

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12105

研究課題名(和文) 心拍データに隠れた潜在構造の特定による睡眠段階推定

研究課題名(英文) Sleep stage estimation by specifying latent structure of heartbeat data

研究代表者

高玉 圭樹 (TAKADAMA, Keiki)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：20345367

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、体調/加齢/障害によって動的に変化する睡眠状態(睡眠のリズムや深さなど)に対して、心拍データに隠れた潜在構造(「睡眠特性」と呼ぶ)を心拍データからマイニングすることで、高い精度で睡眠段階を推定する無拘束型睡眠段階推定手法を探究した。具体的には、心拍データから各人のウルトラディアンリズム(ノンレム/レム睡眠の周期)を構成する周波数成分の組合せを睡眠特性として特定し、(1)体調の変化にロバストで、(2)年齢の変化に追従可能であることに加え、(3)睡眠障害の影響を考慮した睡眠段階推定を考案し、その効果を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This research focuses on the sleep stage estimation method without connecting any devices to human body, and improves its estimation capability even in bad health condition, aging process, and sleep disorder. Since a sleep rhythm or deepness is affected by health condition, aging, and/or sleep disorder, this research proposed the approach of mining the latent structure of heartbeat data (called the sleep property) to specify the common sleep property as a combination of the frequency components of the ultradian rhythm (i.e., a cycle of non-REM and REM sleep) derived from the heartbeat data. To investigate the effectiveness of the proposed approach, we conducted the human subject experiments which revealed that the improved sleep stage estimation method based on the proposed approach is robust to bad health condition, adapts to aging, and copes with sleep disorder.

研究分野：マルチエージェント、進化計算、機械学習

キーワード：ソフトコンピューティング 機械学習 睡眠段階推定 人工知能

1. 研究開始当初の背景

日本では5人に1人(2400万人)が睡眠障害を患っており、脳波などから得られた睡眠段階を基に診断している。しかし、この方法では患者に一晚中器具を装着させる必要があるため、それに代わる簡易的な方法が求められている。その従来手法として、直接器具をつけずに生体データ(心拍/呼吸/体動)を計測できる無拘束エアマットレス型センサが開発され、得られたデータから睡眠段階を推定している。これらの多くの方法は「睡眠段階」と「心拍変動の中周波成分」に強い相関があるという知見に基づいており、適切な心拍変動の中周波成分を抽出できれば大まかに睡眠段階が推定可能となる。しかし、これらの手法における心拍変動の中周波成分は固定されており、誰に対しても同じ精度で睡眠段階を推定できない。

上記の問題解決のため、申請者は今までに**人毎に異なる心拍変動の中周波成分(=ノンレム/レム睡眠の周期であるウルトラディアンリズム)**を抽出し、それに基づいた睡眠段階推定手法を提案した。具体的には、図1のように心拍データにFFTをかけ、心拍変動の周波数成分に変換後、各人のウルトラディアンリズムを抽出するバンドパスフィルタ(0は遮断、1はパスを意味する)をかける。その後、IFFTをかけ離散化することで睡眠段階を推定する。ここでは、各人のウルトラディアンリズムを抽出するフィルタの発見が重要であり、そのための進化計算手法を考案し、睡眠段階の推定精度の向上に成功している。なお、睡眠段階は、図1右下に示すように、浅い睡眠から深い睡眠にかけて「覚醒」、「REM睡眠」、「ステージ1」、「ステージ2」、「ステージ3」、「ステージ4」に分かれており、それぞれ便宜上、W, R, 1, 2, 3, 4と記載している。

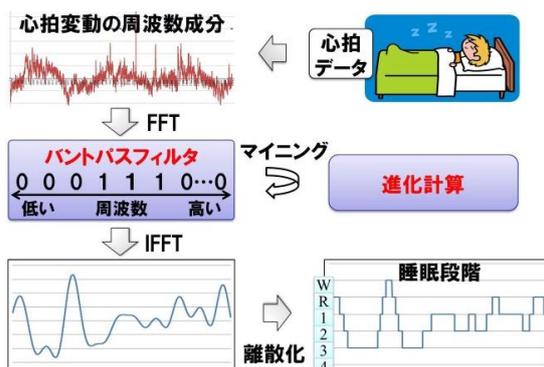


図1 睡眠段階推定方法

2. 研究の目的

前章で説明した提案手法は、通常の健康的な日を前提としている。しかし、(1)同じ人でも体調によって睡眠リズムは異なり、(2)高齢になると睡眠の深さは浅くなり、(3)睡眠障害を患うと睡眠のサイクルが変わるため、このような動的な変化に対応できない。このよう

な背景から、本研究ではこれらの問題を克服する睡眠段階推定手法を探究し、その有効性を検証することを目的とする。

3. 研究の方法

今までの提案手法では、心拍データを**各人のウルトラディアンリズム**を構成する周波数成分に変換して睡眠段階を推定したが、抽出されたウルトラディアンリズムは、体調が変化したり、年齢が増加したり、睡眠障害が起こったりすると健康的な日のリズムからずれてくる。そこで、体調の変化、年齢の変化、睡眠障害の変化に影響しない共通の睡眠構造を見出すことが睡眠推定精度を維持するために重要となる。この問題に対処するために、提案アプローチではウルトラディアンリズムを構成する周波数成分の組合せから**心拍データに隠れている一貫した潜在構造**(以下、**睡眠特性**と呼ぶ)をマイニングすることで、高い精度で睡眠段階を推定するという研究方法をとる。これらの実施に向け、本研究では次に示す課題に分けて取り組む。

・[課題1] 体調の変化にロバストな睡眠段階推定

同じ人でも体調によって睡眠のリズムは異なるため、その変動に「ロバストな」睡眠特性の抽出技術を考案する。

・[課題2] 年齢の変化に追従可能な睡眠段階推定

高齢者は、加齢に伴い睡眠の深さは浅くなるため、その変化に「追従可能な」睡眠特性の抽出技術に取り組む。

・[課題3] 睡眠障害の影響を考慮した睡眠段階推定

睡眠障害を患うと睡眠の周期的なリズムが崩れるため、その変化を「考慮した」睡眠特性の抽出技術を探究する。

4. 研究成果

以下、3つに分けた研究課題に対する成果と得られた成果の効果をまとめる。

・[成果1] 体調の変化にロバストな睡眠段階推定

同じ人でも体調によって睡眠のリズムは異なるため、その変動に「ロバストな」睡眠特性の抽出技術を探究した。具体的には、特定日のみ推定精度の高い心拍変動の周波数成分の組合せで表される「睡眠特性」を見出すのではなく、複数日にまたがって推定精度の高い組合せを見出すことで、体調変化にロバストな睡眠段階推定方法を考案した。

提案手法の有効性を検証するために、体調の悪い日の睡眠段階推定を従来手法と提案手法(複数日活用手法)と比較した。その結果を図2に示す。この図における縦軸

は6段階に分かれた睡眠段階を示し、横軸は睡眠時間を示す。また、同図(i)は従来手法、同図(ii)は提案手法を示し、その中でも実線は病院の診断で用いられる脳波計のデータに基づいた睡眠段階測定法(終夜睡眠ポリグラフ: Polysomnography (PSG)) (正解)、点線は従来あるいは提案手法の結果を示している。この図から、従来手法による推定睡眠段階は PSG に対して大きくずれている(厳密には1段階下にずれている)のに対し、提案手法による推定睡眠段階ではそのずれは解消されている。具体的な PSG との一致率でみると、提案手法は従来手法に比べて精度を 1.25 倍向上させることに成功した。

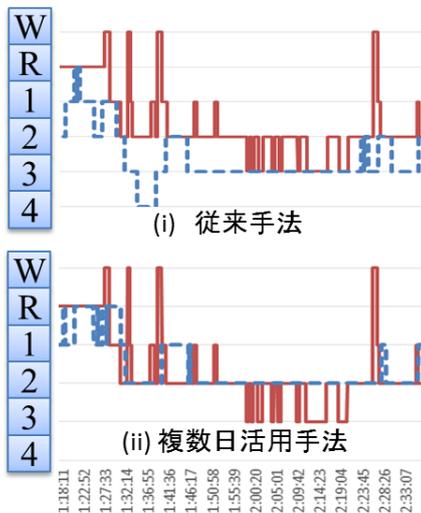


図2 体調の悪い日

・[成果2] 年齢の変化に追従可能な睡眠段階推定

高齢者は加齢に伴い睡眠の深さは浅くなるため、その変化に「追従可能な」睡眠特性の抽出技術を探求した。具体的には、高齢になるにつれて覚醒状態が増え、ノンレム睡眠が少なくなるため、ノンレム/レム睡眠の割合が変化する。そこで、比較的最近の過去の自分の睡眠特性を活用することで、各人の年齢を加味した「睡眠特性」を見出すことができるようになる。

提案手法の有効性を検証するために、高

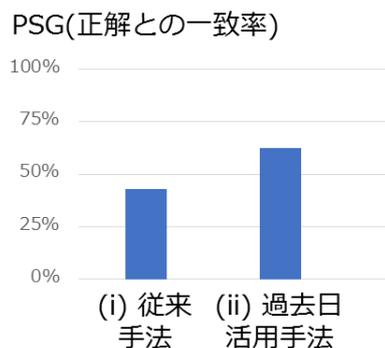
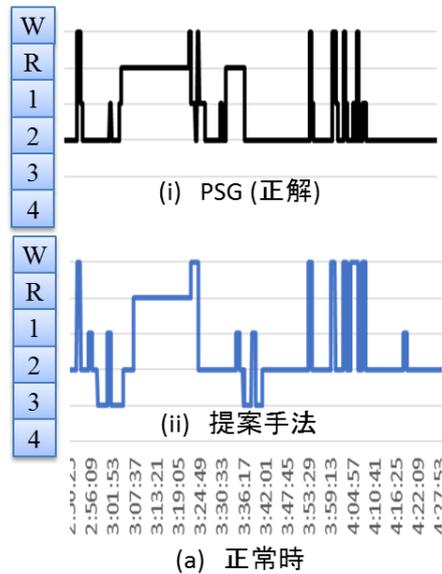


図3 高齢者の睡眠段階推定

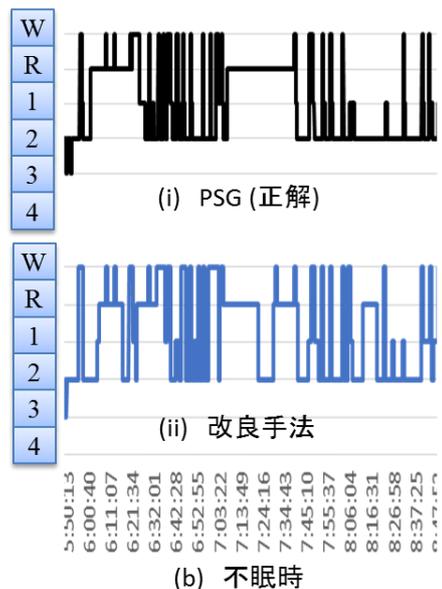
齢者の段階推定を従来手法と提案手法(過去日活用手法)で比較した。その結果を図3に示す。この図における縦軸は PSG(正解との一致率)、横軸は従来手法と提案手法の違いを示している。この図から、年齢を考慮しない従来方法に比べて、比較的最近の過去の自分の睡眠特性を活用した提案手法によって睡眠段階の精度を向上させることに成功した。

・[成果3] 睡眠障害の影響を考慮した睡眠段階推定

正常時の睡眠段階ではノンレム/レム睡眠の周期がきれいに現れるが、睡眠時無呼吸症候群や不眠症(徹夜や時差ボケを含む)などの睡眠障害を患うと、頻繁に覚醒状態に陥る。この不安定なサイクルは個人差がとても大きく、一般的な法則は見出せない。この問題に対処するために、周期的なウルトラディアンリズムに基づく睡眠段階推定手法に、周期的ではない覚醒状態を特定



(a) 正常時



(b) 不眠時

図4 正常時と不眠時

する手法を組み合わせる方法を考案した。

提案手法の有効性を検証するために、通常時と不眠時の睡眠段階を比較した。その結果を図4に示す。この図における縦軸と横軸は図2と同じことを意味する。特に、同図(a)(b)とも上段はPSG(正解)、下段は提案手法(過去日活手法に体動判定を追加した手法)の結果を示している。この図から、正常時では覚醒状態が少ないため、提案手法は部分的に間違っ推定している箇所もあるが、全体的に睡眠段階を推定できていることがわかる。一方、不眠時では覚醒状態が多くなることからウルトラディアンリズムに基づいて睡眠段階を推定することは難しいが、その状態でさえ、提案手法は適切に推定し、睡眠段階の推定精度の大幅な向上に成功した。

・得られた成果の効果と今後の展望

提案手法の推定精度がさらに高まれば、(1)体調の変化にロバストに睡眠段階を推定できるため、2008年から施行された「40歳以上75歳未満の保険加入者および扶養家族全員(5800万人)の健康診断の義務化」に対して、提案技術を健康管理指導サービスに活用できる可能性がある。具体的には、体調の変化によらず適切なリズムの睡眠がとれるようにライフスタイルを改善させ(日ごろの健康管理を指導し)、社会問題化しているメタボリック症候群や生活習慣病のリスクを低減することに貢献する。次に、(2)年齢の変化に追従可能な睡眠段階推定によって、一般的に難しいとされる高齢者の睡眠状態を把握することが可能となる。これによって、夜間、睡眠が浅い高齢者のケアに専念でき、少ない介護者で深夜徘徊を未然に防ぐことが可能となる。最後に、(3)睡眠障害による変化を考慮した睡眠段階推定によって、睡眠時呼吸症候群をはじめとする睡眠障害者の早期発見などに展開できる可能性が高まる。

これらは、提案手法が(1)健康(睡眠状態から日ごろの健康管理指導)、(2)介護・福祉(高齢者の睡眠状態からの徘徊ケア)、(3)医療(睡眠障害者の早期発見)という異なる分野に適用できることを意味しており、工学的に意義が高い。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 高玉 圭樹, 村田 暁紀, 上野 史, 田島 友祐, 原田 智広, 快眠を導く音とは: 心拍・呼吸に連動した音の睡眠への影響, 人工知能学会誌, Vol. 31, No. 3, pp. 383-388, 2016, 査読有 <http://contract-able17.rssing.com/browser.php?indx=9508881&item=31>

- ② Tajima, Y., Nakata, M., Matsushima, H., Sato, H., Hattori, K., Takadama, K., Evolutionary algorithms for uncertain evaluation functions, *New Mathematics and Natural Computation*, World Scientific, Vol. 11, No. 2, pp. 201-215, 2015, 査読有
DOI: 10.1142/S1793005715400062

[学会発表] (計 13 件)

- ① 田島 友祐 (原田 智広, 高玉 圭樹), 心拍数変動の類似性を考慮したリアルタイム睡眠段階推定, 2017年度人工知能学会全国大会(第31回), 2017.5.25, 査読有, ウィンク愛知(愛知・名古屋)
- ② Harada, T. (Kawashima, T., Morishima, M., Takadama, K.), Improving Accuracy of Real-time Sleep Stage Estimation by Considering Personal Sleep Feature and Rapid Change of Sleep Behavior, *The AAAI 2017 Spring Symposia, Wellbeing AI: From Machine Learning to Subjectivity Oriented Computing*, AAAI (The Association for the Advancement of Artificial Intelligence), pp. 665-672, 2017.3.29, 査読有, Palo Alto (USA)
- ③ Tajima, Y. (Harada, T., Takadama, K.) Sleep Stage Estimation using heartrate approximate minimum method, *The AAAI 2017 Spring Symposia, Well-being AI: From Machine Learning to Subjectivity Oriented Computing*, AAAI (The Association for the Advancement of Artificial Intelligence), pp. 734-739, 2017.3.29, 査読有, Palo Alto (USA)
- ④ 上原 知里 (松本 和馬, 田島 友祐, 小峯 嵩裕, 原田 智広, 佐藤 寛之, 高玉 圭樹), 覚醒と浅睡眠に着目した圧力センサに基づく非侵襲的睡眠段階推定とその精度向上, 計測自動制御学会, 第44回知能システムシンポジウム, 2017.3.14, 査読有, 東海大学(東京・港区)
- ⑤ 原田 智広 (川嶋 隆宏, 森島 守人, 高玉 圭樹), 個人の睡眠特徴を考慮したリアルタイム睡眠深度推定の精度向上, 第3回ヘルスケア・医療情報通信技術研究会(MICT), 電子情報通信学会信学技報, Vol. 116, No. 224, MICT2016-47, pp. 63-68, 2016.9.16, 査読有, 東京農工大(東京・小金井)
- ⑥ Tajima, Y. (Harada, T., Sato, H., Takadama, K.), Personalized real-time sleep stage from past sleep data to today's sleep stage *The 18th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International 2016)*, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 9735, Springer-Verlag, pp. 501-510, 2016.7.20, 査読有, Toronto (Canada)

- ⑦ 山木 清志 (森島 守人, 植屋 夕輝, 高玉 圭樹, 角谷 寛), 生体リズムに連動した音の特徴と睡眠因子との関連について, 第41回日本睡眠学会シンポジウム, 日本睡眠学会, p. 261, 2016. 7. 8, 査読有, 京王プラザホテル (東京・新宿)
- ⑧ 森島 守人 (山木 清志, 川嶋 隆宏, 菅野 智, 原田 智広, 高玉 圭樹), Biofeedback ; 快眠音による睡眠介入への展開, 第41回日本睡眠学会シンポジウム, 日本睡眠学会, p. 176, 2016. 7. 8, 査読有, 京王プラザホテル (東京・新宿)
- ⑨ Harada, T. (Uwano, F., Komine, T., Tajima, Y., Kawashima, T., Morishima, M., Takadama, K.), Real-time Sleep Stage Estimation from Biological Data with Trigonometric Function Regression Model, The AAAI 2016 Spring Symposia, Well-Being Computing: AI Meets Health and Happiness Science, AAAI (The Association for the Advancement of Artificial Intelligence), pp. 348-353, 2016. 3. 22, 査読有, Palo Alto (USA)
- ⑩ Komine, T. (Takadama, K., Nishino, S.), Human Body Vibration Analysis - Toward the Next Generation Sleep Monitoring /Evaluation, The AAAI 2016 Spring Symposia, Well-Being Computing: AI Meets Health and Happiness Science, AAAI (The Association for the Advancement of Artificial Intelligence), pp. 369-374, 2016. 3. 22, 査読有, Palo Alto (USA)
- ⑪ Morishima, M. (Sugino, Y., Ueya, Y., Kadotani, H., Takadama, K.), Effects on Sleep by 'Cradle Sound' Adjusted to Heartbeat and Respiration, The AAAI 2016 Spring Symposia, Well-Being Computing: AI Meets Health and Happiness Science, AAAI (The Association for the Advancement of Artificial Intelligence), pp. 387-393, 2016. 3. 22, 査読有, Palo Alto (USA)
- ⑫ 星野 秀彰 (村田 暁紀, 建部 尚紀, 中田 雅也, 佐藤 寛之, 高玉 圭樹), 半教師あり学習に基づく進化的クラスタリングによる快眠音の個別適応化, 計測自動制御学会, 第43回知能システムシンポジウム, 2016. 3. 11, 査読有, 室蘭工業大学 (北海道・室蘭)
- ⑬ 山木 清志 (植屋 夕輝, 石原 淳, 森島 守人, 原田 智広, 高玉 圭樹, 角谷 寛), 生体リズムに連動した音と音色の違いによる睡眠に及ぼす影響, 第40回日本睡眠学会シンポジウム, 日本睡眠学会, p. 255, 2015. 7. 3, 査読有, 栃木県総合文化センター (栃木・宇都宮)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: 心拍数変化と機械学習によるREM推定技術

発明者: 高玉 圭樹, 上原 知里, 原田 智広

権利者: 電気通信大学 (出願人)

種類: 特許

番号: 特願 2017-066199 (出願番号)

出願年月日: 2017. 3. 10 (申請中)

国内外の別: 国内

名称: 睡眠段階推定装置, 生体データ推定装置, 睡眠段階推定方法, 生体データ推定方法, 睡眠段階推定プログラムおよび生体データ推定プログラム

発明者: 高玉 圭樹, 原田 智広

権利者: 電気通信大学 (出願人)

種類: 特許

番号: PCT/JP2016/050831 (出願番号)

出願年月日: 2016. 3. 14 (申請中)

国内外の別: 国内・国外

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高玉 圭樹 (TAKADAMA, Keiki)

電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授

研究者番号: 20345367

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者 なし