

NAIST-IS-MT1451081

修士論文

睡眠時の気道閉塞症状を軽減する
頸部位置推定と頸部昇降機能付き枕デバイス

西村 祥吾

2016年3月14日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士（工学）授与の要件として提出した修士論文である。

西村 祥吾

審査委員：

萩田 紀博 教授 （主指導教員）

安本 慶一 教授 （副指導教官）

神原 誠之 准教授 （副指導教官）

睡眠時の気道閉塞症状を軽減する 頸部位置推定と頸部昇降機能付き枕デバイス*

西村 祥吾

内容梗概

近年，睡眠時無呼吸症候群 (SAS) を治療・改善するための装置として，様々な機器が開発されている．例としてユーザにマスクを取り付け気道に空気を送り込む CPAP 治療法や，睡眠時の無呼状態を検知してユーザに刺激を与えることで寝返りを促進するロボットを用いた手法がある．しかし，これらに共通する問題は拘束感や刺激等のストレスにより睡眠の質への影響が考慮されていない点である．この問題を解決するために，本研究では非拘束かつ非侵襲に睡眠時の気道閉塞を軽減することを目的とする．本提案手法では圧力センサを通して睡眠時の気道閉塞状態の検知および頸部位置の推定を行い，枕内部のエアポンプを昇降させることによって，睡眠時の気道閉塞症状を軽減する．本研究で提案する枕デバイスの要素技術となる睡眠時の寝姿勢推定を行うための精度検証実験を行い，Random Forest を用いた識別で 96.47% の正答率が得られた．

キーワード

睡眠，SAS，気道閉塞，非拘束センシング，エアポンプ

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT1451081, 2016 年 3 月 14 日.

Intelligent Pillow Device with Neck Positioning and Lifting Functions for Reducing Risk of Sleep Apnea*

Shogo Nishimura

Abstract

Sleep apnea syndrome (SAS) has been paid attention. As an apparatus for treating and avoiding the SAS, various devices have been developed. For example, CPAP can avoid apnea to feed air into user's airway with the mask. There is a method using a robot to facilitate turn over by detecting apnea and giving a stimulus to the user during sleep. However, these devices have the common problem. They do not consider the quality of sleep by stress due to restraint sensing and irritation. This paper proposes a method for reducing the airway collapse during sleep in a non-restraint and non-invasive using a pillow device.. The proposed system detects bed position by using pressure sensors. In sleeping posture estimation, accuracy verification experiment 96.47% of correct answers was obtained in identification using the Random Forest.

Keywords:

sleep, SAS, airway collapse, non-restraint sensing,air-pomp

*Master's Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1451081, April 14, 2016.

目次

図目次		v
第 1 章	はじめに	1
第 2 章	睡眠時の気道閉塞を軽減するための従来手法と本研究の位置付け	3
2.1	気道閉塞状態の軽減に関する従来研究の紹介	3
2.1.1	気道に空気を送り込むデバイス	3
2.1.2	寝姿勢の変化を促すデバイス	4
2.1.3	寝姿勢を調整し気道を確保するデバイス	5
2.1.4	気道閉塞状態の軽減に関する従来研究のまとめ	6
2.2	睡眠時の無拘束センシングに関する従来手法	7
2.2.1	圧力センサを用いた手法	7
2.2.2	視覚センサを用いた手法	8
2.2.3	マイクロ波を用いた手法	8
2.2.4	音センサを用いた手法	8
2.2.5	加速度センサを用いた手法	9
2.2.6	無拘束センシングに関する従来手法のまとめ	9
2.3	本研究の位置付けと課題解決へのアプローチ	10
第 3 章	提案する睡眠姿勢の制御手法	12
3.1	本研究で提案するシステムの概要	12
3.2	使用する機器と全体の配置	13
3.3	デバイスの制御フロー	14
3.4	睡眠時の姿勢推定と頸部位置推定	16
3.5	睡眠時の頸部昇降	18
第 4 章	寝姿勢推定精度の検証	20
4.1	圧力センサシートを用いた寝姿勢計測	20
4.2	実験プロトコル	20
4.3	実験結果	22

4.4	考察	23
第 5 章	気道確保による呼吸状態改善の効果検証	25
5.1	血中酸素濃度計	25
5.2	実験プロトコル	25
5.3	実験結果	27
5.4	考察	32
第 6 章	まとめ	33
	謝辞	34
	参考文献	35

目次

2.1	CPAP 装着の有無による酸素経路の差異	4
2.2	じゅくすい君使用時の様子	5
2.3	ヘッドキャップ型治療装置の概観	5
3.1	本研究にて提案する枕型デバイスの概観	12
3.2	左図：圧力センサ FSR406 と配置図 右図：エアポンプとエアバッグ	14
3.3	圧力センサ値の可視化	14
3.4	センサ・アクチュエータの情報連絡図	15
3.5	提案システムの制御フロー	15
3.6	睡眠姿勢推定から頸部昇降までの制御フロー	17
3.7	仰臥位時の圧力分布図	18
3.8	圧力センサの位置関係による頭部・頸元の決定	18
3.9	頸部昇降前後のユーザとエアバッグの動作	19
4.1	各姿勢における圧力可視化例	21
4.2	圧力センサシートによる寝姿勢の計測	22
5.1	血中酸素濃度計	26
5.2	上：健常な SpO ₂ 値 下：異常な SpO ₂ 値	27
5.3	左：通常の枕 右：気道確保	27
5.4	被験者 A の結果 上：通常の枕 下：気道確保	28
5.5	被験者 B の結果 上：通常の枕 下：気道確保	29
5.6	被験者 C の結果 上：通常の枕 下：気道確保	30
5.7	被験者 D の結果 上：通常の枕 下：気道確保	31

第 1 章 はじめに

近年，睡眠時無呼吸症候群（sleep apnea syndrome, 以下 SAS と称す）と呼ばれる睡眠呼吸障害が日中の眠気を誘発し，重大なヒューマンエラーに結びつくといった理由から安全管理の面で社会的に関心を持たれるようになった．一方で SAS が様々な呼吸器疾患や生活習慣病，脳血管障害といった循環器疾患などを高率に合併し，死亡に至る症例も報告されるなど健康面で深刻な被害を及ぼすことが明らかとなった [1]. そのような中で我が国の SAS 患者は 250 万人以上存在すると推定されており，潜在患者数を含めると 4 人に 1 人が SAS あるいはその予備軍であると言われている．SAS は自覚症状の有無を問わずに無呼吸低呼吸指数（apnea hypopnea index, 以下 AHI と称す）と呼ばれる単位時間あたりの無呼吸・低呼吸状態の総数を用いて，AHI が 5 以上である者と定義される．SAS は閉塞性睡眠時無呼吸（obstructive sleep apnea, 以下 OSA）と中枢性睡眠時無呼吸（central sleep apnea, 以下 CSA）とこれらを併発する混合型に分類される [2]．OSA は睡眠中の気道閉塞による換気の障害によって起こるものであり，著明ないびきを伴う．SAS 全体の 90 % が OSA であると言われている．一方 CSA は呼吸中枢の機能異常により睡眠中に呼吸筋への刺激が消失して無呼吸となる．

このような疾病を医学的アプローチに基づいて改善する一般的なデバイスとして CPAP がある．CPAP は AHI が 20 以上の患者に対して使用される医療機器で，鼻マスクを介して陽圧を加えた空気を送り続けることにより，上気道を広げ閉塞を防ぐ [3][4]．治療を目的としたデバイスであるため効果は高いが，一方で口腔内の乾燥，鼻炎，結膜炎の発生やマスクを装着することによる拘束感が強く，寝返りが出来ない，音漏れによって寝付けないといった問題がある．この問題により，致命的な呼吸障害を解決出来る一方で睡眠全体の質を向上させるデバイスであるとは言えない．

一方 OSA に限定すると工学的なアプローチによりこれらを改善するデバイスも存在する．可部ら [5] は睡眠中の無呼吸，低呼吸状態をセンシングし枕デバイスによってユーザを刺激して覚醒させ，寝返りを促すことで OSA の改善に取り組む．石坂ら [6] の研究ではエアバッグを内蔵したヘッドキャップを用いて気道開通に適した位置へユーザの後頭部と顎先を誘導するデバイスを開発した．しかしこれらの

デバイスに共通する問題は、ユーザの身体を一部拘束する点である。可部らの手法では無呼吸状態のセンシングの際に指先など身体の一部を拘束する血中酸素濃度計を使用している。石坂らの手法ではヘッドキャップを装着することによる拘束感をユーザに与える。拘束によってユーザはストレスを感じ、それが原因で寝付けない、中途覚醒が発生するなどの問題を引き起こす。また、ユーザを覚醒させることで OSA の改善を行うためユーザにストレスを与えてしまい、呼吸状態は改善可能でも睡眠の質の向上は見込めない。このように、睡眠の質の確保を考慮せずに気道閉塞を改善する取り組みが従来より行われてきた。

そこで本研究ではユーザの睡眠の質を考慮しストレスのない快適な睡眠を確保した上で、気道閉塞状態を軽減することを目的とした枕デバイスの開発とその効果検証を行う。提案手法では、圧力センサによってユーザの寝姿勢を無拘束に検知する。これにより、ユーザが仰向けでいびきをかきやすい状態であることを検知すると、頸部位置を推定し内蔵されたエアバッグを昇降させる。これによりユーザを気道確保時の姿勢へと誘導し、気道閉塞を軽減する。

本論文の構成は以下の通りである。2 章では OSA の改善を目的としたデバイスに関わる従来研究と本研究の位置付けについて述べ、3 章では、提案するデバイスの概要に関して詳述する。4 章では、本研究にて提案する圧力センサを用いた無拘束センシングによる寝姿勢推定アルゴリズムを実装し実用化の妥当性を検証した実験結果について述べる。5 章では気道確保の有無によって睡眠時の気道閉塞状態の軽減が可能かどうかを検証した実験結果について述べる。6 章では、本研究のまとめと今後の展望について述べる。

第 2 章 睡眠時の気道閉塞を軽減するための従来手法と本研究の位置付け

本研究ではストレスのない快適な睡眠を確保した上で、気道閉塞状態を軽減することを目的とする。本章では既存の気道閉塞症状を外部から改善するデバイスに関する従来研究について 2.1 で紹介する。次に睡眠時の無拘束センシングによる寝姿勢推定・身体位置の推定に関する従来手法について、2.2 で紹介する。最後に、従来研究および本研究の位置付けと課題解決へのアプローチについて 2.3 にて述べる。

2.1 気道閉塞状態の軽減に関する従来研究の紹介

本節では既存の気道閉塞症状を外部から改善するデバイスに関する従来研究について紹介する。まず、数多く存在するデバイスが気道閉塞の改善のために用いるアプローチ別に、以下の 3 つに分類する。

1. 気道に空気を送り込むもの
2. 寝姿勢の変化を促すもの
3. 寝姿勢を調整し気道を確保するもの

上記の分類に従ってそれぞれの代表的なデバイスについて紹介する。

2.1.1 気道に空気を送り込むデバイス

ここで紹介するデバイスは鼻に装着したマスクから空気を送り込むことで、ある一定の圧力を気道にかけることにより気道閉塞を改善する CPAP(continuous positive airway pressure) である [3]。CPAP は 1981 年、C.E.Sullivan(シドニー大学)らによって睡眠時無呼吸症候群の治療に導入された医療機器である。AHI が 20 以上の患者に対して使用され、使用した時点で高い気道閉塞の軽減効果をもたらす。以上から CPAP は中・重度の OSA 患者に対して主に使用され、高確率で患者の症状改善に貢献することができる。しかしながら、CPAP の問題点として使用の際口腔内の乾燥、鼻炎、結膜炎の発生やマスクを装着することによる拘束感が強

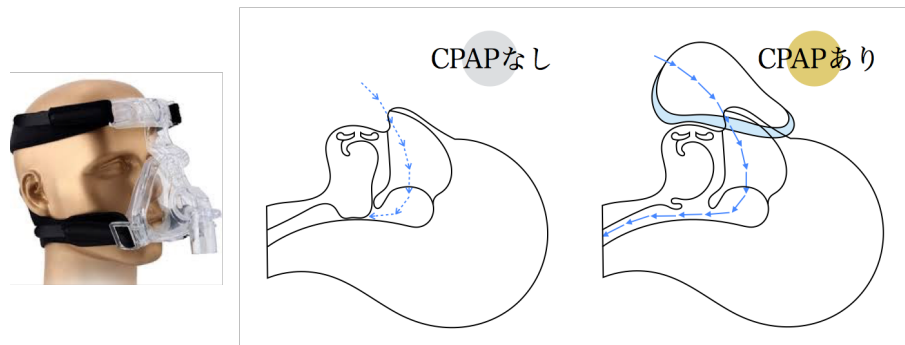


図 2.1 CPAP 装着の有無による酸素経路の差異

く、寝返りが出来ない、音漏れによって寝付けないといった問題がある。

2.1.2 寝姿勢の変化を促すデバイス

可部ら [5] は OSA 患者を対象とした CPAP に代わる睡眠時無呼吸の治療機器として、図 2 に示す"じゅくすい君"と呼ばれる枕型のデバイスを開発した。これにより無呼吸症候群の OSA 患者あるいはその予備軍に対して日常生活に実用的な機器によって、症状の早期発見とサポートを目指す。じゅくすい君は血中酸素濃度センサと、小型マイクによるいびき音のセンシングを行い、ユーザの無呼吸・低呼吸状態を検出し、ロボットアームでユーザの顔を刺激することで睡眠姿勢の変更を促すことで睡眠時の呼吸状態を改善する [7]。アーム動作はユーザの重症度別によって最適化されており、軽症であれば寝返りを促す程度の強さで、重症であれば顔を刺激しユーザを覚醒させる強さで動作を行う。しかし、可部らの手法では侵襲的なアクションによりユーザを覚醒させることで OSA の改善を行うためにユーザにストレスを与えてしまい、快適な睡眠の実現は見込めない。無呼吸状態のセンシング時に指先一部を拘束する血中酸素濃度センサを使用する点も快適な睡眠を阻害する要因となる。



図 2.2 じゅくすい君使用時の様子

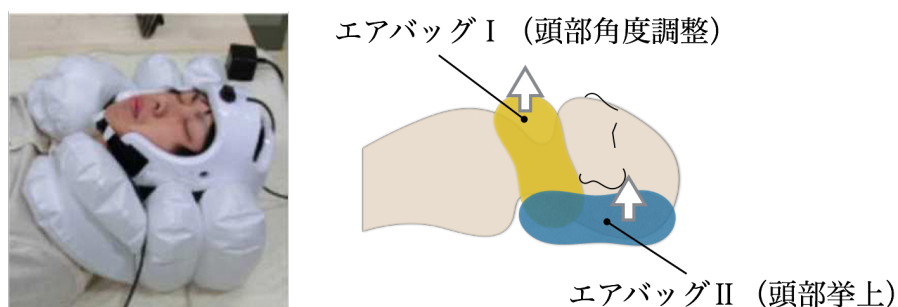


図 2.3 ヘッドキャップ型治療装置の概観

2.1.3 寝姿勢を調整し気道を確保するデバイス

石坂ら [6] は OSA 患者や睡眠中のいびきの発生を回避することを目的とし、睡眠中のユーザを気道開通姿勢へと移行させるヘッドキャップ型治療装置を開発した。装置の外観を図 2.3 仰臥位時に舌根沈下によって上気道が閉塞し、いびきや無呼吸状態の原因となるが、本デバイスを用いることによって気道閉塞状態を改善する。ユーザの低呼吸あるいはいびきが一定時間検出されると 2 種類のアエアバッグを自動で動作する。一方はユーザの顎先を、もう一方は頭部を緩やかに持ち上げ流ことで気道開通に適した姿勢へと導く。以上から、就寝中に自動で気道確保を行う本デバイスは、いびきの予防や SAS の治療に対しても効果を発揮すると期待される。一方で石坂らの手法においても、ヘッドキャップを装着した状態で睡眠を行うことに

より拘束感や違和感が生じ、ストレスフリーに睡眠することが困難となる。

2.1.4 気道閉塞状態の軽減に関する従来研究のまとめ

以上の従来手法について、各手法におけるメリットとデメリットを表 2.3 にまとめる。これらの手法による気道閉塞状態の解決方法はユーザに対し拘束感や動作音、侵襲的な刺激等を与えることにより、睡眠時の快適性を阻害することが問題である。従って、本研究ではユーザの快適性を考慮した気道閉塞の軽減方法を提案することによってこの問題を解決する。

ここで寝姿勢を調整し気道を確保する石坂らの手法に注目すると、睡眠時の気道確保が気道閉塞に対し有効であると言える。石坂らの手法ではヘッドキャップという一般的に睡眠時には使用しない装具を身につけるという点でユーザに不快感を与えてしまう。これを改善するためにはユーザの身体に直接身に付けることなく、ユーザに作用するものである必要がある。さらに、一般的に睡眠時に使用されるものの内部に機械的な要素を組み込むことによって提案システムを実現することを考えた。以上より本研究では、日常的に使用される枕内部に気道確保が可能なアク

表 2.1 気道閉塞を軽減するための従来手法の比較

	気道閉塞 症状の軽減	侵襲性の 刺激	ユーザへの 拘束感	睡眠の質の 考慮
気道に空気を 送り込む手法 (CPAP 療法)	◎	×	×	△
寝姿勢の変化を 促す手法(可部ら)	○	×	×	×
寝姿勢を調整し 気道を確保する 手法(石坂ら)	○	○	×	△

チュエータの埋め込むものとする。このとき発生する課題は、アクチュエータを動作するための動作指令値をどのように与えるかである。そこで本研究では動作指令値を決定する際に睡眠中のユーザの状態をセンシングするためのセンサを用いることで、解決することを目指す。センシングの際にユーザに不快感を与えることのないよう、無拘束なセンサを選定する。次節にて、無拘束な睡眠状態のセンシングについて従来研究を紹介する。

2.2 睡眠時の無拘束センシングに関する従来手法

本節では睡眠中のユーザに対してストレスを与えない無拘束状態での睡眠状態の推定に関する従来手法について述べる。無拘束での睡眠状態センシングの手法は以下の5つに分類される。

1. 圧力センサを用いた手法
2. 視覚センサを用いた手法
3. マイクロ波を用いた手法
4. 加速度センサを用いた手法
5. 音センサを用いた手法

これらの手法は全て、計測機器をユーザに直接取り付けないことによって無拘束性を確保でき、人への生理的、心理的負担が軽減できる。以下の各小節でそれぞれの手法について述べ、最後にそれらの手法が可能な推定対象について 3.1.6 にてまとめ、本研究にて用いるセンサを選定する。

2.2.1 圧力センサを用いた手法

圧力センサを用いた睡眠センシングは多くの用途で使用される。主に対象者の睡眠時の体圧分布を求めることにより体位・関節位置推定を行うほか、圧力値のフィルタリングにより体動の検知から睡眠深度の推定、呼吸・いびき状態の推定、心拍推定などにも使用される [8][9][10][11][12]。センサの配置も様々であり、シート状の圧力センサを複数組み合わせ、マットレス下に配置するものやベッドの脚下に

配置するものなどがある。

2.2.2 視覚センサを用いた手法

現在、様々な視覚センサを用いた睡眠時の計測が行われている [13][14][15]。視覚センサを使った主な用途は、ユーザの胸部・腹壁の上下動を捉えることによる呼吸状態の推定や、人体構造モデルの当てはめによる体位・関節位置の推定である。視覚センサはユーザの体全体を俯瞰できるようにカメラや投影機器を主に部屋の天井に取り付ける必要がある。近赤外線画像解析を用いることで心拍を推定することが可能である [16]。

2.2.3 マイクロ波を用いた手法

マイクロ波のドップラーモジュールを用いることで、睡眠時の呼吸をモニタリングする手法がある [17][18]。これはセンサから胸腹部にマイクロ波を照射し、跳ね返ってきたマイクロ波の周波数のずれを計測することで呼吸をモニタリングする。これにより布団や衣類を通した微小な動きを検出することができる。呼吸の動きの安定性は睡眠深度との関係性があり [19]、信号処理により体動成分の周波数帯域を抽出することで睡眠深度を推定するといった取り組みもなされている [20]。さらに、センサで検出された信号の解析によっては体動や体位の判定も可能となる [21]。マイクロ波を用いた生体情報の計測を行うためには、発信機と受信機をベッドサイド等ユーザから一定の間隔で離れた位置に複数配置する必要がある。

2.2.4 音センサを用いた手法

音センサとしてコンデンサマイクを用いる手法は、睡眠中に起こる異常呼吸音であるいびき音の計測が主な用途として挙げられる [25][26]。いびきの周波数分析を行った場合、通常はいびきと OSA に随伴するいびきが識別できる。従来研究ではいびきの基本周波数が求められており、150Hz 以下のものは主として軟口蓋の振動に起因するもの、500Hz 前後のものは舌根沈下および扁桃肥大によって発生する上

気道狭窄によるものとされている [27] . 雑音成分に注目すると , 単純いびき症では低周波数帯と高周波数帯での , OSA では倍音に対する雑音の割合が高い傾向がある [28] . 音センサはこのようないびき音から無呼吸状態の推定に使用されるほか , 心音センサをウォーターマットやエアーマットに装着することにより , 心拍や呼吸を計測する手法も提案されている [29] .

2.2.5 加速度センサを用いた手法

加速度センサを用いた睡眠センシングの手法は , 主にユーザの体動の検知から睡眠深度の推定に使用される [22][23] . 体動のセンシングの際 , 加速度センサは枕元やベッドの上などに設置する必要がある . センサの設置位置によっては , 安静状態での仰臥位にて心電計の波形に近い計測結果が得られる . 岡田ら [24] は , 掛け布団に加速度センサを取り付けることにより , 心電図の R 波と一致した位置に加速度変化のピーク信号を得る手法を提案している .

2.2.6 無拘束センシングに関する従来手法のまとめ

以上で紹介した無拘束での睡眠状態センシングの手法 5 つについて , それぞれを用いることにより可能となる推定対象について表 2.2 にて比較する .

表 2.2 無拘束センシングにおける推定対象の比較

	呼吸数	心拍数	いびき	体動	体位	関節位置
圧力センサ	○	○	○	○	○	○
視覚センサ	○	○	○	○	○	○
マイクロ波	○	○	○	○	○	×
音センサ	○	○	○	×	×	×
加速度センサ	○	○	×	○	×	×

表 2.2 から本研究では , ユーザのあらゆる状態を推定することにおいて汎用性の高い圧力センサを用いて無拘束なセンシングを実現する . 同じく睡眠状態の推定

に対して汎用性の高かった視覚センサや赤外線センサの使用は検討しないものとする。これは枕型デバイスとしてユーザに密着することができるという強みを生かすため、携帯性、ユーザビリティ向上のためである。さらに監視されることによるユーザへの不快感を与えることと、使用する枕内部に埋め込むことが困難であるため本研究では使用しないこととした。以上から、本研究では圧力センサを用いた無拘束なセンシングによるユーザの睡眠状態の推定を行う。

2.3 本研究の位置付けと課題解決へのアプローチ

2.1 で紹介した手法による解決方法はユーザに対し拘束感や動作音、侵襲的な刺激等を与えることにより、睡眠時の快適性を阻害することが問題として挙げられる。このことから本研究ではユーザの快適性を考慮した無拘束・無侵襲なセンシング及びアクチュエーションによって、睡眠時の気道閉塞を軽減することを目的とする。これによりユーザは快適に睡眠でき、かつ仰臥時の気道閉塞症状が軽減されるため、睡眠による心身の回復や免疫力向上といった健康面の改善が従来手法以上に見込まれる [8]。結果、睡眠を通してユーザの QOL 向上に貢献することができる。なお、本研究で対象とするユーザは睡眠時の気道閉塞によって発生する OSA やいびきに悩みを抱える人々とする。

表 2.3 に気道閉塞を軽減するための従来手法と本研究のメリット・デメリットを比較した。本研究ではユーザの睡眠時の生体情報を無拘束なセンサによって取得することにより、拘束感のないストレスフリーな生体センシングを行う。それにより得られた情報を基に無侵襲なアクチュエーションとしてエアポンプにより枕内部

表 2.3 気道閉塞を軽減するための従来手法と本研究で提案する手法との比較

	気道閉塞 症状の軽減	侵襲性の 刺激	ユーザへの 拘束感	睡眠の質の 考慮
CPAP 療法	◎	×	×	△
可部らの手法	○	×	×	×
石坂らの手法	○	○	×	△
本研究の手法	○	○	○	○

のエアバッグを収縮させることで気道確保を行い，気道閉塞症状を軽減するシステムを提案する．

第 3 章 提案する睡眠姿勢の制御手法

本研究では、睡眠時の気道閉塞によって OSA やいびきに悩みを抱える人々に対し、ストレスのない快適な睡眠を提供することを目的としたデバイスの開発を行う。デバイスの仕様を決定する際、ユーザの睡眠時の状態を推定するために使用するセンサを従来研究からの知見を元に選定した。そして本研究で提案する睡眠時の無拘束なセンシングおよびアクチュエーションについて制御フローを構築した。

本章では提案するシステムに使用する機器および全体の配置，制御フローについて 3.1 にて述べる。最後に本研究にて提案する睡眠時の姿勢推定と頸部位置推定について 3.2 にて述べる。最後に本研究にて提案する睡眠時の頸部昇降について 3.3 にて述べる。

3.1 本研究で提案するシステムの概要

図 3.1 に提案するデバイスの外観を示す。通常の枕であるとユーザが寝返りを打った際などセンサ面から離れてしまった段階でセンシングおよびアクチュエーションが無効となってしまう。従って、提案する枕の形状は図 3.1 に示すようにユーザを包むようなものとした。これにより、多少の寝返りや姿勢の変化があったとしてもユーザに密着でき、センシングとアクチュエーションの効果を継続することができる。

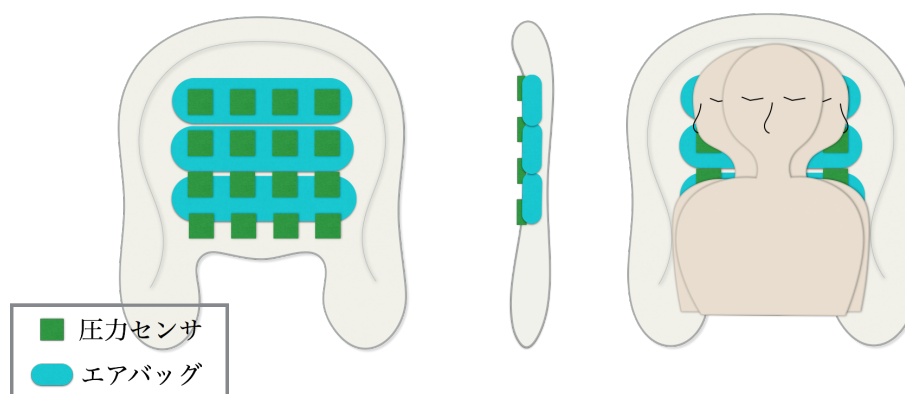


図 3.1 本研究にて提案する枕型デバイスの概観

このように本研究では一般家庭や病院・ホテルなどの施設に比較的組み込み易い枕型の外装を持ったデバイスを提案する．2.2 に示す無拘束センシングの従来手法を踏まえ，本デバイスに用いる無拘束なセンサとして，圧力センサを組み込む．枕型デバイスとしてユーザに密着することができるという強みを生かすため，携帯性，ユーザビリティ向上のため，ユーザの体から距離を置いて使用する必要のある視覚センサや赤外線センサ，加速度センサの使用は検討しないものとする．本デバイスは図 3.1 のようにユーザの頭部から肩部を包み込むような形状とすることで，圧力センシングの精度を向上させるが，一方でユーザの動きを大きく障害しないよう寝返りを行うのに十分なゆとりをもたせるものとする．

3.2 使用する機器と全体の配置

本節では提案するデバイスに使用するセンサ・アクチュエータ類について述べる．本研究では圧力センサとして感圧式圧力センサ FSR406 (INTERLINK ELECTRONICS 社製) を用いる．これは図 3.2 に示すように 16 個のセンサをマトリクス状に配置して圧力シートセンサを作成した．圧力シートセンサからは図 3.3 に示すような圧力分布が得られる．これは圧力値が大きい値であるほど赤で，小さいほど青で示される．この圧力センサシートから得られる値を用いてユーザの睡眠時の姿勢を推定する．これを用いて，ユーザの寝返りなどの動きが発生した際にも的確に寝姿勢および頸部位置の推定を行う．

図 3.2 に示すエアポンプ (電装産業株式会社製) は流量が 1.6L/min のものを 3 台使用し，エアバッグを 3 箇所配置することでユーザの位置に応じた昇降を可能とした．なお，エアポンプの動作音によるユーザの睡眠への影響を考慮し，ポンプはユーザの頭部から半径 50cm まで離れた場所に設置可能とする．システム使用の際ユーザは睡眠時にスマートフォンを起動し，枕元に設置することで計測およびアクチュエーションを行う．圧力センサおよびエアポンプは arduino mega[30][31] を用いて制御され，スマートフォンと BluetoothLowEnergy (以下, BLE) [32] (浅草ギ研社製, BLESerial 2) を通じて通信を行う．圧力センサから得られたデータをスマートフォン内で処理し，頸部位置推定や頸部昇降の指令値送信を行う．センシング・アクチュエーションの際の各デバイス間のやりとりについて，図 3.4 にまと

める。

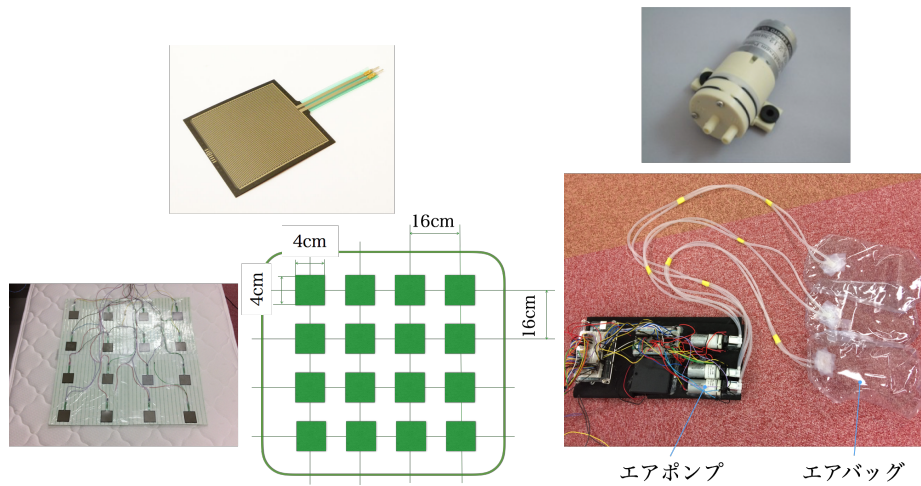


図 3.2 左図：圧力センサ FSR406 と配置図 右図：エアポンプとエアバッグ

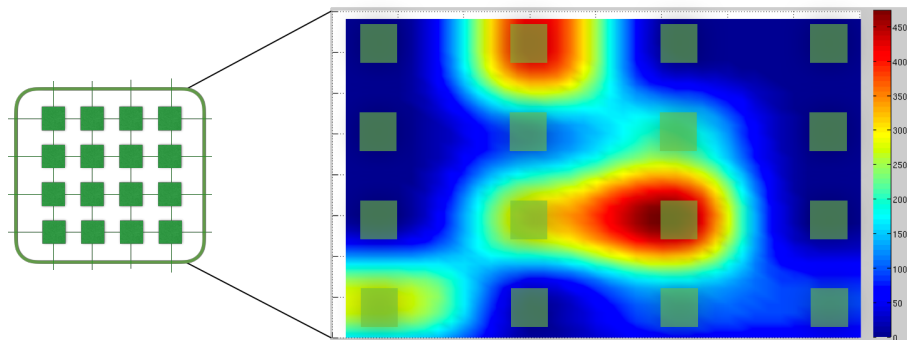


図 3.3 圧力センサ値の可視化

3.3 デバイスの制御フロー

システムの大まかな制御フローは図 3.5 に示す通りである。頸部昇降は待機状態から、圧力センサシートによっ睡眠時の姿勢推定と頸部位置の推定を行い、動作指令値を決定する。この指令値に基づきエアポンプを動作させ、頸部昇降を行い気道

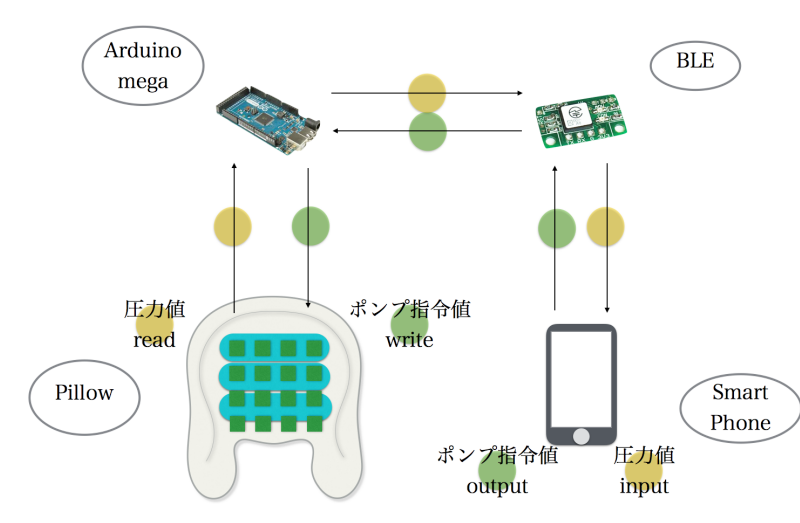


図 3.4 センサ・アクチュエータの情報連絡図

確保時の姿勢へと誘導する．頸部昇降が完了すると動作を停止し，システムは再び待機状態に戻り，これを繰り返す．待機状態とは，ユーザに対し頸部昇降が必要ないと判断された状態である．

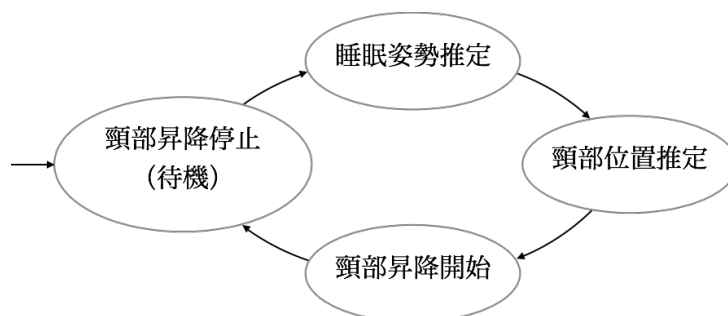


図 3.5 提案システムの制御フロー

続いて各フローについてどのような制御が行われているか説明する．睡眠姿勢推定の際は図 3.2 に示す圧力センサシート内の 16 個の圧力センサを用いて 16 次元の圧力値を抽出し，出力としていずれかの寝姿勢を返す．なお，本研究で識別する姿勢は

以下の 5 種類とする．

1. 仰臥位
2. 伏臥位
3. 側臥位（左）
4. 側臥位（右）
5. 気道確保姿勢

上記の姿勢の中で、いびきをかきやすい仰臥位時に次の頸部位置推定ステップへ進み、頸部昇降を行う [7]．頸部位置の推定は圧力センサシート状の圧力値が集中する 2 点とし、その中点を頸部として推定する．この結果からエアバッグを動作させ、ユーザの寝姿勢がいびきをかきやすい状態でなくなる、即ちユーザが気道確保姿勢・伏臥位・側臥位（左・右）のいずれかであると検知されるまで頸部昇降を続ける．図 3.6 に睡眠姿勢推定から頸部昇降までの制御フローについて示す．本手法を用いて睡眠時のユーザの気道閉塞状態を軽減する．

3.4 睡眠時の姿勢推定と頸部位置推定

まず、制御フローの第 1 段階に当たる睡眠時の姿勢推定について説明する．睡眠時にユーザが取り得る姿勢として考えられる、仰臥位・伏臥位・側臥位（左・右）・気道確保時の姿勢を圧力値から推定するため、本研究では機械学習によるパターン識別を行う．睡眠開始時から起床までの間、1 分ごとに 1 回の頻度でユーザの寝姿勢を推定その結果を基にエアポンプの動作を制御する．これによりいびきをかきやすく、気道確保が必要な仰臥位時にエアポンプを動作させ、気道確保時の姿勢へ調整されるまでポンプの動作を指令値を与える．

次に制御フローの第 2 段階に当たる睡眠時の頸部位置推定について説明する．頸部位置の推定の際も圧力センサシートから得られる値を用いる．図 3.7 のように、睡眠時の圧力分布は頭部と頸元の 2 箇所に強い値が出力される傾向がある．圧力シート上に強く反応が現れる 2 点のうち、上方を頭部、下方を頸元と仮定し、この中央に当たる部分を頸部と推定する．頭部、頸元位置の決定について、圧力センサシート上で圧力値が最大の箇所を降順に 2 点取得し、センサの位置関係から頭部・頸元

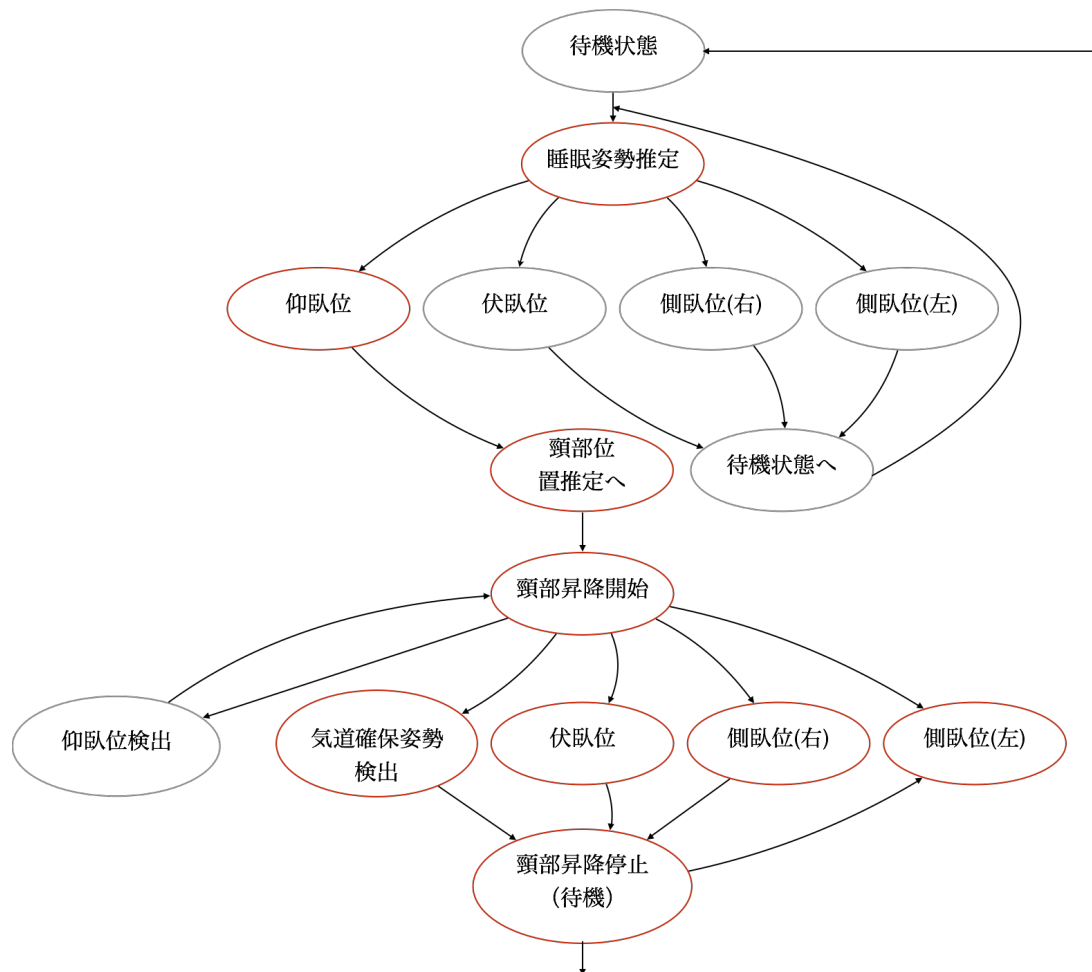


図 3.6 睡眠姿勢推定から頸部昇降までの制御フロー

を判断する。睡眠時のユーザの気道確保を自動で行う際、枕に配置されたエアバッグのどの箇所を動作させるかを決定するために頸部位置推定を行う。頸部位置推定では圧力値から推定されるユーザの頭部・頸元の位置関係から図 3.8 のように上方を頭部、下方を頸元として各位置を推定する。以上より決定された睡眠時の頭部および頸元の間際に当たる部分を頸部位置と推定することで、3 箇所を設置されたエアバッグのうちどれを動作させるかを決定する、

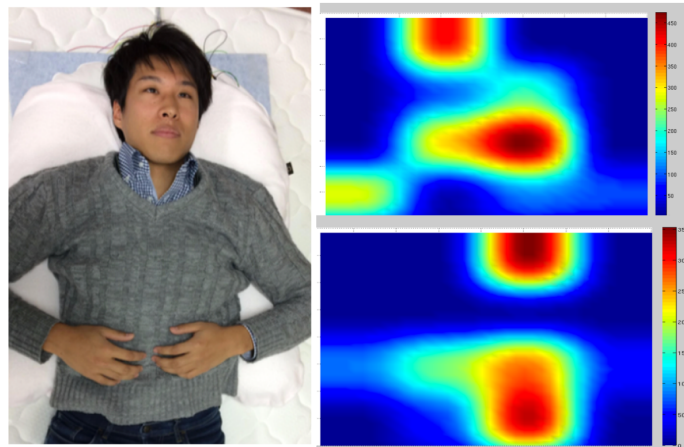


図 3.7 仰臥位時の圧力分布図

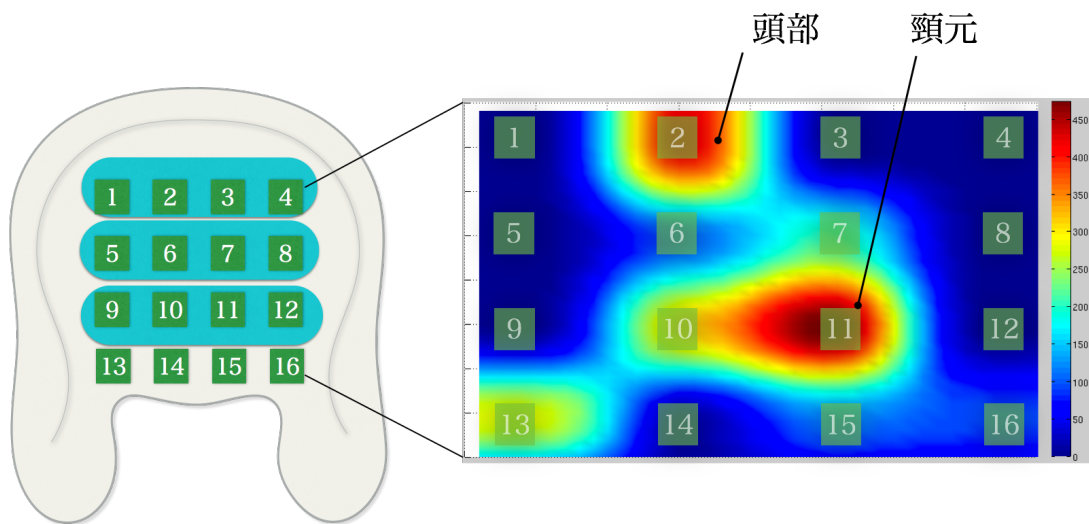


図 3.8 圧力センサの位置関係による頭部・頸元の決定

3.5 睡眠時の頸部昇降

3.4にて述べた頸部位置の推定結果を基に枕内に配置された3箇所のエアバッグのうち、図3.9に示される位置のエアバッグを昇降させることで気道確保姿勢へとユーザを誘導する。圧力センサシートで求められた頸部位置に当たるエアバッグⅠおよび頭部位置に当たるエアバッグⅡを共にエアポンプを用いて昇降する。ポンプ

動作によって、頸部位置に当たるエアバッグⅠはユーザの気道を押し上げるため膨張させ、同時にエアバッグⅡの収縮によりユーザの頭部を降下させることで気道確保を行う。各エアバッグは初期状態として一定量の空気を封入しておき高さはそれぞれ 3cm となっている。本デバイスは睡眠開始と同時にユーザの寝姿勢を検知し、リアルタイムで気道を確保するよう高さ調節を行う。圧力センサシートによってユーザの気道確保姿勢、あるいは伏臥位、側臥位（左・右）が判定されるとエアポンプの動作は停止する。この動作を繰り返し行うことによってユーザの気道閉塞症状を常にセンシングし、それを軽減するアクチュエーションを自動で生成することができる。

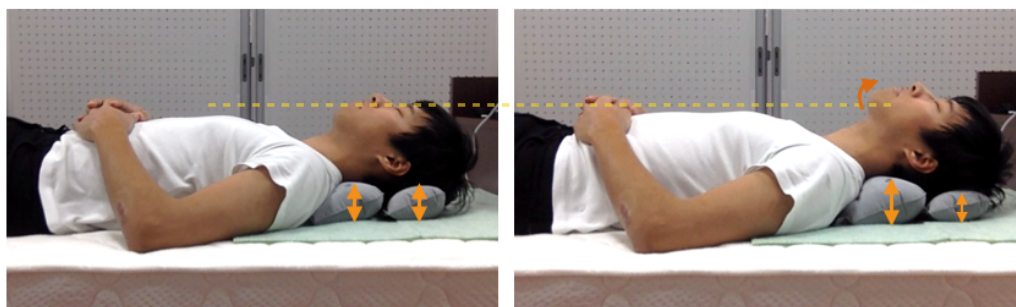
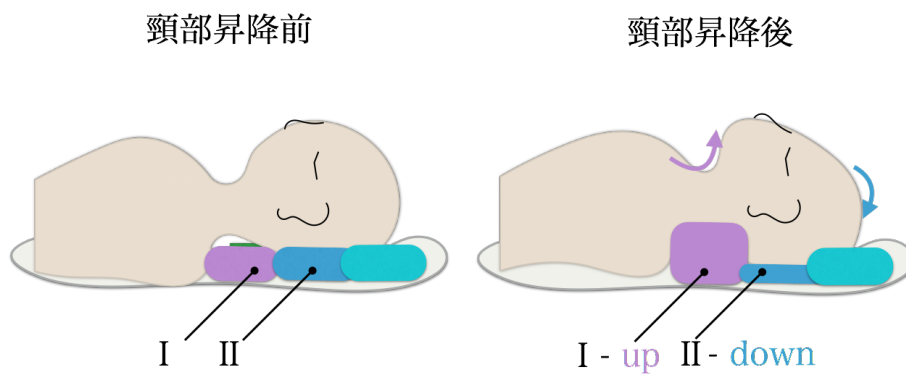


図 3.9 頸部昇降前後のユーザとエアバッグの動作

第 4 章 寝姿勢推定精度の検証

本章では無拘束センシングによる睡眠時の姿勢推定を目的とした実験を行う。本デバイスの要素技術となる睡眠時の寝姿勢推定の精度検証を行った実験とその結果について述べる。寝姿勢の推定手法の実装に関する説明を 4.1 で行った後、実験の Protokol について 4.2 にて述べる。続けてそれぞれの推定手法を行った際の結果を 4.3 にて述べる。最後に 4.3 にて得られた結果に対する考察を述べる。

4.1 圧力センサシートを用いた寝姿勢計測

3.4 にて述べたように、本研究では圧力センサシート内の 16 個の圧力センサから得られる値を基に機械学習によるパターン識別によって寝姿勢の推定を行う。このシートを用いて睡眠時の各姿勢における圧力値の計測を行った。結果を図 4.1 に示す。

このように各姿勢ごとの圧力センサ値からそれぞれの特徴が表れていると考えられる。本研究ではこの圧力値を入力とした機械学習を用いて、各姿勢を識別する。寝姿勢識別に向けた従来の取り組みとして、16 個の安価な圧力センサから得られるデータを Support Vector Machine (以下 SVM) によって寝姿勢の推定が行われている [12]。この研究によって識別精度が 83% という結果が得られた。本研究では使用する圧力センサが上半身のみ接する範囲で配置されており、かつ 16 個のセンサが用いられている。識別を行う際に、従来研究と同様 SVM を用いて識別精度を求めると同時に教師あり学習の手法である Random Forest を使用した際の識別精度を求める。以下の実験ではこれらの手法を用いた識別精度の検証により、どの識別器によって寝姿勢の識別を行うかを決定する。

4.2 実験 Protokol

本研究の目的は、圧力センサデータから得られる 16 次元の値から、仰臥位、伏臥位、側臥位(左)、側臥位(右)、気道確保姿勢の 5 状態を識別する際、Linear SVM、Non-Linear SVM、Random Forest のうち、どの手法が最も高い精度で識別可能

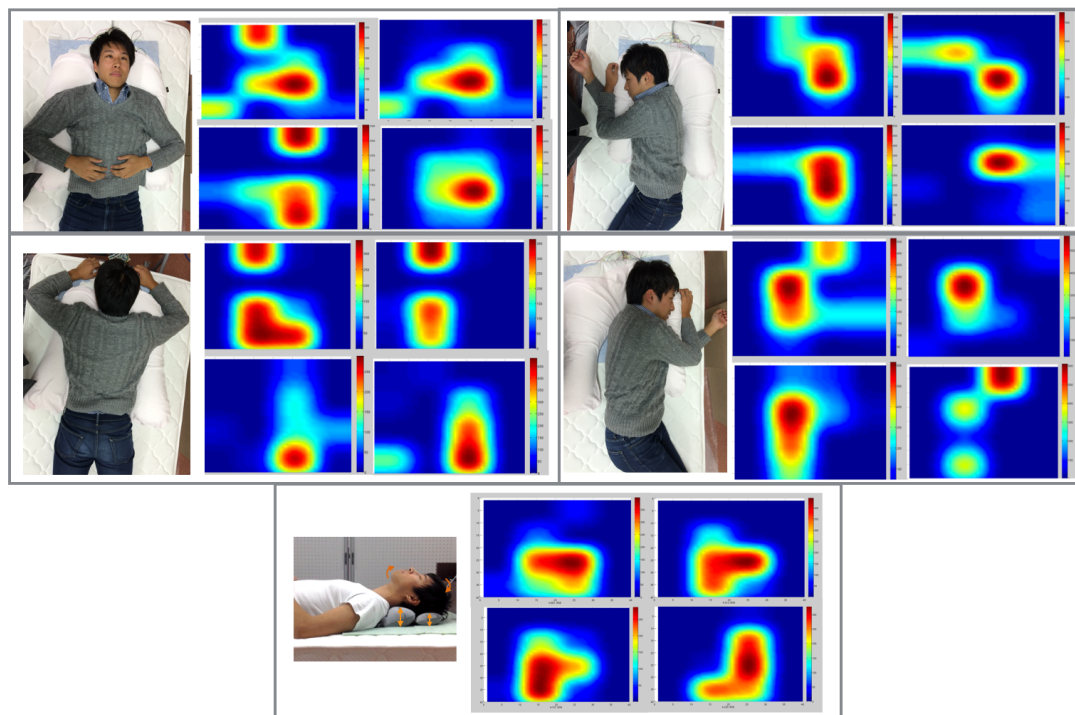
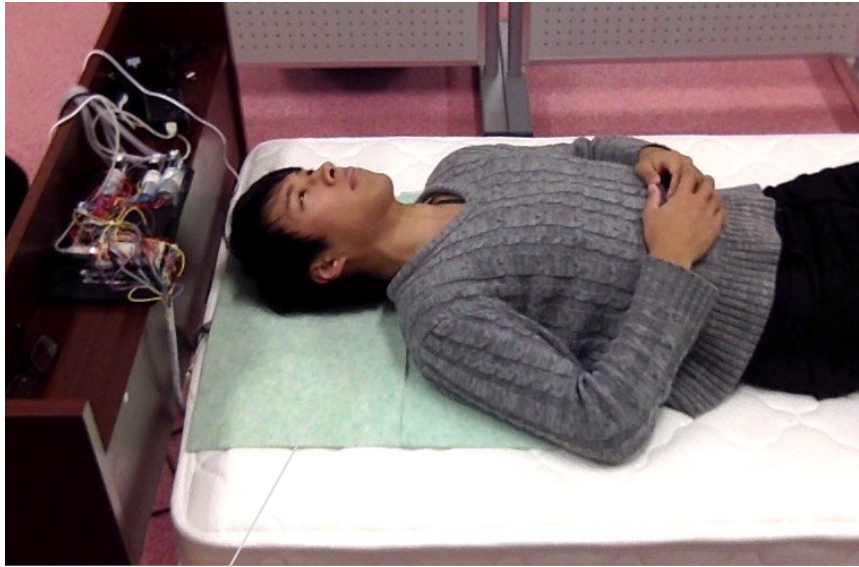


図 4.1 各姿勢における圧力可視化例

かを検証することである．実験に用いるデータセットとして，9 人の健康な被験者（男性 7 名，女性 2 名）によって各寝姿勢のごとのデータを，圧力センサシートを用いて抽出した．各被験者にはセンサシート上でそれぞれの姿勢の中でシート上に収まる範囲でランダムに移動し，ひとつの姿勢につき 5 パターンのデータを抽出する．つまり，9 名の被験者に 5 の姿勢を 5 パターンに分けて抽出するため，全 225 姿勢のデータが得られることになる．ここで抽出されるデータと全被験者の寝姿勢情報付きデータを統合したデータセットを用いて寝姿勢の推定を行う．実験で得られた 20,404 個のデータセットをそれぞれ訓練データ（14,282 個），テストデータ（6,122 個）に 7 : 3 の比率でランダムに分割した．これを用いて Linear SVM，Non-Linear SVM，Random Forest の 3 つの手法による学習および 5 クラスの識別を行う．それぞれの識別結果を基に，本研究で使用する寝姿勢推定の学習方法を決定する．



圧力センサシート

図 4.2 圧力センサシートによる寝姿勢の計測

4.3 実験結果

寝姿勢推定実験の結果，各識別手法によって表 5.5 に示す正答率が得られた．またそれぞれの学習方法における各姿勢を推定した時の適合率・再現率および F 値を求めた．この結果についてそれぞれ表 4.2，4.3，4.4 に示す．

寝姿勢推定実験の結果をそれぞれ示す．

表 4.1 各学習方法での寝姿勢推定結果

	Linear SVM	Non-Linear SVM	Random Forest
Accuracy [%]	59.30	66.58	96.92
Learning Sample [%]	60.36	67.59	99.57

以上より，Random Forest を使用した結果が最も識別精度が高いという結果が得られた．

表 4.2 Linear SVM を用いた際の各姿勢の推定結果

Linear SVM	仰臥位	伏臥位	右側臥位	左側臥位	気道確保
Precision [%]	47.76	61.68	60.61	60.54	68.93
Recall [%]	61.05	59.66	54.63	51.86	68.48
F1-Score [%]	53.59	60.66	57.47	55.87	68.70
データ数 [個]	1,276	1,252	1,338	1,207	1,364

表 4.3 Non-Linear SVM を用いた際の各姿勢の推定結果

Non-Linear SVM	仰臥位	伏臥位	右側臥位	左側臥位	気道確保
Precision [%]	58.86	65.25	65.66	70.39	74.92
Recall [%]	67.40	68.85	70.03	54.35	71.19
F1-Score [%]	62.84	67.00	67.78	61.34	73.01
データ数 [個]	1,276	1,252	1,338	1,207	1,364

表 4.4 Random Forest を用いた際の各姿勢の推定結果

Random Forest	仰臥位	伏臥位	右側臥位	左側臥位	気道確保
Precision [%]	97.18	96.38	96.71	97.38	97.02
Recall [%]	96.71	97.76	96.71	95.61	97.73
F1-Score [%]	97.02	97.07	96.71	96.49	97.37
データ数 [個]	1,276	1,252	1,338	1,207	1,364

4.4 考察

実験結果の考察について述べる．実験の結果から，Random Forest を用いた場合と線形・非線形の SVM を用いた手法とで 30% と大きく正解率に差が見られた．この原因として，学習に使用したデータセット内に外れ値が多く存在したためであると考えられる．Random Forest は外れ値のようなノイズが学習サンプル内に含まれてた場合でも，学習データをランダムに選択することができるためこれらの影

響を抑制することができる。一方、SVM ではこれらのノイズによる影響を受ける上、多クラス分類に最適なアルゴリズムではないため、Random Forest よりも正解率が劣るという結果に結びついたと考えられる。

以上より本研究で提案する睡眠時の寝姿勢推定には Random Forest を使用して識別を行うものとする。識別の正答率が 96.92% ということから、この手法を用いて睡眠時のユーザの姿勢を検知し、頸部位置の昇降動作を行うか否かを判定することは妥当であると言える。しかしながら、本手法を用いても 100% の識別を行えるわけではなく、謝った推定を行った姿勢を検知してしまう可能性がある。例えばユーザが伏臥位であるにもかかわらず、頸部昇降を行ってしまいユーザの呼吸を妨げることにより呼吸困難を生じるといった危険性がある。こういった問題に対処するため過去一定時間のデータから得られる推定結果を用いて多数決を行うことにより現在の寝姿勢の決定を行うことで識別結果の信頼性を高めるといった仕様の検討を行う必要がある。本実験では寝姿勢推定実験を通してユーザの仰臥位、伏臥位、側臥位（左）、側臥位（右）、気道確保姿勢の 5 状態を分類するための識別手法の選定を行った。

第 5 章 気道確保による呼吸状態改善の効果検証

本章では気道確保によって睡眠時の呼吸状態の改善が可能かどうかについて検証することを目的とした実験を行う。この実験により本研究で提案するデバイスの性能評価を行う。デバイスの性能評価を行う際、定量的な評価を行う為に呼吸状態の簡易計測にて使用される血中酸素濃度計を用いて被験者の睡眠データを枕型デバイスの使用と同時に計測する。この血中酸素濃度計について 5.1 にて述べる。血中酸素濃度計にて得られた睡眠時の生体情報を解析することによって、本研究で提案する枕型デバイスの使用により、通常の枕で睡眠を行った場合と比較して睡眠時の呼吸状態・睡眠の質の向上が見られるかを検証する。検証を行う際の過程を 5.2 で、対象とする被験者について 5.3 章で述べた、実験結果を 5.4 示す。最後に 5.5 にて考察を述べる。

5.1 血中酸素濃度計

本実験の評価の際に使用する血中酸素濃度計について述べる。血中酸素濃度計は図 5.1 に示すように、指や耳などに装着して使用者の血中酸素飽和度（以下、 SpO_2 [%]）と脈波を計測するための装置である。 SpO_2 は睡眠時であれば通常、図 5.7 上のように 95%~96% の間を緩やかに変動するが、睡眠時無呼吸症候群などで呼吸状態が乱れると、脈波とともに SpO_2 値が図 5.7 下のように激しい変動を繰り返す。このセンサにより睡眠時の呼吸状態を定量的に評価することができる。本研究では睡眠時の状態を医療機器認定を受けたコニカミノルタ社製のパルソックス 300i を用いて実験を行う。

5.2 実験プロトコル

本実験のプロトコルを説明する。実験は 2 段階に分けて行った。

1 段階目の実験として、被験者の絞り込みを行う。ここでは健康な被験者に対し睡眠時の SpO_2 を測定する。ここで 90% を下回る被験者が第 2 段階に移行するものとする。実験環境としては睡眠の質を阻害する要因を極力減らすために当日の行



図 5.1 血中酸素濃度計

動に制約を与える．具体的には被験者には実験当日に活動量計を装着し普段通りの生活を送って頂き，当日は朝から就寝まで 30 分を超える居眠り，飲酒は控えて頂く．この制約により普段通りの睡眠環境を整え，睡眠時の呼吸状態に影響を与えないようにする．以上の条件を満たした被験者に対し，6 時間以上の睡眠を任意の開始時間から行って頂く．このとき開始から全体の 8 割以上が計測できていない場合は実験を中断し，日を改め再度実験を行うものとする．睡眠時には図 5.3 左に示すような通常の枕を使用して頂き，睡眠時の SpO_2 を 5.1 にて説明したパルスソックス 300i を用いて計測する．被験者として 10 名の健康な男性を対象として実験を行い，一晩の SpO_2 値が 90% を下回るかどうか調査する．

2 段階目の実験では，1 段階目で計測されたデータに加え，図 5.3 右に示すような一定の位置で気道確保が可能な特殊な形状の枕を使用した場合の一晩の SpO_2 値を計測し，比較する．実験環境は 1 段階目と同様の制約を被験者に課し，同様の条件で睡眠時の SpO_2 をパルスソックス 300i にて計測する．ここから得られた SpO_2 値と 1 段階目で取得した SpO_2 値とを比較し，気道確保姿勢が睡眠の呼吸状態改善に与える効果について検証する．被験者は 1 段階目で一晩の SpO_2 値が 90% を下回ることが確認された 4 名の被験者とする．

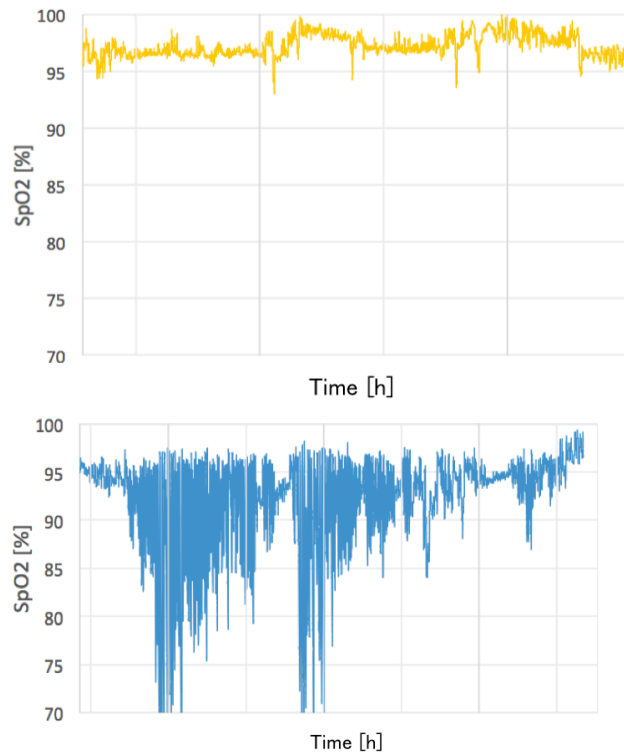


図 5.2 上：健常な SpO₂ 値 下：異常な SpO₂ 値

5.3 実験結果

2 段階の実験の対象となった 4 名の被験者について計測された SpO₂ 値を以下に示す。



図 5.3 左：通常の枕 右：気道確保

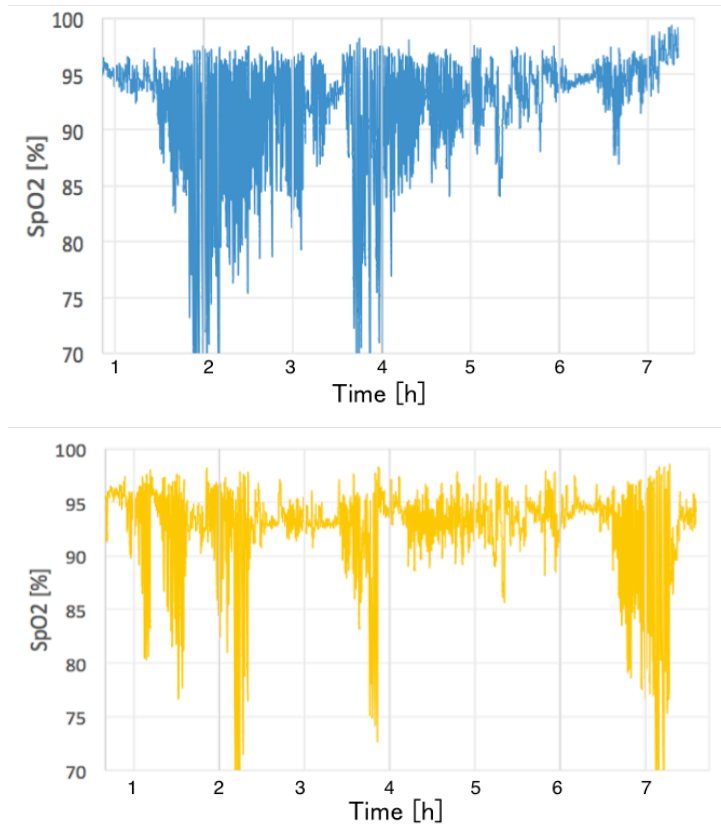


図 5.4 被験者 A の結果 上：通常の枕 下：気道確保

表 5.1 被験者 A の結果

睡眠時間	6h 14min 50sec	6h 55min 40sec
平均値 [%]	96.55	92.46
分散 [%]	27.84	19.18
90% 以下	1h 28min 40sec	59min 50sec

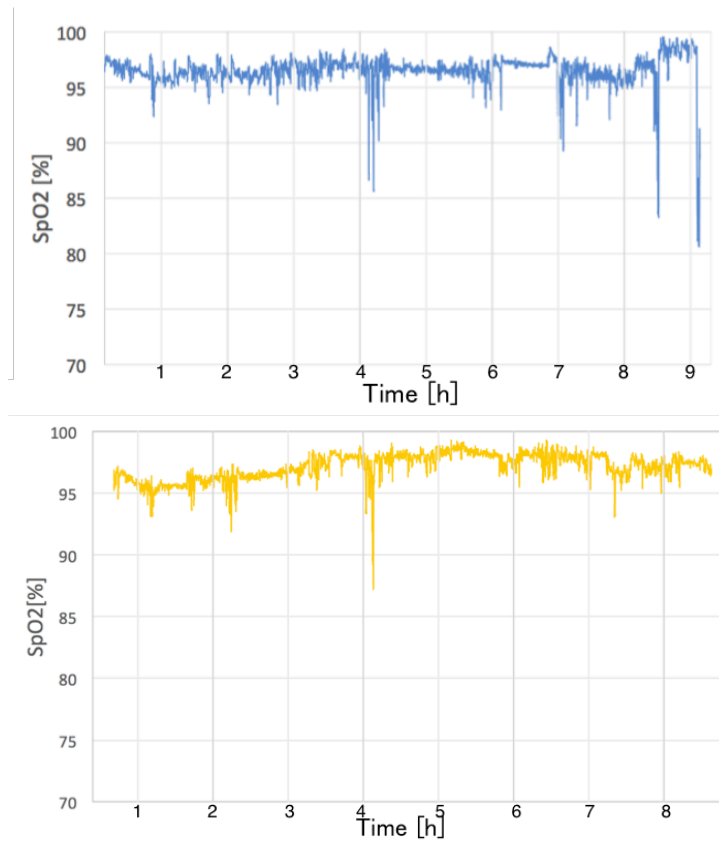


図 5.5 被験者 B の結果 上：通常の枕 下：気道確保

表 5.2 被験者 B の結果

睡眠時間	8h 59min 54sec	7h 57min 10sec
平均値 [%]	96.55	97.15
分散 [%]	1.92	1.13
90% 以下	3min 33sec	25sec

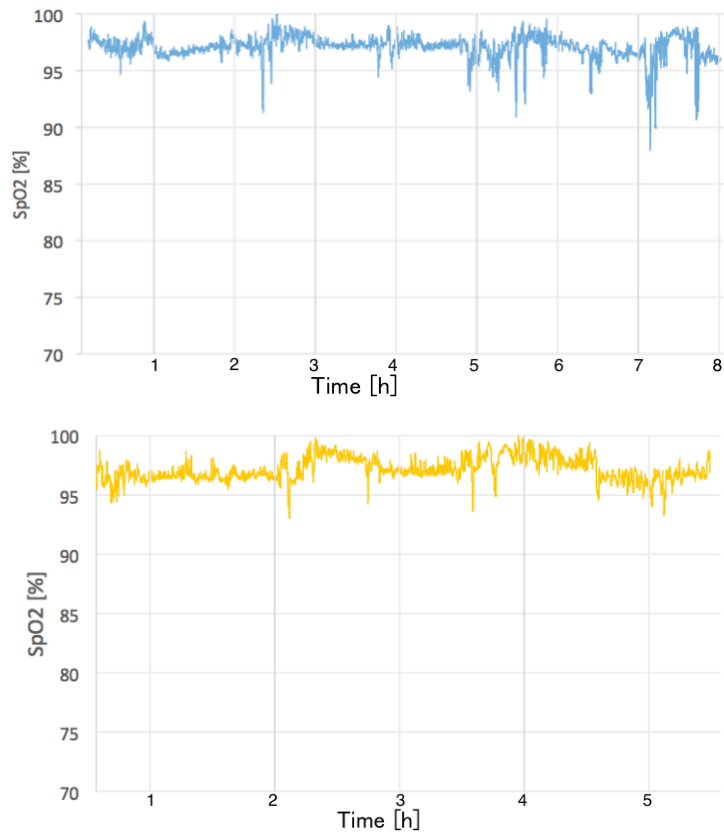


図 5.6 被験者 C の結果 上：通常の枕 下：気道確保

表 5.3 被験者 C の結果

睡眠時間	7h 49min 3sec	6h 53min 37sec
平均値 [%]	96.78	97.25
分散 [%]	1.03	0.96
90% 以下	24sec	0sec

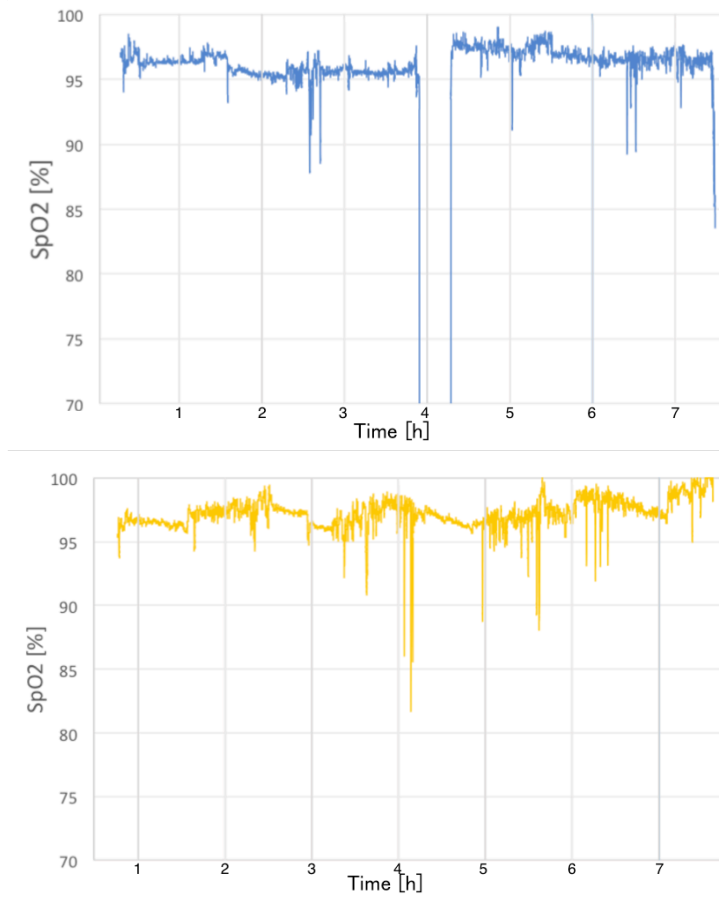


図 5.7 被験者 D の結果 上：通常の枕 下：気道確保

表 5.4 被験者 D の結果

睡眠時間	7h 12min 00sec	6h 51min 38sec
平均値 [%]	96.35	97.23
分散 [%]	1.16	1.38
90% 以下	52sec	53sec

5.4 考察

実験結果の考察について述べる．表通常の枕を使用した場合と気道確保を行った場合の睡眠時の呼吸状態を比較すると，4名中3名の被験者で SpO_2 の改善が見られた．以上より，睡眠時の気道確保によって気道閉塞状態を軽減できるといえる．従って，本研究で提案する枕デバイスによって動的に気道確保を行った場合に気道閉塞状態を改善できる可能性が示唆された．今後の課題として，本実験では静的な環境下で気道確保を行った際の呼吸状態の改善されることを示したが，本研究で提案する枕デバイスの効果を検証するため動的な環境下で気道確保を行った際にどのように気道閉塞状態が改善されるか検証を行う必要がある．また，評価項目に睡眠時のいびき量を定量的に計測し，気道確保の有無によってこれが軽減されるかについても検証を行う必要がある．

表 5.5 各被験者における SpO_2 90% 以下の時間

	被験者 A	被験者 B	被験者 C	被験者 D
通常の枕	1h 28min 40sec	3min 33sec	24sec	52sec
気道確保	59min 50sec	6min 56sec	0sec	53sec

第6章 まとめ

本論文のまとめとして、本研究で提案する睡眠時の気道閉塞症状を軽減する頸部位置推定と頸部昇降機能付き枕について、そのシステムを説明した。各提案手法を実現する要素技術である、睡眠時の寝姿勢識別を Random Forest にて実装し、識別精度の評価を行った。4名の被験者に対し、気道確保を行う場合とそうで無い場合で睡眠時の呼吸状態を定量評価できる血中酸素飽和度を計測し、比較した。その結果、気道確保によって4名中3名の被験者に血中酸素飽和度の改善が見られた。

今後の展望として、ユーザの寝姿勢推定の際に識別精度の向上を図るため、学習データの追加やパラメータ調整を行う。さらに音センサを複合的に用いていびき音を検出することで、仰臥位のみを頑健に推定可能とする。同時にユーザの頸部位置推定アルゴリズムの考案、実装を行う。提案するシステムを本研究のターゲットとする睡眠時の気道閉塞によって OSA やいびきに悩みを抱える人々に対して使用した際に、どの程度の改善が見込めるのかを実証実験を通して定量的に評価したい。

謝辞

本研究に取り組むにあたって、多くのご指導、ご鞭撻を賜りました主指導教員である環境知能学研究室 萩田紀博教授に心よりお礼申し上げます。また、研究内容について、貴重なご助言をいただきましたユビキタスコンピューティングシステム研究室 安本慶一教授に厚く御礼申し上げます。環境知能学研究室 神原誠之准教授には、研究内容や発表技術に関して熱心に御指導と御助言を頂き、本論文の執筆にあたりましては細部に至るまで面倒を見ていただきました。深く御礼申し上げます。環境知能学研究室 浮田宗伯准教授にも、研究についての多くの御助言をいただきましたこと感謝申し上げます。本研究の実施にあたり国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）産学連携展開部 START 事業グループの主催する大学発新産業創出プログラム（START）の支援を受けましたことに感謝申し上げます。同プログラムにおいて担当メンターとして事業プロモーションを行っていただきましたヤフー株式会社の安宅和人様、プログラムオフィサーの宮下敬宏様、そして事務局の中西もも様にも感謝申し上げます。本研究を支えてくださった本学研究協力課の松木健幸様、大石健太郎様、植田康敏様。研究推進機構 産官学連携推進部門の西浦義万様、堤暁子様、那脇勝様、そして環境知能学研究室事務の南あずさ様にも深く感謝申し上げます。スリープウェル株式会社 吉田政樹様には、睡眠評価実験において脳波解析にご協力いただき、本研究の実験についての多くの御助言をいただきましたこと感謝申し上げます。最後に、苦楽を共にした環境知能学研究室の先輩、同輩、後輩に感謝の意を表して謝辞と致します。

参考文献

- [1] 百村伸一, 赤柴恒人, 麻野井英次, 安藤真一, 苅尾七臣, 塩見利明, 清野精彦, 田村彰, 陳和夫, 中元隆明, 成井浩司, 萩原誠久, 山科章, 安達仁, 他 "循環器領域における睡眠呼吸障害の診断・治療に関するガイドライン" *Circulation Journal*, Vol. 74 , pp.1053-1084, 2010.
- [2] 小池茂文, 田中春仁, 山本勝徳, "睡眠時無呼吸症候群" *臨牀透析*, Vol.24, no.7, pp.882-883,2008.
- [3] 中島庸也, "睡眠時無呼吸症候群への取り組みの現状とその将来:東京歯科大学市川総合病院におけるこれまでの10年とこれからの10年" *歯科学報*, Vol. 109(2), pp.158-164, 2009.
- [4] J.Ngiam,R.Balasubramaniam, MA.Darendeliler,AT. Cheng, K.Waters, CE.Sullivan, "Clinical guidelines for oral appliance therapy in the treatment of snoring and obstructive sleep apnoea" *Australian dental journal*, Vol. 58 , pp.408-419, 2013.
- [5] 久場亮平, 可部明克, "睡眠時無呼吸症候群サポートロボットの試作と性能評価" *早稲田大学大学院博士課程人間科学研究科修士論文*, Vol. 25, 2012.
- [6] S.Ishizaka, S.Moromugi, M.Kobayashi, H.Kjihara, K.Koga, H.Sugahara, T.Ishimatsu, S.Kurata, J.Kirkness, K.Oi, and T.Ayase, "A Remote-Controlled Airbag Device Can Improve Upper Airway Collapsibility by Producing Head Elevation With Jaw Closure in Normal Subjects Under Propofol Anesthesia" *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Vol. 2, 2014.
- [7] Cartwright RD, "Effect of sleep position on sleep apnea severity" *Sleep* 7,

pp.110-114, 1984.

- [8] 亀山研一, 鈴木琢治, 行谷まち子, “快眠のための睡眠判定と睡眠モニタシステム” 東芝レビュー, Vol.61 No.10, 2006.
- [8] 高橋宏明, 垣鍔典也, 本山壮一, 貞岡達也, “圧力センサによる睡眠中の呼吸・体位の無侵襲・無拘束な計測” 日本ロボット学会誌, Vol. 16, pp.705-711, 1998.
- [9] 嶋田有司, “圧電素子を用いた睡眠状態の推定” 法政大学大学院工学研究科システム工学専攻修士論文 2011.
- [10] 王鋒, 田中真美, 長南征二, “PVDF センサを用いた睡眠時呼吸・心拍の無拘束無侵襲計測に関する研究(第2報: ウェーブレット変換を用いた呼吸心拍の検出)” 日本機械学会, 2001.
- [11] S.Boughorbel, F.Bruekers, K.Groot, “Pressure-Sensor System for Sleeping-Posture Classification ” Proceedings of Measuring Behavior, Vol.40, pp. 358-361, 2012.
- [12] M. Farshbaf, R. Yousefi, M. Baran Pouyan, S. Ostadabbas, M. Nourani, “Detecting High-Risk Regions for Pressure Ulcer Risk Assessment ” IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine, Vol.40, pp. 255-260, 2013.
- [13] 青木広宙, 青木廣市, 中島真人, “近赤外輝点マトリックス照影による非接触・無拘束就寝者呼吸監視システム” 電学論, Vol.124, No.6, pp.1251-1258, 2004.
- [14] 青木広宙, 中村秀俊, 中島真人, “ファイバースケイティング視覚センサを用いた睡眠時呼吸障害スクリーニング方法の提案” IEEJ Trans. EIS, Vol.124, No.9, pp.1724-1752, 2004.

- [15] J.Lee, M.Hong, S.Ryu, “ Sleep Monitoring System Using Kinect Sensor ” International Journal of Distributed Sensor Networks, Vol.2015, 2015.
- [16] 加藤綾子, 濃野剛, 福井康裕, “ 睡眠評価のための近赤外線画像を用いた心拍数変動の解析 ” 平成 26 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.1396-1399, 2014.
- [17] K.Higashikatsuragi, Y.Nakahata, I.Matsunami, A.Kajiwara, “ Remote Respiration Monitoring Using Ultra-Wideband Microwave Sensor ” IEEJ Trans. EIS, Vol.129, No.6, pp.1056-1061, 2009.
- [18] F.Adib, H.Mao, Z.Kabelac, D.Katabi, R.C.Miller, “ Smart Homes that Monitor Breathing and Heart Rate ” CHI '15 Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.837-846, 2015.
- [19] 岡田志麻, 藤原義久, 安田昌司, 牧川方昭, 飯田健夫, “ 呼吸波形を用いた徐波睡眠期の推定 ” (日本感性工学会研究論文集), 感性工学研究論文集, Vol. 7, No. 1, pp.145-151, 2007.
- [20] 山本康平, 橋素子, 前野蔵人, 北川正嗣, 岡田志麻, “ マイクロ波を用いた遠隔・非接触な体動計測に基づく睡眠深度推定 ” The 29th Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 2015.
- [21] 増田祐太, 山地隆行, “ マイクロ波センサによる睡眠状態可視化技術 ” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2014) シンポジウム, 2014.
- [22] 長塚麻美, 串山久美子, 馬場哲晃, “ 体動検知を用いた睡眠深度測定による睡眠の質向上インタフェースの提案 ” 情報処理学会 インタラクシオン, Vol.40,

pp. 207-209, 2015.

- [23] 下井信浩, 間所洋和, “ 3 軸加速度計とピエゾ荷重センサを用いたベッドモニタリングシステムに関する研究 ” 計測自動制御学会論文集, Vol.49, No.12, pp.1092-1100, 2013.
- [24] 岡田志麻, 藤原義久, 松浦英文, 安田昌司, 水貝浩二郎, 牧川方昭, 飯田健夫, “ 加速度センサを用いた掛け布団式睡眠時心拍計測装置 ” 生体医工学, Vol.41, No.4, pp.255-259, 2003.
- [25] 南浦武史, 野田聡, 阪井英隆, 山本泰司, 藤原義久, 松浦英文, “ いびきの無拘束センシング方法 ” 第 48 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2004.
- [26] 高橋宏明, 垣鍔典也, 本山壮一, 貞岡達也 “ 鼾と睡眠無呼吸 ” 耳展, pp.237-246, 1989.
- [27] 板坂芳明, 宮崎総一郎, 山川浩治, 戸川清, “ 閉塞性睡眠時呼吸障害といびきの音響分析 ” 口咽科, pp.137-143, 1994.
- [28] 原浩貴, 村上直子, 山下裕司, 山川浩治, 戸川清, “ 周波数分布から見たいびき音の音響解析 ” 口咽科, pp.245-252, 2003.
- [29] 田中正吾, 松本佳昭, “ 心音センサを用いた心拍および呼吸の無拘束計測 ” 日本機械学会, 2001.
- [30] 平井佑樹, 佐山裕一, 三澤大地, 金子敬一, “ Arduino を用いた会話支援システムの試作 ” 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI), 2014.
- [31] 劉曉萌, 田中二郎, “ ライフログデバイスにおける行動履歴の検索とその評価 ” 筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究科修士論文, 2014.

- [32] 石塚宏紀, 上坂大輔, 黒川茂莉, 渡邊孝文, 村松茂樹, 小野智弘, " BLE シグナルと PDR によるハイブリッド屋内測位手法の基礎検討 -Open Beacon Field Trial 参加における実験結果の共有-" モバイルコンピューティングとユビキタス通信 (MBL), 2014.
- [33] 棚橋ひとみ, 渋谷惇夫 " 枕の高さ変化が等圧分布に及ぼす影響 " Journal of the Japan Research Association, Vol.40, pp. 120-127, 1999.