

テクニカルノート

睡眠段階遷移時の心拍変化に着目した 睡眠段階推定技術

武田 十季^{1,a)} 新島 有信¹ 渡部 智樹¹ 吉田 和広¹ 水野 理¹

受付日 2016年6月10日, 採録日 2016年7月28日

概要: ユーザが健康な生活を送るためには、ユーザ自身が日々の睡眠状態を把握して、良い睡眠を確保できるよう意識することが重要である。日常生活におけるユーザの睡眠状態を客観的に把握するために、近年では、侵襲性の低いセンサデバイスで計測可能な心拍変動のみを用いて、睡眠段階を分類する研究が取り組まれている。従来の研究では睡眠段階の系列について機械学習によるモデル化を行って予測していたが、睡眠の性質は個人差が大きく、一部のユーザについて予測精度が低下するという問題があった。本研究では、個人差の問題に対して、睡眠段階が異なる段階へ遷移する周辺にて、心拍が大きく変化する傾向に着目し、心拍の分散を用いて、あらかじめ睡眠段階の遷移傾向が高いグループと低いグループに分けて学習・推定を行うことを提案する。さらに本研究では、睡眠段階遷移と心拍の変化の関係性をとらえる新たな心拍特徴量の検討をあわせて行い、精度向上を目指す。45名の健常者の覚醒・レム睡眠・ノンレム睡眠の3段階を分類する評価実験では、提案手法が従来手法に比べて高い精度で分類できたことを確認した。

キーワード: 睡眠段階, 心拍変動, データマイニング

Sleep Stage Classification Based on a Relationship between Sleep Stage Transition and Heart Rate Change

TOKI TAKEDA^{1,a)} ARINOBU NIJIMA¹ TOMOKI WATANABE¹ KAZUHIRO YOSHIDA¹ OSAMU MIZUNO¹

Received: June 10, 2016, Accepted: July 28, 2016

Abstract: We proposed a new estimation model of sleep stage based on a relationship between sleep stage transition and heart rate change. We focused on the tendency of the magnitude of HRV change to be greater during sleep stage transitions than when sleep stage is constant. Our proposed model includes the probability of HRV change when the sleep stage transitions and selects the distribution and transition probabilities model of the sleep stages for each period of time based on the magnitude of HRV change. Experimental results demonstrated that this model provides more accurate sleep stage classification than conventional models.

Keywords: sleep stage, heart rate variability, data mining

1. はじめに

短時間睡眠や夜型生活の多い現代社会では、睡眠不足や睡眠障害が増加し社会的な問題となっている。睡眠の欠如は、認知機能や免疫機能を低下させ [1], 事故や病気のリスクを高める可能性がある [2]。睡眠を阻害する要因は様々

あり、生活スタイルの変化や日々のストレス、寝室の照明や就床環境などがあげられる。ユーザが健康な生活を送るためには、ユーザ自身が睡眠の状況を知り、十分な睡眠の確保や睡眠環境の工夫を試みる必要がある。そのため、ユーザが日々の睡眠状態を客観的に把握できる必要がある。

医療分野では睡眠状態を診断するために、睡眠ポリグラフ検査によって、一定時間ごとの睡眠の状態を覚醒、レム睡眠、ノンレム睡眠（ステージ1~4）の6段階に分類して

¹ 日本電信電話株式会社 NTT サービスエボリューション研究所
NTT Service Evolution Laboratories, Yokosuka, Kanagawa
239-0847, Japan

^{a)} takeda.toki@lab.ntt.co.jp

いるが、睡眠ポリグラフ検査はユーザへの拘束性が高く、装置が大規模であるため、日常生活での利用は困難である。

睡眠段階は脳の中樞神経系の活動状態に基づいて定義されるが、自律神経活動とも一定の相関があることが示されており [3]、自律神経活動は心拍変動 (Heart Rate Variability; HRV) に反映されている。さらに近年では、ユーザへの負担を軽減させたウェアラブルセンサが普及し、日常生活での生体データ、特に心拍データを常時計測することが容易になっていることから [4]、心拍変動を用いた睡眠段階の推定に関する研究が注目を集めている。

心拍変動による睡眠段階3分類の推定技術は、近年様々な研究が取り組まれており [5], [6]、さらなる精度向上は、睡眠状態の良し悪しを判断するうえで、重要な課題である。たとえば、睡眠中の中途覚醒は1回につき1~2分程度のものであるが、この中途覚醒の回数は、睡眠の異常性を把握するうえで重要な情報であるため、短い時間の中途覚醒であっても精度良くとらえられることが望ましい。本研究ではさらなる精度向上に向けて、睡眠段階の遷移と心拍変化に着目した新たな提案を行う。

2. 関連研究

ユーザへの負担が少ないセンサを利用した、睡眠段階推定に関する研究はさかに行われている。腕時計型の加速度センサであるアクチグラフを用いた従来研究では、覚醒と睡眠を高精度に分類している [7], [8]。しかし、アクチグラフでは覚醒と睡眠の2分類のみで、レム睡眠とノンレム睡眠の分類を精度良く推定することは難しい。

心拍変動のみを用いた睡眠段階推定の研究も近年進展している。Mendezら [9] や Xiaoら [5] は、心拍変動から時間領域・周波数領域の特徴量を抽出し、隠れマルコフモデルやランダムフォレストによってレム睡眠とノンレム睡眠の2分類、もしくは、覚醒、レム睡眠、ノンレム睡眠の3分類を推定している。しかし、心拍変動は睡眠以外からも影響を受けるため、長時間にわたる心拍変動の変化傾向は、個人内でも徐々に変わる場合があり、一部のユーザについて予測精度が低下するという問題があった。

本研究では、心拍変動の情報に加え、時間帯ごとの睡眠段階の出現・遷移確率と、その個人差を考慮した新たな生成モデルを提案する。さらに、睡眠段階遷移と心拍の変化の関係性をとらえる新たな心拍特徴量の検討をあわせて行い、精度向上を目指す。

3. 提案手法

本章では、従来手法の課題と、その課題解決にあたっての新たな着眼点を述べ、提案手法について説明する。

3.1 従来手法とその課題

睡眠のように長時間にわたる心拍変動の変化傾向は、概

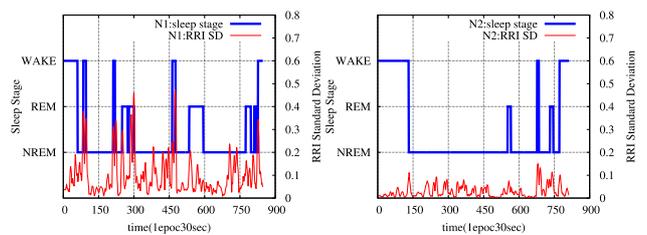


図 1 異なる被験者 2 名の睡眠段階と RRI の標準偏差
Fig. 1 Sleep stage and RRI standard deviation of two subjects.

日リズムなどの影響によって、個人内でも徐々に変わり、それは心拍変動を利用した睡眠段階推定の精度を下げる一因であった。Takedaら [6] はこの問題に対して、心拍変動の情報に加えて、時間帯ごとの睡眠段階の出現・遷移確率を考慮することで、精度向上を実現している。時間帯ごとの睡眠段階の出現・遷移確率とは、睡眠は入眠直後においてはノンレム睡眠が出現、持続する傾向があり、朝方はレム睡眠が持続しやすいなど、睡眠段階が時間帯に依存している点を確率で表したものである。Takedaら提案した生成モデルは以下の式で表される。

$$P(s_t = i | s_{t-1} = j, \mathbf{h}_t, c_t = m) \propto P(s_t | c_t) P(s_t | s_{t-1}, c_t) \prod_{k=1}^K P(h_{tk} | s_t) \quad (1)$$

上式では、時間ステップ t における睡眠段階 s_t の生起確率は、1ステップ前の睡眠段階 s_{t-1} と、就床からの経過時間、つまり現在の時間帯 c_t と、心拍の特徴量の値 \mathbf{h}_t に依存するとしてモデル化を行っている。

しかし、Takedaらの手法では、時間帯ごとの睡眠段階出現・遷移確率の個人差について考慮していなかった。図 1 の青い線は、被験者 2 名 (N1, N2) の睡眠段階を表しており、N1 は中途覚醒が多い被験者で、N2 はノンレム睡眠が多い、つまり深く眠っている被験者の例である。このように、人によって睡眠段階の出現傾向は異なる。そのため、Takedaらの手法のように、時間帯ごとの睡眠段階の出現確率を、すべての被験者に対して、同じ確率で適用してしまうと、一部の被験者では精度低下につながってしまう。

3.2 睡眠段階遷移と心拍変化の関係

3.1 節で述べた課題に対して、本研究では、睡眠段階遷移時の心拍の変化に着目した新たな提案を行う。過去の研究では、睡眠時の RRI^{*1}の値は、ノンレム睡眠のときに増加し、レム睡眠や覚醒時に減少することが確認されている [10]。図 1 の赤い線は、被験者 2 名の RRI の標準偏差を表している。RRI の標準偏差は、窓幅 180 秒スライド幅 30 秒で算出した。図から、睡眠段階が異なる段階へ遷移する周辺では、RRI は大きく変化する傾向があることが見てとれる。

*1 心拍変動は心電図の R 波ピークごとの間隔 (R-R Interval; RRI) を計算して求められる。

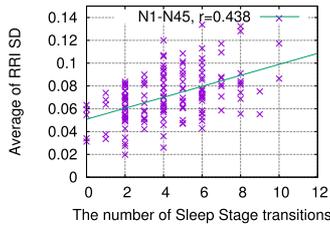


図 2 120 分ごとの、異なる睡眠段階への遷移数と RRI の標準偏差の平均値. 相関係数 $R=0.438$

Fig. 2 The relationship between RRI variability and the number of sleep stage transitions in each 120 minutes.

ここで、健常者 45 名 (16-61 歳, 男性 28 名, 女性 17 名) の睡眠データを利用して、120 分ごとに、睡眠段階が異なる段階へ遷移した回数と、RRI の標準偏差の平均値を算出した。算出結果を図 2 に示す。その結果、睡眠段階遷移数と RRI の標準偏差の平均値との間には正の相関 ($r = 0.438$) が確認できた。つまり睡眠段階が異なる段階へ遷移する回数が多いほど、心拍が大きく変化する傾向があるといえる。睡眠データは、Sleep Heart Rate and Stroke Volume Data Bank (SHRSV) [11] で公開されている、検査技師によって分類された睡眠段階のデータと心拍データを用いた。

我々は、この特徴を利用して、次の観点から睡眠段階推定の精度向上に取り組む。1) 時間帯ごとの睡眠段階出現・遷移確率の個人差による精度低下の改善。2) 睡眠段階の遷移を表す心拍特徴量の生成と確率化による精度向上。

3.3 生成モデル

本研究では、時間帯ごとの睡眠段階出現・遷移確率に個人差があるという課題に対して、前節で述べた、睡眠段階が異なる段階へ遷移する回数が多いほど心拍が大きく変化する傾向がある、という性質を利用して取り組む。本手法では、被験者 45 名のデータより、睡眠段階が異なる段階へ遷移する傾向にある被験者と、睡眠段階が同じ段階で継続する傾向にある被験者を確認したため、あらかじめ RRI の標準偏差に基づいて、時間帯ごとに 2 つのグループに分けることを提案する。そして、各グループ内において、時間帯ごとの睡眠段階出現・遷移確率の学習、推定を行う。

本研究では、さらに、睡眠段階遷移と心拍変化に着目した新たな特徴量も生成する。睡眠段階が異なる段階へ遷移したことを、よく表すことができる心拍特徴量を複数生成し、任意の心拍特徴量値が観測されるときに睡眠段階遷移の尤度として表す。

以上の本提案手法を導入すると、式 (1) の右辺は以下のように変更される。

$$\begin{aligned}
 & [P_a(s_t | c_t)P_a(s_t | s_{t-1}, c_t)]^{m_{c_t}} \\
 & [P_b(s_t | c_t)P_b(s_t | s_{t-1}, c_t)]^{1-m_{c_t}} \\
 & \prod_{k=1}^K P(h_{tk} | s_t) \prod_{w=1}^W P(\Delta h_{tw} | s_t, s_{t-1}) \quad (2)
 \end{aligned}$$

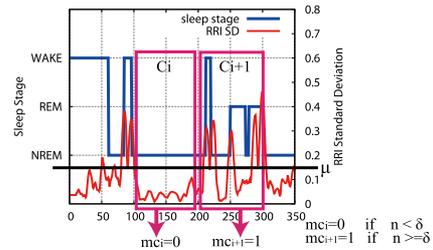


図 3 RRI の標準偏差に基づいた、時間帯ごとの睡眠段階出現・遷移確率のモデル切替えの例

Fig. 3 The example of model change for each period of time based on RRI SD.

時間帯 c_i の睡眠段階の出現・遷移確率のグループは、 m_{c_i} の値によって分けられる。 m_{c_i} は以下の条件で決定される。

$$m_{c_i} = \begin{cases} 0 & \text{if } n < \delta \\ 1 & \text{if else } \geq \delta \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 n は時間帯 c_i において RRI の標準偏差が閾値 μ を超えた回数である。今回は、 μ を 0.14、 δ を 20 と設定した。図 3 にグループ分けの例を示す。 Δh_{tw} には、RRI の窓幅 150 秒、スライド幅 30 秒の標準偏差値、RRI の窓幅 300 秒、スライド幅 30 秒の二乗平均平方根と、スライド幅 30 秒で RRI の 150 秒間の差分値を利用した。ここで、睡眠段階遷移と心拍変化との間に時間差が存在することから、 Δh_{tw} は、窓幅 240 秒の区間内のすべての値を最大値に置き換えることで平滑化した。その他の心拍特徴量 h_{tk} については、Takeda ら [6] による手順と同様に RRI から 12 種類の特徴量を作成した。

4. 評価

4.1 評価方法

提案手法を評価するために、SHRSV [11] のデータベース (45 名) を利用した。比較手法には、サポートベクタマシン (SVM) と Takeda らの手法を用いた。Takeda らの手法と本手法は、心拍の特徴量の値を 6 段階 ($L = 6$) に離散化し、SVM は正規化された値をそのまま利用した。評価は、45 名のうち 44 名を学習データ、1 名をテストデータとした 45-fold クロスバリデーションで行った。評価尺度には、30 秒ごとの睡眠 3 段階の単純な正解率とマクロ平均 F 値による評価に加えて、各段階のデータ数に偏りがあるため、偶然に推定結果が一致する確率を除外した評価指標である Cohen の Kappa 係数 [12] を利用する。

4.2 評価結果

サポートベクタマシン (SVM)、Takeda らの手法、本提案手法のグループ分けのみの手法 (i)、新たな心拍特徴量追加のみの手法 (ii)、(i) と (ii) を合わせた手法による各評価結果を表 1 に示す。提案手法 (i) と (ii) は、いずれも SVM と Takeda らの手法に比べて精度が向上し、(i) と (ii) を合わせた場合は、Takeda らの手法に比べて kappa 係数が約

表 1 45-fold クロスバリデーションによる推定結果
 Table 1 Classification performance for the 45-fold cross-validation.

Model	Accuracy	Cohen's kappa statistic	F-measure (micro-averaged)
SVM	0.721	0.236	0.450
Takeda et al. [6]	0.760	0.418	0.569
手法 (i)	0.767	0.460	0.610
手法 (ii)	0.763	0.440	0.588
手法 (i)+(ii)	0.774	0.483	0.614

6%の改善となった。以上より、睡眠の性質の個人差を考慮した本提案手法と、睡眠遷移時の心拍変化に着目した新たな特徴量は、睡眠段階の推定精度向上に有効であることが示された。なお、6%の向上は、睡眠全体の約30分に相当する。睡眠中の1回の中途覚醒の長さは約1~2分、1回のレム睡眠の長さは約5~20分である。このことから30分の精度向上は、睡眠状態の把握に対して重要な貢献である。

5. まとめ

本研究では、脳の中樞神経系の活動状態から定義される睡眠段階のうち、覚醒・レム睡眠・ノンレム睡眠を心拍変動から精度良く分類する新たな手法を提案した。本提案手法は、睡眠段階が異なる段階へ遷移する周辺で、心拍が大きく変化する傾向に着目し、心拍の分散を用いて、あらかじめ睡眠段階の遷移傾向が高いグループと低いグループに分けて学習・推定を行う点に新規性がある。また、睡眠段階の遷移を表す心拍特徴量も新たに生成しモデル化を行った。45名の健常者の公開データセットを用いた3分類の評価実験では、Kappa係数が0.483まで向上し、従来手法の精度を上回った。本研究の成果は、日々の睡眠の状態を容易に、かつ、精度良く計測する技術の発展に貢献する。

参考文献

[1] Everson, C.A.: Clinical assessment of blood leukocytes, serum cytokines, and serum immunoglobulins as responses to sleep deprivation in laboratory rats, *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, pp.1054-1063 (2005).

[2] Durmer, J.S. and Dinges, D.F.: Neurocognitive Consequences of Sleep Deprivation, *Semin Neurol*, pp.117-129 (2005).

[3] Baharav, A., Kotagal, S., Gibbons, V., Rubin, B.K., REEGT, G.P., Karin, J. and Akselrod, S.: Fluctuations in autonomic nervous activity during sleep displayed by power spectrum analysis of heart rate variability, *Neurology*, Vol.45, pp.1183-1187 (1995).

[4] NTT 技術ジャーナル, Vol.11, pp.16-20 (2014).

[5] Xiao, M., Yan, H., Song, J., Yang, Y., and Yang, X.: Sleep stages classification based on heart rate variability and randomforest, *Biomedical Signal Processing and Control*, Vol.8, pp.624-633 (2013).

[6] Takeda, T., Watanabe, T., Yoshida, K. and Mizuno, O.: Time-dependent Sleep Stage Transition Model Based

on Heart Rate Variability, *DBSJ Japanese Journal*, Vol.14-J, No.16 (2016).

[7] Souza, L.D., Benedito-Silva, A.A., Nogueira Pires, M.L., Poyares, D., Tufik, S. and Calil, H.M.: Further validation of actigraphy for sleep studies, *Sleep*, Vol.26, No.1, pp.81-85 (2003).

[8] Paquet, J., Kawinska, A. and Carrier, J.: Wake detection capacity of actigraphy during sleep, *Sleep*, Vol.30, No.10, pp.1362-1369 (2007).

[9] Mendez, M.O., Matteucci, M., Castronovo, V., Strambi, L.F., Castronovo, V., Cerutti, S. and Bianchi, A.M.: Sleep staging from heart rate variability: Time-varying spectral features and hidden Markov models, *International Journal of Biomedical Engineering and Technology*, Vol.3, pp.246-263 (2010).

[10] Zemaityte, D., Varoneckas, G. and Sokolov, E.: Heart rhythm control during sleep, *Psychophysiology*, pp.279-289 (1984).

[11] Institute of Psychophysiology and Rehabilitation, Kaunas University of Medicine: Sleep Heart Rate and Stroke Volume Data Bank, available from <http://www.pri.kmu.lt/datbank/index.php>.

[12] Gwet, K.L.: *Handbook of Inter-Rater Reliability* (2012).



武田 十季 (正会員)

2011年九州大学芸術工学府大学院修了。同年日本電信電話株式会社に入社。現在、NTT サービスエボリューション研究所勤務。ライフログ、生体信号処理の研究開発に従事。



新島 有信 (正会員)

2012年東京大学大学院工学系研究科博士前期課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。2014年東京大学大学院工学系研究科博士後期課程に入学し、現在に至る。日本バーチャルリアリティ学会会員。



渡部 智樹 (正会員)

1992年横浜国立大学工学部卒業。同年日本電信電話株式会社入社。現在、NTT サービスエボリューション研究所主任研究員。博士(工学)。電子情報通信学会会員。



吉田 和広

日本電信電話株式会社 NTT サービスエボリューション研究所所属。1996年東京工業大学大学院情報理工学研究科計算工学専攻修了。センシング活用技術の研究開発に従事。



水野 理

1994年早稲田大学大学院理工電気工学研究科修了。同年、日本電信電話株式会社入社。現在、NTT サービスエボリューション研究所勤務。日本音響学会、言語処理学会各会員。

(担当編集委員 波多野 賢治)