

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K19832

研究課題名（和文）複数の要因を考慮した深層学習による日常の睡眠の質推定と要因分析

研究課題名（英文）Estimating and Analyzing Daily Sleep Quality Using Deep Learning with Multiple Factors

研究代表者

福井 健一（Fukui, Ken-ichi）

大阪大学・産業科学研究所・准教授

研究者番号：80418772

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、非接触かつ簡便な計測が可能な音響に基づいて、日常の睡眠の質を推定する深層学習モデルを開発した。1. 睡眠音、日中を含む心拍および活動量、寝室の温度・湿度・照度、就寝前・起床後に睡眠の質、健康や環境に関するアンケートを継続して4週間データ収集を行った。40代から60代の被験者56名追加し、合計385名となった。2. 音響特徴の個人差・環境差の軽減を目的として、ドメイン適応に基づく睡眠評価モデルを提案し、自宅データベースにより効果を検証した。3. 睡眠音に加えて、身体要因、環境要因を特定し睡眠評価可能な深層学習のアーキテクチャを2種類考案し、年代毎の睡眠に及ぼす主要な要因を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は非接触かつ簡便に計測可能な音響に基づく新しい睡眠評価法を提案し、日常の睡眠評価の高精度化に貢献した。本研究により開発した深層学習に基づく睡眠評価モデルは、睡眠音特徴の個人差や環境差に対応し広範囲に利用可能であり、また個人毎に身体・環境要因などと統合して睡眠影響因子を特定が可能である。これにより、将来的に個別化された具体的な睡眠改善策の提供が可能となり、日常の睡眠の質改善により公衆衛生の向上、メンタルヘルス問題などの予防に貢献するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a deep learning model to estimate the quality of daily sleep based on sounds, enabling non-contact and easy measurement. Over a continuous four-week period, we collected data on sleep sounds, heart rate, activity levels during the day, bedroom temperature, humidity, and light levels, and administered surveys about sleep quality, health, and the environment before bed and after waking. 1. 56 additional subjects in their 40s to 60s were recruited, bringing the total to 385 participants. 2. To mitigate individual and environmental differences in sound features, we developed a sleep evaluation method based on domain adaptation and verified its effectiveness using our home database. 3. We proposed two types of deep learning models capable of sleep evaluation, incorporating physical and environmental factors in addition to sleep sounds, revealing the main factors affecting sleep for different age groups.

研究分野：知能情報，機械学習，応用情報

キーワード：睡眠 音響 深層学習 ドメイン適応 マルチモーダル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

睡眠は覚醒時における身体的・精神的・社会的・感情的な機能に影響を及ぼす生体现象であり、十分に質の高い睡眠を確保することは、身体的な健康、心理的なバランスを保つ上で必要不可欠である。睡眠状態の専門的な計測は、主に睡眠ポリグラフ(Polysomnography, PSG)によって行われる。しかし、PSG は被験者の身体的負担が大きく、専門家がいない専門の施設や病院でないと計測が難しい。近年はセンシングデバイスの小型化により、リストバンド型センサや簡易脳波計などによる睡眠評価も可能になってきている。しかし、リストバンド型センサは主に加速度を計測しており、体動を捉えることはできるものの、睡眠状態を適切に評価するには情報が不十分である。また、圧力センサやラジオ波を用いる評価手法も開発されているが、これらは環境側にデバイスを設置する必要がある。

そこで、本研究では非接触かつ簡易に収集できる睡眠音に着目した。睡眠中の音響には、睡眠中に発せられる、いびき、体動、せきといった生体活動や、騒音などの環境に関する情報が含まれている。睡眠音を用いた手法は、従来法と比較して、安価、非接触、多くの生体活動を検知できるなどの利点を持ち、従来のウェアラブルデバイスでは困難であった総合的な睡眠評価が可能になる。しかし、これまで睡眠音に基づく睡眠評価は、睡眠時無呼吸症候群の検出に関するものが主であり、睡眠の質の評価に関しては依然として少ない。

2. 研究の目的

広く一般利用可能で高精度な睡眠評価法の実現には、1. 音響特徴の個人差・環境差の軽減、2. 多様な要因の考慮、が必要と考えた。本研究は、個人差・環境差に影響を及ぼす複数の要因を同時に考慮して日常の「睡眠の質」を推定する深層学習モデルを開発することを目的とした。本課題では音響特徴の個人差・環境差、また睡眠に影響を及ぼす様々な要因を新たに睡眠評価モデルに組み入れることで高精度化を図ると共に、睡眠の質に影響を及ぼす要因の分析を行う。例えば「Aさんは室温が上がると寝返りが多くなり、その結果、睡眠の質が悪くなる」など要因分析ができれば、睡眠の評価に留まらず改善案の提示や、快適な睡眠環境の制御との連携につながる。

3. 研究の方法

本研究課題では以下の3つの課題に取り組んだ。

(1) 自宅における大規模睡眠データベースの構築

代表者は自宅における長期間の睡眠データ収集を行っている。睡眠音(スマートフォンによる録音)、日中を含む心拍および活動量(Fitbit)、寝室の温度・湿度・照度、就寝前・起床後に睡眠の質、健康や環境に関するアンケートを継続して4週間のデータ収集を行っており、これまでに約300名(約8,400夜)集まっている。現在、20代が過半数を占めるため、本課題では30代~60代の被験者を追加で100名程度収集する。

(2) 音響特徴の個人差・環境差を軽減する睡眠評価器の開発

まず、睡眠音の特徴に適した特徴抽出器の選定を行う。そして、特徴量の転移学習の一種であるドメイン適応を応用し、音響特徴の個人差や環境差を軽減する特徴抽出器の開発を行う。両者を組み合わせて睡眠音のパワースペクトルから睡眠の質を出力する深層学習モデルを構築し、課題1で収集したデータベースを用いて精度検証を行う。ここで、年齢に応じて加齢により平均的に睡眠の質は下がっていくため、睡眠音から実年齢(年代)を推定することで睡眠評価法の検証を行った。

(3) 複数要因を考慮した睡眠評価器の開発と要因分析

音響特徴をベースとしつつ、それに加えて身体要因や環境要因など複数の要因を考慮して睡眠の質推定を行うことで、推定精度の向上ならびに要因分析につなげる。そのためのマルチモーダル深層学習モデルを考案する。モダリティ毎にゲート機構を設けるアーキテクチャを採用することで、学習の中で推定に不必要なゲートの重みは自動的に小さくなるため、特徴選択の効果が得られる。なお、身体要因や環境要因は課題1で収集したアンケートを用いる。

4. 研究成果

(1) 自宅における大規模睡眠データベースの構築

これまで同様に被験者各人1ヶ月間自宅にて睡眠データを収集してもらった。40代~60代を中心に新たに56名のデータを収集し、合計385名となった。

(2) 音響特徴の個人差・環境差を軽減する睡眠評価器の開発

(2-1) 概要

特徴抽出器として Variational AutoEncoder (VAE) を用い、ドメイン適応として Domain

Adversarial Neural Network (DANN) を組み合わせた、音響特徴の個人差・環境差を軽減する睡眠評価器を考案した。提案法の概略を以下に示す。

Step 1. Kleinberg のバースト抽出法を応用し、一晩の音データから音イベントを抽出する。

Step 2. 各音イベントの離散周波数パワースペクトルを特徴ベクトルとして、Variational AutoEncoder (VAE) により自己写像を学習し、音イベントの潜在表現を得る。その際、自己写像と共に、ドメイン識別器 (本研究では年代に相当) も同時に学習する。

Step 3. 学習済み VAE の Encoder 部分のみを用いて音イベントの潜在変数を得て、一晩の音イベント系列を入力として LSTM により、年代推定を行う。

(2-2) 提案手法の評価

Step 2 が本課題の中心部分である。まず、AutoEncoder (AE) と比較して、VAE の方が再構成の精度が高いことを確認した。また、周波数パワースペクトルを総和 1 に規格化することで確率分布とみなし、確率分布間の比較尺度として良く用いられる Kullback-Leibler 情報量を VAE の再構成誤差に採用した。通常二乗誤差と比較して、スペクトルの包絡線形状を捉えた潜在表現を獲得できることを確認した。さらに、DANN と組み合わせることで、被験者毎の音特徴の分布の差を軽減し、同じ種類の音イベントが潜在空間上で近くに配置されるように学習されていることが分かる (図 1)。また、年代推定精度の評価では、従来法の VAE+LSTM は F 値 0.68 であったのに対して、提案法の VDANN+LSTM は F 値 0.83 まで推定精度の向上が確認された。以上から、提案法は音特徴の個人差・環境差を軽減して個人の睡眠評価が可能であることが示された。

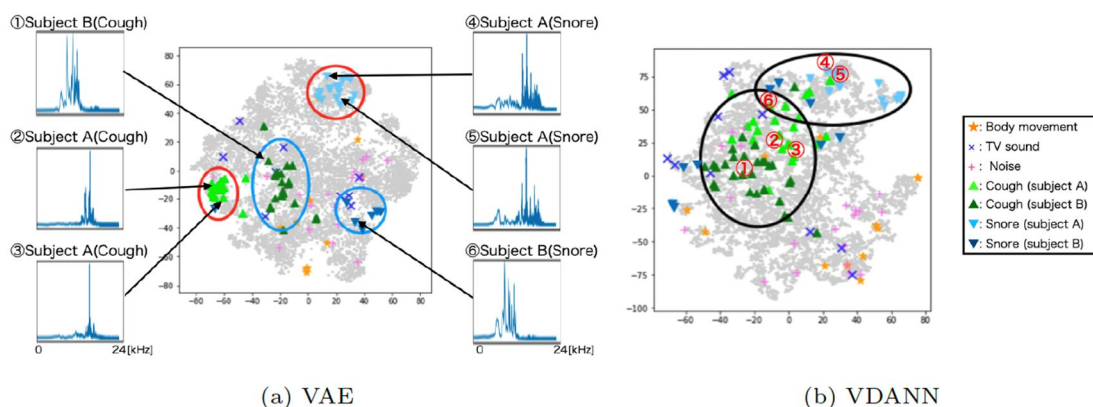


図 1 ある被験者の音イベント集合の潜在空間上の分布比較。(a) 従来の VAE のみ、(b) 提案 VDANN。

(3) 複数要因を考慮した睡眠評価器の開発と要因分析

(3-1) 概要

睡眠音イベントの検出および潜在変数への符号化は(2)に同様に行い、睡眠評価器の学習時に音特徴以外の特徴量(身体要因、環境要因、その他の要因)を考慮するアーキテクチャを2種類考案した。ここで、身体要因は年齢、性別、BMI、環境要因は室温、湿度、騒音度合い、その他の要因は録音時間(おおよそ睡眠時間)、音イベント数である。

複数要因モデル1(図2)では、VAEにより符号化した音イベント系列を入力としてLSTMにより学習する際に、LSTMの初期状態として音以外の特徴を入力している。本方式は音イベント系列の学習を主として、その他の要因は事前知識として初期状態に与える形を採用した。一方、複数要因モデル2(図3)では、LSTMによる音イベント系列の学習と同じ階層にその他の要因を配置し、Gated Variable Selection Network(GVSN)によるゲート機構を設けることで要因カテゴリ選択とカテゴリ内の因子選択の2階層で要因の重み付けを可能にした。なお、本実験での評価対象は主観的な睡眠満足度(good/bad)の2値分類を採用した。

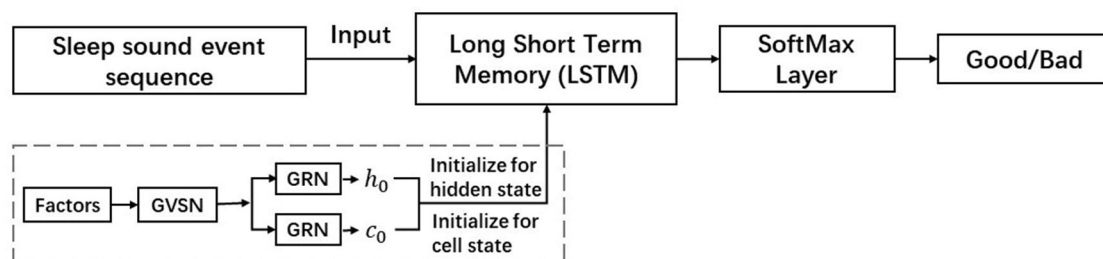


図 2 提案複数要因モデル 1 : LSTM の初期状態として音以外の特徴を入力する方式。

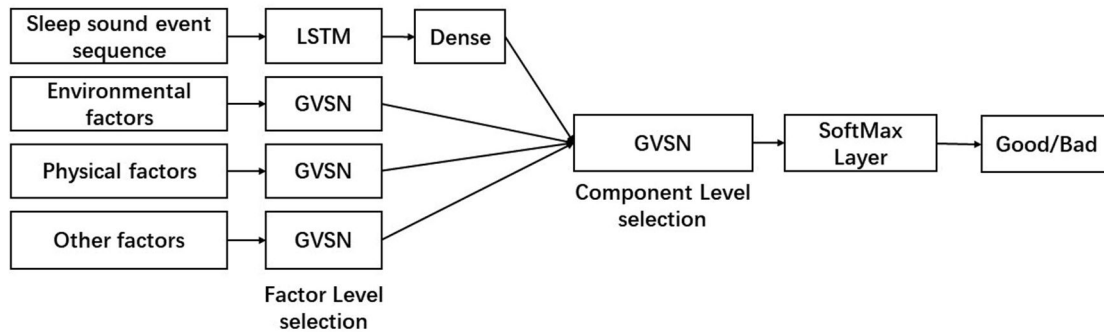


図 3 提案複数要因モデル 2 : LSTM の学習と並列に音以外の要因を学習する方式 .

(3-2) 提案手法の評価

年齢に応じて睡眠に及ぼす要因が変化することが予想されるため, 20 代 63 名, 30 代/40 代 58 名, 50 代/60 代 40 名の 3 グループに分けてそれぞれ評価実験を行った. 音のみの場合 (VAE+LSTM) の場合と比較して, 提案法は Accuracy で 5~10% 程度の向上が確認できた .

(3-3) 要因分析結果

複数要因モデル 2 による学習済みの重みを基に, 年代別に要因分析を行った . まず, カテゴリレベルの重みは, 20 代はほぼ音イベントのみで判別され他の要因の重要度は極めて低いことが分かる (図 4) . 30 代/40 代では音イベントに加えてその他の要因の重要度が上がっており, カテゴリ内の因子レベルの重みから, 特に睡眠時間長が重要であることが分かる (図 3) . また, 50 代/60 代では環境要因が大きくなり, その中でも騒音の重要度が高いことが確認された . これらの妥当性に関しては更なる検証が必要であるものの, 提案法により年代毎に異なる睡眠に及ぼす要因が特定できる可能性が示された .

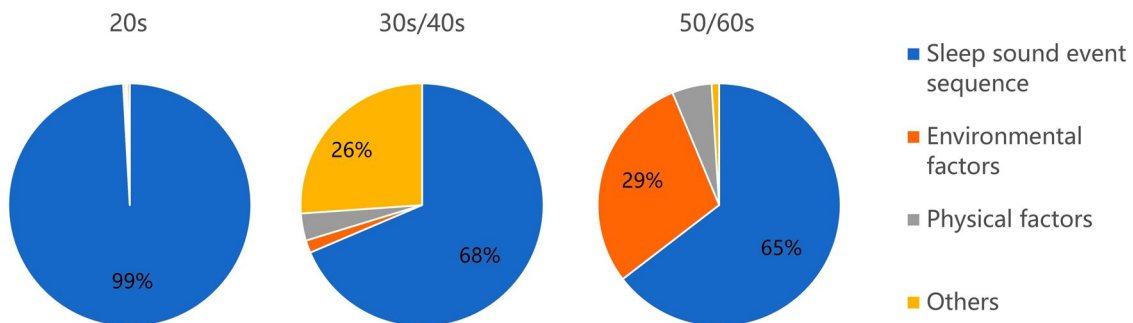


図 4 複数要因モデル 2 による要因分析結果 (カテゴリレベル)

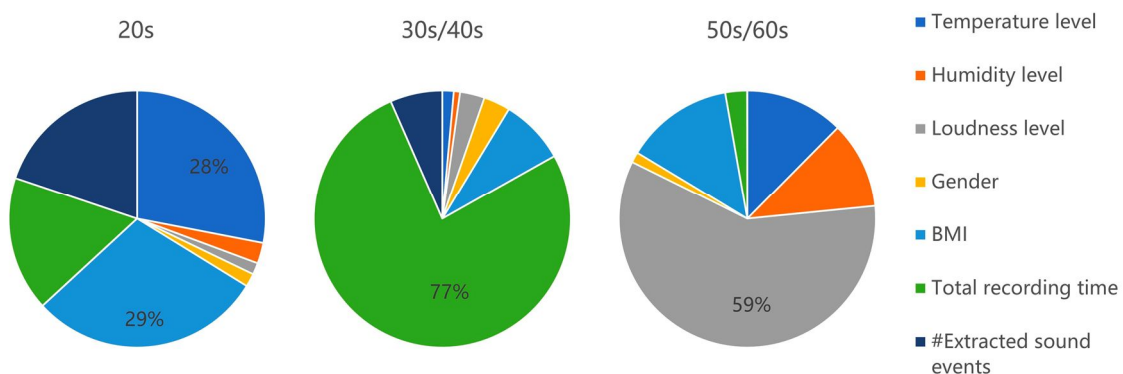


図 5 複数要因モデル 2 による要因分析結果 (因子レベル)

< 引用文献 >

Kleinberg, J.: Bursty and hierarchical structure in streams. *SIG KDD*, (2002).

Lim, B., et al.: Temporal fusion transformers for interpretable multi-horizon time series forecasting. *International Journal of Forecasting*, 37(4), 1748–1764 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 福井健一	4. 巻 75
2. 論文標題 AIによる音響・振動データからの知識発見と予測	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 生産と技術	6. 最初と最後の頁 26-31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ken-ichi Fukui, Shunya Ishimaru, Takafumi Kato, and Masayuki Numao	4. 巻 -
2. 論文標題 Sound-based sleep assessment with controllable subject-dependent embedding using Variational Domain Adversarial Neural Network	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Data Science and Analytics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s41060-023-00407-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yue Chen, Takashi Morita, Tsukasa Kimura, Takafumi Kato, Masayuki Numao, and Ken-ichi Fukui	4. 巻 -
2. 論文標題 Gated Variable Selection Neural Network for Multimodal Sleep Quality Assessment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. 32nd International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN2023)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 福井健一
2. 発表標題 機械学習による音響に基づく日常の睡眠評価
3. 学会等名 パナソニックDAY2.0 ライフサイエンス・セミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福井健一
2. 発表標題 AIによる音響・振動データからの知識発見と予測
3. 学会等名 生産技術振興協会 ハイテク推進セミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福井健一
2. 発表標題 人工知能による睡眠個性可視化と良否判別
3. 学会等名 日本顎口腔機能学会 第69回学術大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福井健一
2. 発表標題 AIによる睡眠の視覚化と良否判別
3. 学会等名 第30回日本睡眠環境学会学術大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shintaro Tamai, Yue Chen, Takashi Morita, Tsukasa Kimura, Masayuki Numao, and Ken-ichi Fukui
2. 発表標題 Sound-based sleep quality prediction considering multiple factors
3. 学会等名 The 26th SANKEN International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yue Chen, Takashi Morita, Tsukasa Kimura, Takafumi Kato, Masayuki Numao, and Ken-ichi Fukui
2. 発表標題 Gated Variable Selection Neural Network for Multimodal Sleep Quality Assessment
3. 学会等名 32nd International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yue Chen, Takashi Morita, Tsukasa Kimura, Takafumi Kato, Masayuki Numao, and Ken-ichi Fukui
2. 発表標題 Gated Variable Selection Neural Network for Multimodal Sleep Quality Assessment
3. 学会等名 2023年度人工知能学会全国大会 (第37回)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	加藤 隆史 (Kato Takafumi) (50367520)	大阪大学・大学院歯学研究科・教授 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------