

## 博士學位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

氏名	Yoshida Ytaka 吉田 豊
学位の種類	博士 (経営情報科学)
学位記番号	経博 甲 第 5 号
学位授与	平成20年2月25日
学位授与条件	学位規程第3条第3項該当
論文題目	心拍変動時系列による状態推定のための連続モニタリング手法の 開発に関する研究 (Study on Development of Continuous Monitoring Methods for Heart Rate Time Series)
論文審査委員	(主査) 教授 石井直宏 <sup>1</sup> (審査委員) 教授 櫃田倍之 <sup>1</sup> 教授 小田哲久 <sup>1</sup>

## 論文内容の要旨

心拍変動時系列による状態推定のための連続モニタリング手法の開発に関する研究  
(Study on Development of Continuous Monitoring Methods for Heart Rate Time Series)

ストレス社会といわれる現在、我々は日常生活の中で様々なストレスを受けている。ストレスはヒトに精神的な障害を与えるだけでなく、自律神経活動などにも悪影響をあたえ、不眠症や自律神経失調症などの疾病を引き起こし、さらに症状が悪化すると過労死などを引き起こす危険性もある。日常的な健康管理のためにも自身の生体状態を認識することは重要である。

生体情報工学の分野では、脳波、心拍、血圧、筋電図、発汗量などを用いて精神作業時の生体負担度、作業中の緊張感や作業への集中、眠気、自律神経活動などを評価している。特に心拍変動時系列は、脳波や筋電図、発汗量などの生体信号に比べてノイズが少なく携帯型心拍計によって24時間無負担・無拘束で連続的に測定を行うことができる。また、作業中や自動車運転中에서도測定できる。現在、心電

計は信号をそのまま測定記録するものが多く、自律神経機能や生体負担度を長時間かつ個人差を考慮せずに推定する機能、および、推定結果を連続的に提示するモニタリング機能を備えた装置例は殆んど認められない。従来のホルタ心電計の場合、終日記録した心電図を被測定者が参照することはできず、専門家や自動解析装置の診断結果を後日得ることになる。従って、心拍変動時系列から推定される自律神経バランス、作業に対する生体負担度や集中度低下、覚醒度低下などを連続的に評価提示することにより、生活習慣病患者の日常的な健康管理、労働による過労防止や事故軽減に貢献できると考えられる。

現状の心拍変動時系列解析の研究ではフーリエ変換、ARモデル、ウェーブレット変換などを用いて、オフライン処理で周波数、パワースペクトルから生体状態を評価する研究が多い。しかし、これらの解析法は理論式が複雑、データ数の制約、サンプリングが必要など連続算出が困難である。したがって、測定した結果を連続的に出力する簡単な手法が期待されている。そのため、本研究では、測定した結果を連続的に出力し、かつ、簡便に算出できる心拍変動指標を提案して、日常生活

<sup>1</sup> 愛知工業大学 経営情報科学部 (豊田市)

における、覚醒・睡眠の呼吸状態、精神ストレス状態、リラックス状態などの生体状態を連続評価するモニタリング装置の開発および医学実験へのモニタリング装置の適用を目的とする。

本論文では心拍変動時系列から簡便に算出できる心拍変動指標を提案して、生体状態の連続評価するモニタリング装置の開発とその応用について記述する。本論文は6章から構成されている。

第1章は序論で、研究背景、研究目的などを述べている。

第2章は心拍変動時系列の極値の個数に基いた高速かつ簡易的に周波数を連続算出する手法の提案を行った。具体的には、心拍変動時系列の極値の個数に基づく生体状態評価指標と周波数連続算出法の提案である。極値は、時系列の3つのデータの増減を調べて判定しており、簡単なアルゴリズムとなっている。周波数を連続算出するためにキュー型処理を用いて算出窓を1拍ごとにシフトさせ、周波数を高速連続算出した。心拍動時系列から周波数を簡易的に高速算出するために、心拍変動時系列の極値の総数と全データ数との比率(Number of Extreme Point)と、平均心拍数HRを用いて周波数を算出する手法を提案した。また、心拍変動を模擬したシミュレーション時系列を多数用いて、連続算出するための最適窓幅の検討を行った。

第3章は、第2で提案した周波数の連続算出アルゴリズムを用いて心拍変動時系列から、覚醒時、睡眠時および息止め時の呼吸状態を連続推定した。また、心拍のように簡易的に測定できる脈波の利用も試みた。本研究で提案するNEPを生体の呼吸周波数推定に適用した。呼吸周波数は86.2%の精度で算出が可能である。睡眠時においては、従来の研究のノンレム睡眠およびレム睡眠の呼吸変化が本研究の結果と一致しているため、睡眠時の呼吸状態も推定できる。従来手法は連続推定が困難であったが、NEP手法は理論式が簡単であるため、高速かつ簡易的に状態推定が可能である。

第4章は、複数の心拍変動指標を用いて、暗算による精神ストレス時とリラクゼーション映像視聴によるリラックス時におけるストレス・リラクゼーション連続判定の研究を行った。被験者26名の各状態のデータを用いて心拍変動指標の数値結果およびアンケートによる主観評価の結果から、生体状態の判定閾値を算出した。また、結果を出力する提示装置の作製も行った。

第5章は、これまで提案してきた手法を宇宙医学

実験へ応用した。この研究は過重力負荷時の自律神経活動バランスの乱れから生ずる失神を、心拍変動時系列から予測する手法を開発したものである。ここでは、心拍変動に現れる変動の乱れを定量的に評価する指標を提案し、それによる失神の予測精度について述べる。

第6章は、この研究から得られた結果をまとめる。

#### 論文審査結果の要旨

経済産業省では、「健康寿命80歳の実現」に向けて人間生活技術の検討を進めている。主な人間生活技術として、ストレス・疲労の計測の技術、高齢者の健康状態の計測の技術などが挙げられる。現状の生体計測の脳波、心拍、血圧、筋電図、発汗量などの生体信号の平均値、周波数、パワーなどを用いて生体負担度、自律神経活動、呼吸状態などを評価している。特に心拍は外乱によるノイズが少なく、携帯型心拍計により無負担・無拘束で24時間連続測定が可能であり、使いやすい生体信号である。現在の心電計は、結果を連続的に提示するモニタリング機能を備えた装置例は殆んど認められない。結果を連続提示するモニタリング機能を搭載することにより、時間を問わず、その場で確認・警告が可能であると考えられる。

本論文は、簡便に測定できる心拍を用いて、日常生活における、ストレス・リラックス状態、呼吸状態、医療での自律神経活動および宇宙医学での人の状態などを連続推定するモニタリング手法の開発を目的とする。従来の医療のための心拍変動時系列の研究開発では周波数・パワー解析はフーリエ変換、自己回帰モデル(ARモデル)、ウェーブレット変換などを用いて、オフライン処理で周波数、パワースペクトルから生体の状態を推定、評価することが多い。しかし、これらの解析法は理論式が複雑、データ数の制約、サンプリングが必要など連続算出が困難である。したがって、測定した結果を連続的に出力する簡単な手法が期待されている。本論文は6章から構成されている。

本論文の第1章は序論で、研究背景、研究目的などを述べている。第2章では、心拍変動時系列の極値の個数に基づく生体状態評価指標と周波数連続算出法の提案である。心拍動時系列から周波数を簡易的に高速算出するために、心拍変動時系列の極値の総数と全データ数との比率(Number of Extreme Point)と、平均心拍数HRを用いて周波数

を算出する手法を提案した。極値は、時系列の3つのデータの増減を調べて判定しており、簡単なアルゴリズムとなっている。周波数を連続算出するためにキュー型処理を用いて算出窓を1拍ごとにシフトさせ、周波数を高速連続算出した。提案法の精度評価をするために、心拍変動時系列を模擬したシミュレーション時系列を作成し(全36例)、提案法で算出された周波数時系列の平均値求め、理論値周波数に対する誤差率を算出し、S/N比別に誤差率の平均値を求めた。算出窓幅は4~20拍とした。白色雑音を含まない場合、誤差率の平均値は約4%であり、S/N比が20および10の白色雑音を含むと誤差率の平均値が小さくなり、S/N比が7から5においては、誤差率の平均値は大きくなる結果となった。従って、算出窓幅4~20の範囲では誤差率が2~5%と小さく、提案法の精度が確認された。

第3章では心拍変動からの呼吸周波数の推定である。本研究で提案するNEPを生体の呼吸周波数推定に適用した。呼吸周波数は86.2%の精度で算出が可能である。睡眠時においては、従来の研究に基づいて考察したが、ノンレム睡眠およびレム睡眠の呼吸変化がそれらの結果と一致しているため、睡眠時の呼吸状態も推定できると考えられる。従来手法は連続推定が困難であったが、NEP手法は理論式が簡単であるため、高速かつ簡易的に状態推定が可能である。本研究で提案するNEPを生体の呼吸周波数推定に適用した。自律神経活

動の推定は仰臥位・立位データで確認し、有意に自律神経活動バランスを推定できる結果を得た。

第4章は複数の心拍変動指標を用いて、暗算による精神ストレス時およびリラクゼーション映像視聴によるリラックス時におけるストレス・リラクゼーションのNEP値を中心とする、連続判定の研究である。被験者26名の各状態のデータを用いて心拍変動指標の算出結果およびアンケートによる主観評価から、生体状態の判定閾値を算出した。また、結果を出力する提示装置の製作も行った。

第5章は、これまで提案してきた手法を宇宙医学実験における過重力に対する失神状態による自律神経のバランスの崩れの予測値手法に発展させた。第6章は結論である。これらの研究成果は医学の専門学会の自律神経学会の吉田君の筆頭論文として、一昨年度、今年度の2回の論文賞の受賞になった。

以上、本論文は、心拍時系列による状態推定のための連続モニタリング手法を開発して、医療における自律神経系をはじめ、各分野での生体の状態を効率よく測定・評価できることにより、広く適用できる方法論を示した。よって、本論文は、経営情報科学研究科の課程博士の学位論文として十分、その価値が認められる。

以上により、学位審査委員会において、提出論文の内容を中心としてこれに関連ある科目の学識及び研究指導能力について諮問し、慎重に審査した結果、合格と判定した。

(受理 平成20年3月19日)