

睡眠解析に向けた複数センサによるデータ収集システムの開発 およびそのデータ抽出・分析

原田 知親

山形大学大学院 理工学研究科

山形大学有機材料システムフロンティアセンター

E-mail: tharada@yz.yamagata-u.ac.jp

概要

本報告では、日々身も心も健康に過ごせる方法を検討するための第1歩として、比較的研究者でもデータ収集が可能で、山形大学内で唯一1年以上という長期にわたって行われている、複数センサによる睡眠環境データ計測システムについて、そのシステムの構成と運用について述べ、実際に取得したデータについて紹介する。

Abstract

In this paper, I design a simple data acquisition system that can be built with commercially available microcomputers and sensors, and can control multiple sensors using simple Python software, which is used for world wide web programming software. Then, we verify the proposed system through sleep condition data acquisition.

1 はじめに

ここ数年、様々な電子デバイス・集積回路の性能向上で、消費電力や情報処理能力において、実用に耐えうるマイコンシステムやセンサデバイスが増えてきた。また、**Arduino** や **Raspberry Pi** に代表されるような、気軽に使え、かつ情報収集可能なコミュニティが存在するマイコンも増え、それも相まって近年、**IoT(Internet of Things)**による、様々な物理量のデータ取得解析を試みるケースが増加している。

特に近年注目されているものの1つとして、睡眠が挙げられる。日本でいま悩ませているのは疲労やストレスの蓄積等による不眠や睡眠時無呼吸症による睡眠障害である。これによる経済損失もかなり大きいとされ、社会問題となっている。そこで、それらが起こる原因やこれらを解消するために、現在様々な睡眠計測システムが開発され、計測を行なっている。また、一部製品については販売されており[1]-[3]、実際に睡眠計測のみならず高齢者の見守り等にも活用されている。しかし、既存システムでは、ハード・ソフト・サービス一体で販売しているケースが多く、研究者が自由にデータ取得を可能にするシステムがほとんどない。また、完全にクローズドシステムになっているため既存製品ではデータを取得することが難しく、または高額な金額を支払うことで、その細かいデータを取得するのが現状である。

そこで、本報告では、日々身も心も健康に過ごせる方法を検討するための第1歩として、比較的研究者でもデータ収集が可能で、山形大学内で唯一1年以上という長期にわたって行われている、複数センサによる睡眠環境データ計測システムについて、そのシステムの構成と運用について述べ、実際に取得したデータについて紹介する。

2 複数センサ計測システム

2.1 システム構成

図1(a)(b)に本研究で最初に試作したシステムの構成図と全体写真、図2にセンサモジュールの写真をそれぞれ示す。図1のように、構成として、加速度センサ(ADXL345)、温度・湿度センサ(AM2320)を2.0cm x 4.5cmの形状に集積した小型センサモジュール(Small sensor module)と、マイクロコンピュータであるRaspberry Pi 2、そして室内の温度・湿度・気圧を計測するためのセンサとして、BME280から構成される。センサとマイコンは、シリアルバスとしてI2Cを経由して接続される。

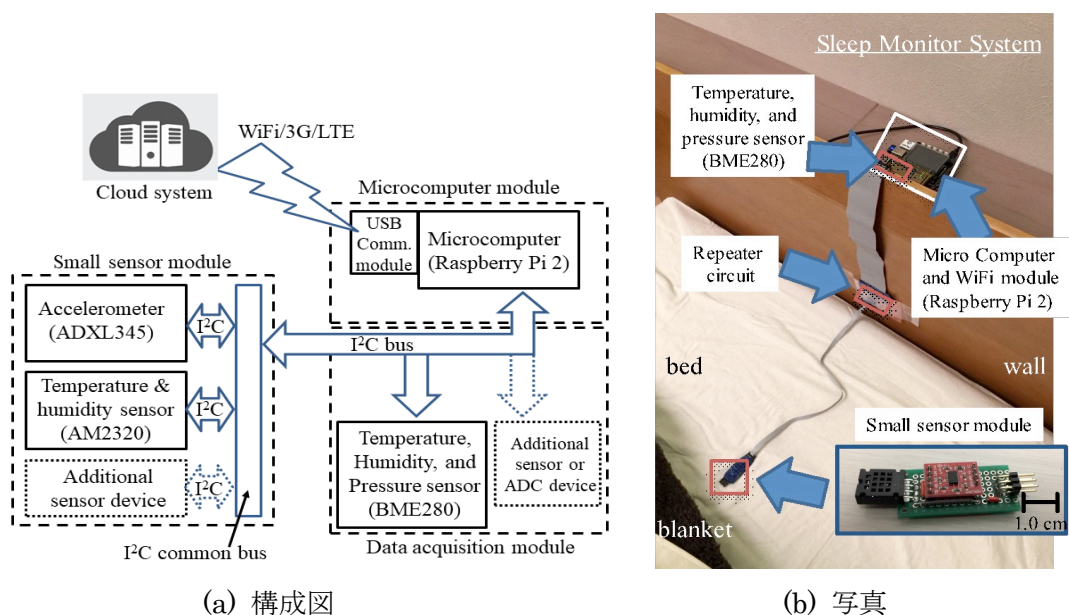


図1 複数センサ計測システム

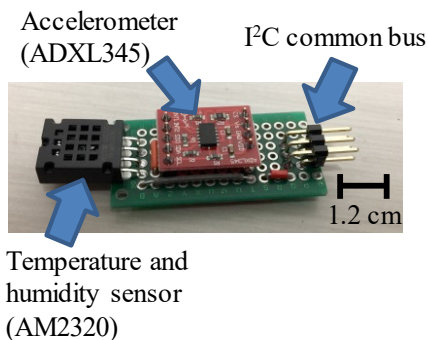


図2 センサモジュール

加速度センサ(ADXL345)と温度・湿度センサ (AM2320) は同一基板で作製し、延長ケーブルでマイコン本体に接続する形をとる。また長距離で引き延ばすことを想定しているため、途中リピーター等を挿入できるようにしている。マイコンについては、センサ取得プログラムのプロセス管理とプログラムのしやすさ (AI 等で使われ始めた python 等)、そして USB 給電における電力の関係で、Raspberry Pi2 (CPU: 900MHz quad-core ARM Cortex-A7 CPU, Memory: 1GB) を選択した。この Raspberry Pi の中で、データ取得プログラムを複数同時並行で実行し、その後データ前処理 (データ圧縮、間引き処理等) をして、米沢キャンパスにあるデータサーバーへ転送する。

転送に関しては、インターネットに常時接続している場合は時間帯に制限はないが、3G/LTE でデータを転送する場合は、料金が一番安い午前 1 時~5 時の間をねらって転送する。またデータに関しては、通信路の問題で転送できない場合があるため、1 か月ほど Raspberry Pi 本体にバックアップとして保持する。

さらに、図 1 (a)(b) を元に、マイコンを Raspberry Pi2 から ESP32 へ変更し、全てのセンサを枕に内蔵した枕型睡眠計測システムを構築した。その実装図を図 3 (a)(b) に示す。

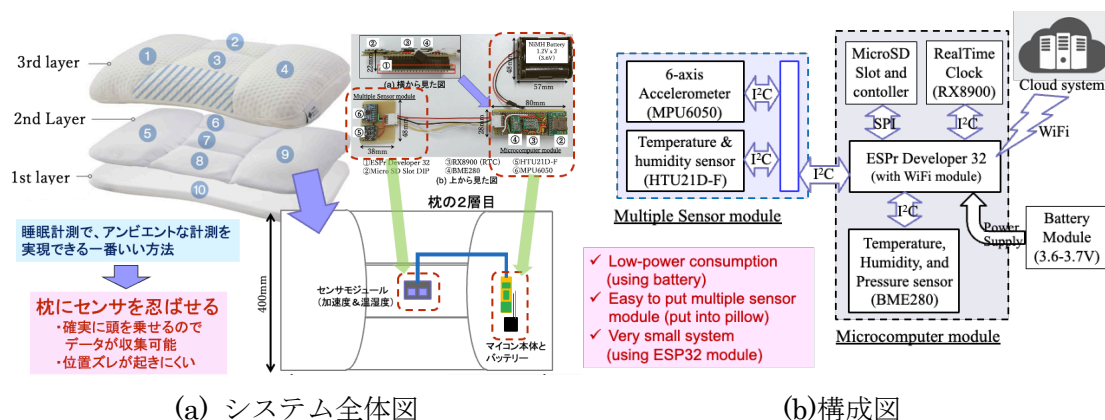


図 3 枕型睡眠計測システム

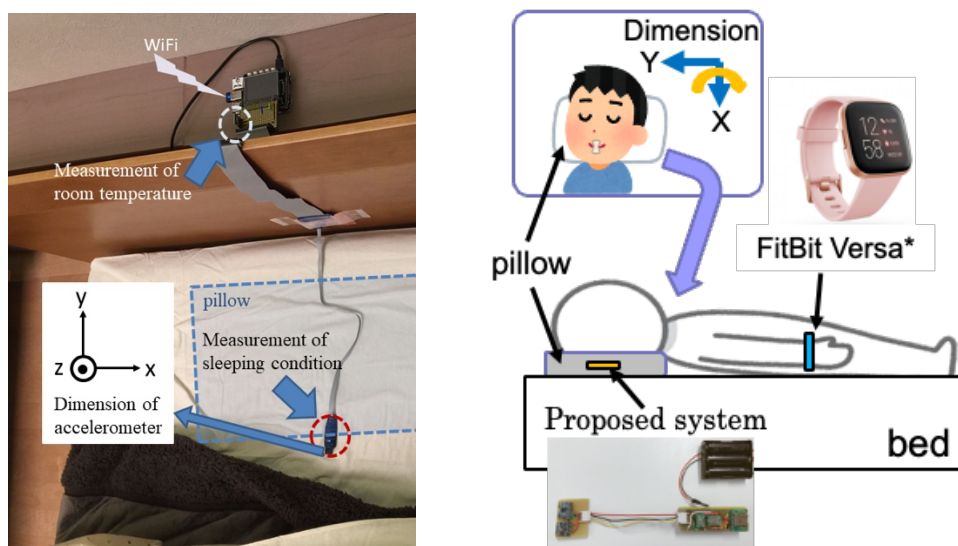
2.2 睡眠計測として用いるためのシステム構成

図 4 (a) に最初に開発した睡眠計測システムでの計測条件を、図 4 (b) に枕型睡眠計測システムの計測条件を、それぞれ示す。図 2 の小型センサモジュールに対して、温湿度センサの検出用開口部だけ外に出したのち、それ以外の部分を人間の汗や機械的衝撃から回路を保護するためにビニールシートとケースに入れ、ビニールテープで保護する。また、ケーブル長が 2 m 近くになるため、途中にリピーター回路を入れ波形をシャンとさせる。その後、Raspberry Pi 本体の GPIO バスに接続する。マイコン内では、小型センサモジュール上にある温湿度センサ、加速度センサ、そして本体に接続している、温度・湿度・圧力センサ、の 3 つのセンサを個別で制御できるように、プログラムを 3 つに分けて実行する。その際に、加速度センサはモーション計測なので 10fps、温度・湿度計測については、10 秒ごとに取得する。実際に加速度センサから出力されるデータとしては普通の加速度というよりは静止

加速度であり、鉛直方向では常に 1G かかる。

計測条件としては、仰向けに寝た際にちょうど人の首から肩のあたりに、小型センサモジュールがあるように、枕の境界線あたりに設置する。枕に対して鉛直方向を z 軸、人が寝る方向に対して平行な軸を y 軸、垂直な軸を x 軸とする。人がちょうど寝返りを打つことで頭が移動し、それに応じて x 軸・y 軸が変動する。また首から肩あたりの部分に温度・湿度計を設置しているので、よほど寝相がひどくない限り、人が確実に布団で寝ているのが確かめられる。また比較的布団の中に近い位置での計測が可能のため、布団内の温度・湿度をこの小型センサでとることとする。

枕型睡眠計測システムにおいても同様であるが、加速度センサの軸の方向が図 4(b)のように異なることに注意する。また比較のために Fitbit Versa を腕に装着して比較検討を行った。市販の活動量計 fitbit は、心拍数と加速度から睡眠のステージを覚醒、レム、ライト、深い睡眠の 4 段階で判定している。判定方法は、加速度があり心拍が不規則であれば覚醒、加速度がなく心拍が規則的であれば深い睡眠と判定している。そのため、本実験の評価方法は、fitbit が覚醒と判定中に枕内の加速度と各速度の値に変があり、深い睡眠と判定中に加速度・角速度の値が変化しなければ fitbit と同等の測定性能があると評価できる。



(a) 最初の睡眠計測システムでの計測条件 (b) 枕型睡眠計測システムでの計測条件

図 4 計測条件

3 睡眠計測結果

3.1 計測結果

図 1 のシステムを用い、実際に計測した結果について、図 5 と図 6 にそれぞれ示す。図 5 と図 6 の違いは計測日の違いによるものである。図 5・図 6 より、布団に入る前は、設置した小型センサモジュールの位置で静止加速度と温湿度を計測している状況であるが、人が布団に入ると、まず寝心地のいいポジションをとるために多少動くため、加速度センサか

らある程度の変動を計測することができた。また布団に入ると同時に人間の体温が大体 36 度台なので、それに応じて小型センサモジュールに設置している温湿度センサからも温度や湿度の上昇を検出できることがわかる。ちなみに、この温度・湿度を計測することで、人間がちゃんと生きて寝ているか、単にロボットなどの無機物がゴロゴロ転がっているか等、判断することができる。

しばらく時間が経過すると、睡眠の寝返りが始まり、x 軸 y 軸ともに振れ幅が変わってくる。この計測においては、Fitbit などの活動量計と比較し、ほぼ一致していることを確認しているため、この結果は寝返りの結果であると考えられる。

布団から置きだすと今度は熱源となる人間が布団から出るため、温度・湿度ともに急下降を始め、室温に近い温度まで下がる。それと同時に、加速度センサが起床時の変動を観測する。また、図 6 においては、起床時の加速度センサの z 軸と x 軸が正負逆転しているのがわかるが、これは、おそらく起床後のベットメイキングで小型センサ自体をひっくり返してしまった可能性がある。

布団内の温度・湿度が一定しないのはおそらく寝返り時の人間の寝相に起因する。これについては、適切なセンサの位置を今後考える必要がある。

次に、図 7 に枕型睡眠計測システムと Fitbit との結果について示す。上段の青線のデータは Y 軸加速度、中段の赤線は X 軸周りの角速度、下段は fitbit の睡眠ステージを示している。それぞれの図中の黄色で囲まれた箇所は、fitbit が覚醒と判定していることを表している。また、水色で囲まれた箇所は、fitbit が深い睡眠と判定していることを表している。

提案システムの評価として、fitbit との覚醒と深い睡眠のステージ判定と本研究のシステムの枕内センサーの Y 軸加速度と X 軸周りの角速度の関係の一致率で評価する方法をとる。図 7 の黄色で囲まれた箇所が覚醒のタイミングで、青色で囲まれた箇所は深い睡眠のタイミングを示す。この覚醒を表す黄色のタイミングと図 7 の中段の X 軸周りの角速度の変化のタイミングの一致する確率と、深い睡眠を表す青色のタイミングで X 軸周りの角速度に変化がないタイミングの一致確率を求め表 3-1 に示す。また、一致確率の算出方法は、覚醒時は

$$\text{覚醒時一致率 [\%]} = \frac{\text{X 軸角速度と覚醒タイミング一致回数}}{\text{全覚醒回数}} \quad (1)$$

で求め、深い睡眠時は、

$$\text{深い睡眠時一致率 [\%]} = \frac{\text{X 軸角速度と深い睡眠タイミング一致回数}}{\text{全深い睡眠回数}} \quad (2)$$

で算出した。

表 1-1 より、最も覚醒時一致率が高いのは 1 日目で 100%、最も一致率が低いのは 4 日目で 73.7%であった。6 日間の平均は 88.5%であった。また、深い睡眠時一致率は 6 日間全てで 100%の一致率が確認された。また、覚醒回数が 24 回で最も多かった 3 日目と 10 回と最も少なかった 5 日目において、覚醒時一致率は 91.7%と 92.3%と近い値であり、覚

醒回数が異なっても問題なく睡眠データ測定が可能であることが分かる。

以上の結果から、枕の中にセンサーを内蔵した場合でも市販品と約 90%の整合性がある測定ができることが確認されたため、今後の解析に用いても問題ないといえる。

表 1-1 体動と睡眠ステージ一致率

	覚醒のタイミングと X 軸角速度変化 タイミング一致率[%]	深い睡眠タイミングと X 軸角速度変 化なしタイミング一致率[%]
1 日目	100	100
2 日目	83.3	100
3 日目	91.7	100
4 日目	73.7	100
5 日目	90.0	100
6 日目	92.3	100
平均	88.5	100

3.2 課題点

本システムで一通りの計測が可能であることが図 5～図 7 より結論できるが、本システムを 1 年以上の長期稼働させた結果、数日単位の稼働と比較して、以下のような課題が明らかとなった。

1) クラウド (サーバ) とセンサ制御マイコンとのセンサデータ処理比率選択の難しさ (消費電力と信頼性・通信の確実性とのバランス)

本研究のシステムでは、電源自体が AC から直接給電するため、データの圧縮と転送のみを前処理として実施しているだけでなく、データのフィルタリングやデータ生成もマイコン内で実施することは可能である。しかし、処理を多くすればするほど消費電力が増えるため、バッテリー駆動型のシステムとして構築する場合、どの程度の配分で情報処理をさせるかが課題となる。

2) 通信回線の選択 (3G/LTE, WiFi, LoraWAN 等)

データ計測後のデータ転送においては、様々な通信インフラがあるため、データ量・通信速度・インフラの整備状況に応じて選択する必要がある。

3) 時間同期の重要性 (RTC の搭載は必須)

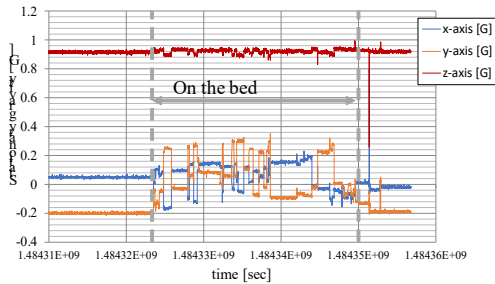
今回のデータ取得システムで一番苦労した点としては、それぞれのデータの時間同期である。それぞれ違う時を刻んでしまうと、データ加工後に機械学習等で学習させて知見を得ようとする、時刻がずれてしまうことで学習が収束せず、解が出ない場合がある。またある時間におけるデータセットを準備しようとする、データ欠損が生じるため、できるだけ時間同期をマイコン側で実施し、適切にデータを出力するようにしなければならない。

4) データ欠損時の補償とセキュリティ

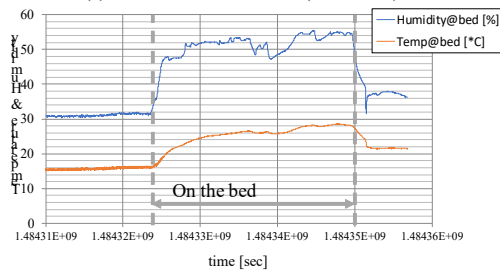
データ取得時にシステムの不具合等でデータが欠損することがある。その場合に、前後のデータから推測するか、あるいは傾向からデータを算出する必要がある。温度や湿度に関しては、計測間隔が長いということと、熱容量や温度の伝わり方を考慮すると、加速度センサのような人間の動きのように頻繁には変動しないため、線形補間が有効である。しかし、加速度センサなど人やモノの動きに起因するデータの取得には、線形補間が効かないので、前後のデータの状況等で判断するしかない。

5) リモート管理とセンサのメンテナンス

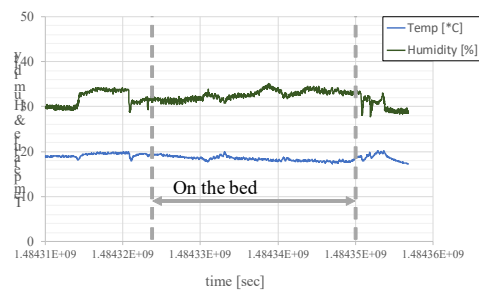
センサのメンテナンスについては、本システムでは考慮に入れていないが、通常のデータと比較してずれを検出などをしてセンサ自体の故障予知をする必要がある。また、データ取得プログラムについては、突然のプロセス停止に備えて、20分に1回プロセス監視することで、データ欠損を最小限に食い止めている。



(a) Data from accelerometer (ADXL345)

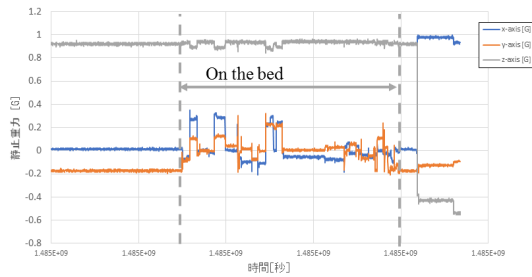


(b) Data from temperature and humidity sensor (AM2320)

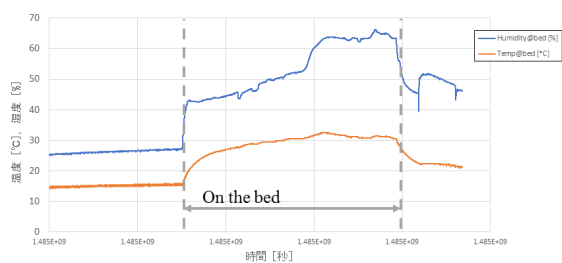


(c) Data from temperature and humidity sensor (BME280)

図5 計測結果その1



(a) Data from accelerometer (ADXL345)



(b) Data from temperature and humidity sensor (AM2320)

図6 計測結果その2

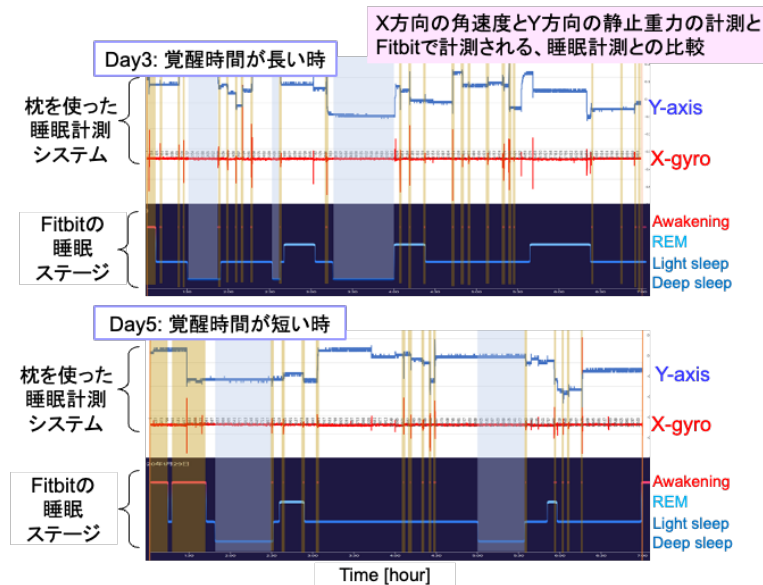


図7 枕型睡眠計測システムと Fitbit との比較

4 おわりに

本報告では、日々身も心も健康に過ごせる方法を検討するための第1歩として、比較的研究者でもデータ収集が可能で、山形大学内で唯一1年以上という長期にわたって行われている、複数センサによる睡眠環境データ計測システムについて、そのシステムの構成と運用について述べ、実際に取得したデータについて紹介した。その結果、市販されている活動量計とほぼ同じデータを得ることができ、かつデータとしては、研究者が使える csv データとして収集できるため、研究用の睡眠計測として用いることが可能である。

ただ、今回のシステムでは、あくまでも人の寝返りや布団内の温度・湿度から計測するものであり、これを使って直接医療行為をするものではない。また、詳細な検証を行うには、脳波計[4]や脈拍[5]等から得られるデータを取得する必要がある。

さらに、本システムの最初の試作では Raspberry Pi を使っているが、データ取得と情報処理によっては、ESP32 等のマイコンシステムのほうがいい場合があり、これについては枕型睡眠計測システムを実際に構築し、Fitbit の結果と比較してほぼ同じ動作で計測できている。これにより、ESP32 などの小型マイコンによる睡眠計測システムの可能性を実証できた。今後は、枕に圧力センサ等を搭載してさらに改良を行ない、心拍・呼吸を含めたよりコンパクトかつ正確な睡眠計測システムを目指す予定である。

謝辞

本研究は統計数理研究所共同研究プログラム「世界メッシュコード研究会」(2023-ISMCRP-5007)の助成を受けたものです。また、本研究の一部は、令和5年度 YU-COE(S)(S-3 有機エレクトロニクス研究拠点)研究助成の支援によって行われたものです。

参考文献

- [1]眠りスキャン, <http://www.paramount.co.jp/learn/reductionworkburden/nemuriscan>
- [2]Nokia Sleep, <https://health.nokia.com/jp/ja/sleep>
- [3]非接触バイタル生体センサ, <https://www.mio-corp.co.jp/sensor/>
- [4]<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20160107-2/> 等
- [5]脈拍計 <https://store.healthcare.omron.co.jp/category/8> 等