠状態を推測できるか、呼吸音計測デバイスの仕様と性能、個人差による解析結果への影響、SVM自動学習の有効性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的確な回答がなされた。

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4編）

- 1) Luo Yu-zhou, Jiang Zhong-wei, Liu Bei-bei, Xu Fang, Study on Monitoring Sleep State Based on Measurement of Breath Sound, Computer Engineering & Software, Vol.37, No.9, pp91-93, 2016.
- 2) Luo Yu-zhou, Jiang Zhong-wei, Shi Qi, Liu Bei-bei, Xu Fang, A Design of Sleeping Conditions Monitoring System Based on SVM, Computer Engineering & Software, Vol.37, No.10, pp64-67, 2016.
- 3) Yuzhou Luo, Zhongwei Jiang, A simple method for monitoring sleeping conditions by all-night breath sound measurement, Journal of Interdisciplinary Mathematics, Vol. 20, No.1, pp307-317, 2017.
- 4) Yuzhou Luo, Zhongwei Jiang, A Wearable Breath Detect System for Sleep State Monitoring, Proceedings of International Conference on Innovative Application Research and Education, Vol. 3, No. 3, pp96-97, 2016.