

2025年度 修士学位請求論文

姿勢矯正に向けたスマートフォンベースの  
首の角度リアルタイム推定手法とその応用

明治大学大学院先端数理科学研究科  
先端メディアサイエンス専攻

渡邊 健斗

Master's Thesis

A Smartphone-Based Real-Time Neck Angle  
Estimation Method for Posture Correction and Its  
Applications

Frontier Media Science Program,  
Graduate School of Advanced Mathematical Sciences,  
Meiji University

Kento Watanabe

# 概要

スマートフォン利用時において、スマートフォンを肩より下に置き、上から覗き込むようなうつむいた姿勢で操作してしまう人が多くみられる。首は傾ければ傾けるほど首に対して負荷がかかるため、このような姿勢を避けることが望ましい。スマートフォン利用時のユーザの姿勢をリアルタイムに推定しフィードバックするシステムにより姿勢矯正の意識を促進できると考えられるが、既存の手法ではスマートフォンとは別にセンサを装着する必要があるため導入コストが高い、ユーザの首の角度を正確に推定できていないなどの問題があった。

そこで本研究では、まずスマートフォンのみを用いてユーザの首の角度を推定するために、スマートフォンのセンサと内カメラに映るユーザの画像特徴に着目した手法を提案した。データセットの構築手法についても検討し、大学生、大学院生5人から84,374件のデータを取得した。回帰モデルを用いて学習を行い、その推定精度を検証した結果、改善の余地はあるものの一定の精度で推定が可能であることが明らかとなった。

次にユーザの姿勢矯正を促進するため、ケーススタディとして本手法を用いてユーザの首の角度をリアルタイムにフィードバックするシステムをゲームに応用した。具体的には、姿勢が良いとスコアが上がりやすく、姿勢が悪いとスコアが上がりにくくなるようにゲームをデザインした。システムを用いたユーザスタディを実施したところ、首の角度に連動したフィードバックはゲームプレイ中の姿勢への意識を有意に高めることが明らかになった。

さらに、本手法の応用可能性を検証するため、推定精度の向上を行った後、本手法を利用しやすいようにしたライブラリを用いてハッカソンを実施した。その結果、様々なジャンルで多様なフィードバックを行うアプリケーション案が得られ、実際に開発されたものの創造性に対して高い評価が得られた。また本ライブラリを利用することで限られた時間でも満足度の高いアプリケーションが開発可能であることが示され、本手法の開発容易性や応用可能性の高さが示唆された。

# Abstract

Many people use their smartphones by holding them below shoulder height and looking down at the screen with their neck bent forward. As the neck is tilted further forward, the physical load on the neck increases, making this posture undesirable. Real-time posture estimation and feedback systems could help users become more aware of their posture during smartphone use. However, many existing approaches require additional wearable sensors, which increases setup costs, or can not estimate neck angles with sufficient accuracy.

In this work, we proposed a method to estimate a user's neck angle using only a smartphone, based on onboard sensor data and image features captured by the front-facing camera. We also examined a procedure for constructing a dataset and collected 84,374 samples from five university and graduate students. Using regression models, we evaluated the estimation performance and found that the proposed method can estimate neck angles with a practical level of accuracy, although further refinement is required.

To explore how this method can support posture awareness, we conducted a case study in which real-time neck angle feedback was integrated into a game. The game was designed so that maintaining good posture made it easier to increase the score, while poor posture made scoring more difficult. A user study showed that posture-based feedback increased users' awareness of their neck posture during gameplay.

To further explore the applicability of our approach, we organized a hackathon using a library designed to simplify the use of the proposed method, after improving the estimation accuracy. Participants developed a variety of application ideas across different genres, using diverse forms of feedback, and the resulting applications were rated highly in terms of creativity. These results suggest that the proposed method and library support rapid application development and have the potential to be applied in a wide range of scenarios.

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	スマートフォンの利用と首への負担	1
1.2	理想的なスマートフォン利用	1
1.3	姿勢矯正システム	3
1.4	本研究の目的	3
1.5	本研究の構成	4
<b>第2章</b>	<b>関連研究</b>	<b>5</b>
2.1	スマートフォンの利用と姿勢に関する研究	5
2.2	姿勢矯正システムに関する研究	5
2.2.1	着座姿勢における姿勢矯正システム	5
2.2.2	スマートフォン利用時における首の角度推定手法	6
2.3	シリアスゲームを用いた研究	7
2.4	ハッカソンを用いた研究	8
<b>第3章</b>	<b>スマートフォンのみを用いた首の角度推定手法</b>	<b>10</b>
3.1	提案手法	10
3.1.1	概要	10
3.1.2	特徴量とその前処理	10
3.1.3	利用環境	11
3.2	データセット構築	12
3.2.1	既存研究におけるデータセット構築手法	12
3.2.2	本研究でのデータセット構築手法	12
3.2.3	正解データと基準姿勢	12
3.2.4	データセット構築のための動作デザイン	13
3.2.5	データセット構築システム	14
3.2.6	データセット構築環境	15

---

3.3	機械学習による推定	16
3.3.1	推定方法	16
3.3.2	推定結果	16
3.4	考察	19
3.4.1	推定精度	19
3.4.2	特徴量による影響	19
3.4.3	エクストラツリーを用いた検証	20
3.4.4	モデルの比較と議論	22
<b>第4章</b>	<b>上を向いてタップしよう：シリアスゲームを用いた応用</b>	<b>23</b>
4.1	姿勢矯正用シリアスゲーム	23
4.1.1	姿勢に応じたフィードバックの設計	23
4.1.2	ゲームデザイン	24
4.1.3	キャリブレーション	25
4.1.4	システム構成	25
4.2	実験	27
4.2.1	実験概要	27
4.2.2	実験手順	27
4.3	結果	30
4.4	考察	30
4.4.1	姿勢への意識	30
4.4.2	ゲームの楽しさ	32
<b>第5章</b>	<b>首の角度推定精度の向上</b>	<b>35</b>
5.1	正解データのアノテーション	35
5.1.1	概要	35
5.1.2	アノテーションシステム	35
5.1.3	アノテーション手法	36
5.1.4	アノテーション結果	36
5.2	学習方法の改善	38
5.3	結果	39

<b>第6章</b>	<b>ハッカソンによる応用可能性の検証</b>	<b>42</b>
6.1	首の角度推定ライブラリ	42
6.1.1	概要	42
6.1.2	首の角度推定システムの動作環境	42
6.2	ハッカソン	44
6.2.1	概要	44
6.2.2	ハッカソンの流れ	44
6.3	成果物とその評価	46
6.3.1	成果物の概要と創造性の評価	46
6.3.2	特に評価が高かったアプリケーション	46
6.4	開発体験および開発容易性の評価	48
6.4.1	参加者の主観評価	48
6.4.2	会話ログ分析	49
6.5	考察	50
6.5.1	応用可能性	50
6.5.2	開発容易性	51
<b>第7章</b>	<b>本研究の制約と発展の可能性</b>	<b>53</b>
7.1	限定的な評価	53
7.2	応用についての制約と懸念	53
<b>第8章</b>	<b>結論</b>	<b>55</b>

# 第1章 はじめに

## 1.1 スマートフォンの利用と首への負担

スマートフォンの普及により多くの人が「ストレートネック」になってしまうことが大きな問題となっている [1]. ストレートネックとは、図 1 に示すように本来湾曲しているべきである首の骨の湾曲が少なくなり、まっすぐになってしまうことをいう。ストレートネックになってしまうと首こりや肩こりといった健康面だけでなく、美容面、精神面などに様々な悪影響がある。このストレートネックは、何らかの対象を上から覗き込むような形でうつむき、頭部が前に突き出た「頭部前方位姿勢」を長時間続けることによりなりやすいことが知られている。

ここで、頭部前方位姿勢のように姿勢が悪くなりやすい状況として、スマートフォン利用時があげられる [2]. 実際、Yahoo!クラウドソーシング<sup>1</sup>にて男女 2,000 人を対象としたアンケート調査を 2023 年 7 月に行ったところ、有効回答者 1,623 人のうち約 83%がスマートフォンを首の高さ以下の位置で利用していると回答していた。さらに、約 72%が肩または首の凝りを感じていると回答していた。図 2 に示すように、そもそも首は傾ければ傾けるほど首に負荷がかかるとされており [3]、日常的にうつむいた姿勢でスマートフォンを利用していると首に大きな負荷がかかることになる。

## 1.2 理想的なスマートフォン利用

スマートフォンの不適切な利用方法がストレートネックをはじめとした筋骨格障害の要因となりうることはよく知られており、身体への影響が少ない理想的なスマートフォンの利用方法についても様々な論文や医療機関により言及されている [4, 5]. 多くの主張で共通する理想的な利用方法は以下である。

- スマートフォンを目の高さで持つこと
- 15 分程度を目安にスマートフォンの利用を中断し休憩すること

---

<sup>1</sup><https://crowdsourcing.yahoo.co.jp/>

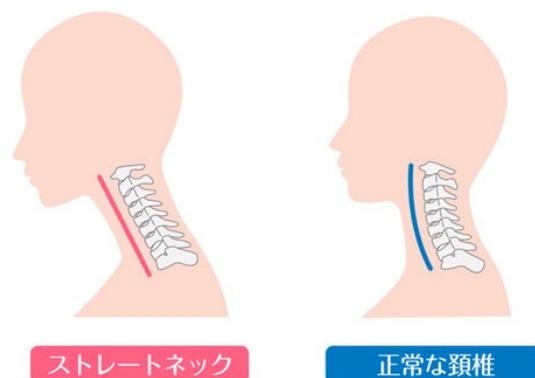


図 1: ストレートネックと正常な首

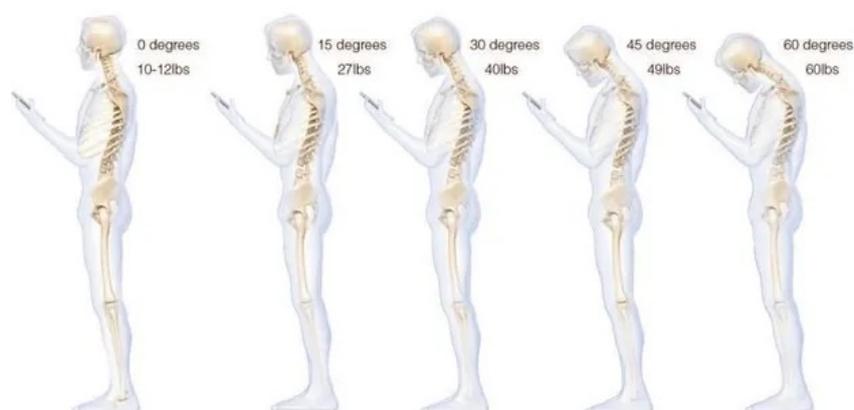


図 2: 首の角度と首への負荷 [3]

- 頭部の屈曲をできるだけ小さくすること（肩と耳が地面に対して垂直に並ぶようにすること）
- スマートフォンの画面を目から 30～40cm 程度離すこと

しかし、スマートフォンを目の高さで保とうとすると腕を常に持ち上げ続ける必要があり、このような姿勢は VR やタッチパネルなどの操作時にみられる「ゴリラアーム症候群 (Gorilla Arm Syndrome)」 [6] を引き起こす可能性がある。ゴリラアーム症候群は空中での腕の操作による疲労を指し、スマートフォンを 20 分以上利用すると有意に腕に疲労感を覚えることが示されている [7]。

これらの結果から、スマートフォンを利用する際はスマートフォンを目の高さで 30～40cm 程度離して持ち、首を曲げないように保ったまま、15～20 分程度を目安に休憩することが望ましいといえる。

### 1.3 姿勢矯正システム

スマートフォン利用時の頭部前方位姿勢を防ぐには日常的に姿勢に注意してスマートフォンを利用する必要があるが、自身で意識することは容易ではない。そのため、システム等によってユーザのスマートフォン利用時の姿勢をリアルタイムで推定し、姿勢が悪い場合にフィードバックを返すことが重要であると考えられる。ここで、スマートフォンを利用しているユーザの姿勢を推定するために様々な手法がある。例えば後頭部にウェアラブルセンサを装着して首の角度を推定する手法 [8] や、Kinect と電気ゴニオメータを用いて首の角度を推定する手法 [9] が提案されている。これらの手法は高精度で推定可能なものの、センサを購入、装着する手間などによる導入コストの高さや、特定の範囲内でスマートフォンを使用しなければならないといった制約がある。また Lawanont ら [10] は、スマートフォンのみを用いて首の角度を推定しているが、ユーザの首の角度を正しく推定可能な条件に制約があった。このように、既存手法は日常的なスマートフォン利用時に用いることは困難である。

### 1.4 本研究の目的

本研究の目的は、スマートフォンのみを用いて首の角度を推定可能にし、スマートフォン利用時における姿勢矯正意識の促進を支援することである。まずは、スマートフォン利用時における姿勢矯正意識の促進を支援することである。まずは、スマートフォンの傾きと、スマートフォンの内カメラから得た映像から顔や首に関する特徴量を算出し、回帰モデルを用いて首の角度を推定する手法を提案する。ここで、これまでの研究では頭部の傾きを首の角度としており、実際の首の角度を十分に考慮できていないという問題があった。そのため、首の角度を十分に考慮したデータセットを構築する手法も検討し、データセットを構築したうえでその精度を検証する。また、実際に本手法を用いたアプリケーションを実装し、スマートフォン利用時の姿勢矯正意識の促進効果について検証するケーススタディを行う。さらに、本手法をライブラリとして公開しそれを用いたハッカソンを行うことで、発想されるアイデアの多様性や第三者による利用容易性などの応用可能性について検証する。これらを通して、スマートフォン利用者に対する有用性を明らかにするとともに、他の研究者や開発者による可用性や発展容易性について調査する。

## 1.5 本研究の構成

本研究は、本章を含む全 8 章から構成される。まず本章でスマートフォン利用時の姿勢に関する問題点と既存アプローチの課題について述べた。これ以降、2 章では、スマートフォン利用時の姿勢矯正とその支援システムに関連する研究を取り上げ、3 章ではスマートフォンのみを用いて首の角度を推定する手法について提案する。4 章では、本手法をシリアスゲームに応用したケーススタディについて述べる。5 章では首の角度推定の精度向上について述べ、6 章で本手法をライブラリ化しその応用可能性を検証したハッカソンについて述べる。7 章にて本研究の制約と発展の可能性について述べ、最後に 8 章で本研究のまとめを行う。

## 第2章 関連研究

### 2.1 スマートフォンの利用と姿勢に関する研究

スマートフォンの利用と首への負担に関する研究は様々行われている。Namwongsaらは、タイの学生799人に対し、スマートフォンの利用と筋骨格系障害に関するアンケート調査を行った[11]。12ヶ月の実験の結果、喫煙とスマートフォン利用時間が頸部筋骨格系障害と関係していることを明らかにした。さらに、様々な首の角度で1分30秒のテキスト入力作業を行い、首の筋活動と首の痛みを測定する実験を行った[12]。実験の結果、首の角度が大きくなるほど頸部脊柱起立筋の筋活動が増加することから、スマートフォン利用時の首の角度は $0^{\circ}$ ~ $15^{\circ}$ の間が望ましいと述べている。Kuoら[13]はスマートフォンユーザの頭部、頸部、体幹の角度を計測したところ、頭部と頸部の角度が背もたれのない座位において最も大きいことを明らかにした。また、3Dプリンタで出力したカスタムカラーを装着することで、屈曲角度が軽減されることも明らかにした。またLee[14]は、スマートフォン利用者の首の角度、可動域、筋持久力、痛みと障害の関係を調査し、スマートフォンの首を曲げた姿勢での利用時間が長いほど首の痛みが悪化し、日常生活に支障を感じる日数が増えることを明らかにした。

我々の研究は、この首を曲げた状態でのスマートフォン利用による身体への負担を軽減させるため、ユーザの首の角度を推定しフィードバックすることを目的としている。

### 2.2 姿勢矯正システムに関する研究

#### 2.2.1 着座姿勢における姿勢矯正システム

PC作業時などの着座姿勢における姿勢矯正システムについての研究は様々なものがある。Ishimatsuら[15]は、ユーザの姿勢を横からKinectを用いて撮影することで上半身の前傾姿勢を、座面に複数の圧力センサを設置することで足の交差を検知し、不良姿勢時にポップアップウィンドウを用いてフィードバックする「BITAIKA」システムを開発した。30分のPC作業を行う実験の結果、システム利用時の方が不良姿勢を取った時間が有意に短かったことを明らかにした。同様にKimら[16]はPC作業時のディスプレイ上部に

3Dカメラを取り付けることでユーザの前傾姿勢を検知するシステムを開発した。実験の結果、ポップアウトウィンドウを用いた視覚的なフィードバックがユーザの前傾姿勢防止を支援することを明らかにした。また、Parkら [17] は3Dカメラを用いてユーザを横から撮影することで姿勢を取得するシステムを開発し、実験により表面筋電位ベースのフィードバックが姿勢矯正に有効であったことを明らかにした。Piñero-Fuentesら [18] もディスプレイ上部のウェブカメラからCNNを用いてユーザの首の角度、肩の並び、腕の外転に関して、それぞれ健康的から不健康まで4段階で分類している。またChoiら [19] は、ユーザに感知されない速度で上下左右、前後傾斜に動く可動モニタを用いることでユーザの姿勢を誘導するシステムを開発した。50分の文書作成タスクを行う実験の結果、従来の固定モニタに比べて頭部前方位姿勢を取る時間が短く、疲労度も少ないことを明らかにした。

これらの研究はユーザの行動範囲が限定されている状況において有効であるが、スマートフォン利用時のようにユーザが広範囲に移動する可能性がある場合には適応が困難である。我々の研究は、より多様な場面でユーザの姿勢を推定することを目的としている。

### 2.2.2 スマートフォン利用時における首の角度推定手法

スマートフォン利用時における姿勢矯正システムについても様々研究されている。特に加速度センサを用いて首の角度をセンシングするものが多い。身体に直接加速度センサを取り付けるものでは、首裏のみに装着するもの [20] や、前頭部、頸部、背部に加速度センサを取り付けることによるワイヤレス慣性ボディネットワークを用いるもの [21]、首裏、耳、両肩に加速度センサや磁気センサやマーカなどを取り付けるもの [22] などがある。さらにウェアラブルデバイスに付加するものとしては、ケーブル部分が首のラインに沿うようになっているネックバンド型のワイヤレスイヤフォンを装着し、ケーブル部分に加速度センサを設置するもの [23] や、ウェアラブルネックレスの首裏部分に加速度センサを設置するもの [24]、導電性糸を用いて電子機器をテキスタイルに組み込む技術を用いたベスト [25]、加速度センサやジャイロ스코ープ、筋電位計を内蔵したウェアラブル頸椎カラー [26] など様々な形態のものがある。これらの研究では、首筋や首裏に直接センサを取り付けるため正確に首の角度を取得できる一方、ウェアラブルセンサを購入、装着しなければならず、導入コストが高いといえる。

一方、スマートフォンのみを用いた姿勢矯正システムについても多数研究されており、Gupta [27] は、スマートフォンの加速度センサから傾きを取得し、その値をもとにユー

ザの姿勢を判定している。また Zindahi ら [28] はスマートフォン利用時の首の角度とスマートフォンの傾きの関係を調査し、スマートフォンの pitch 角が  $15^\circ$  以上の場合に警告するシステムを開発している。これらの研究はスマートフォンの傾きのみを用いてユーザの首の角度を判定しているが、それらの角度は完全に対応しているわけではないため、実際の首の角度を推定するには不十分であるといえる。Lee ら [29] は、スマートフォンの傾きと内カメラの映像に映るユーザの顔領域の大きさ、形状、明るさ等を用いてユーザの姿勢を判定するシステムを開発した。これらの研究では、ユーザの背筋に対する首の角度と首に対する顔の角度が同一のものとして扱われており、首に負荷をかける要因を正確に推定することができていない。

我々の研究もこれらの研究と同様にスマートフォン利用時のユーザの首の角度を推定するものであるが、ユーザの顔の角度を考慮してスマートフォンのみを用いて首の角度推定を行うものである。

## 2.3 シリアスゲームを用いた研究

シリアスゲームとは、娯楽を主目的とするゲームとは異なり、社会的な目的を併せ持つゲームを指す。特に、ユーザの知識獲得や行動変容を促すことを目的としたシリアスゲームについて、これまでに様々な研究が行われている。Baños ら [30] は、子供の栄養に関する知識向上を目的としたオンラインビデオゲーム「*ETIOBE Mates*」を提案し、パンフレットなどの紙とペンによる情報提示と比較したところ、提案手法の方が有意に知識を獲得できたことを明らかにしている。Fuchslocher ら [31] は、10代の糖尿病患者の自己管理能力を向上させるために「*Balance*」というゲームを開発した。糖尿病について明示的に言及するものと、糖尿病関連の要素を含まない暗示的なものを比較したところ、明示的なものの方が楽しさや自己効力感が高かったことを示している。

姿勢矯正に対してシリアスゲームを用いてアプローチする研究も行われている。Mihajlovic ら [32] は首の運動を促すため、VR環境で蝶を捕まえるゲームを開発しユーザスタディを行った結果、真っ白な画面より現実の風景に近い環境の方がモチベーションが高く持続することを明らかにしている。Beltran-Alacreu ら [33] は、慢性的な首の痛みをもつ高齢者を対象に頭部の動きで仮想飛行機を制御するゲームを開発し、シリアスゲームがユーザにとって楽しくかつリハビリテーションに役立つと感じさせることを示している。Roig-Maim'o ら [34] は、ユーザが頭部の動きによってカーソルを操作し、絵パズルを解くスマートフォンベースのゲームを提案し、リハビリテーションや運動への参加を

促すだけでなく、ゲーム中のインタラクションデータから頸部可動域を自動推定できる可能性も示唆した。Youssef ら [35] は、リハビリ専門家とユーザ双方のニーズに基づいて FHP の改善を目的とした VR ゲームを提案した。3 人の健常成人を対象としたユーザスタディでは、必ずしも楽しいとは感じなかったものの、参加者は運動への高い没入度を示し、VR を用いた介入が従来の訓練方法よりも動機づけや魅力の面で優れている可能性を示した。Asadzadeh ら [36] も同様に FHP の改善を目的とした VR ゲームを提案している。FHP を有する 21 人の大学生を対象とした研究では、System Usability Scale(SUS)において 87.14 と高いユーザビリティスコアを達成し、Game Experience Questionnaire(GEQ)でも強い没入感と肯定的な体験が報告された。さらに、センサは正確な計測を提供し、システム全体の信頼性も高かったことから、FHP 矯正運動を正しく、かつ楽しく行うための有効な支援ツールとなることが示された。

シリアスゲームを用いた研究を体系的にメタレビューした研究も行われている。Andrew ら [37] は、青少年の健康促進を目的としたシリアスゲームを用いた論文 21 件を対象に体系的なスコープレビューを行っている。調査の結果、いくつかの論文では有効性を示している一方、適切な検証が行われていない、または効果が小さかったと述べている研究があることを明らかにしている。また、有効なシリアスゲームを設計するためにはゲームデザイン、ユーザとの関連性など様々な要因が重要であると述べている。

本研究もこれらの研究と同様にスマートフォン利用時の姿勢を改善するためにシリアスゲームを用いるが、VR ヘッドセットやウェアラブルセンサなどを必要としない、プレイするハードルが低いものを目指す。

## 2.4 ハッカソンを用いた研究

ハッカソンは創造的な共創の場として様々な場面で利用されており、研究においても広く用いられている。ハッカソンを扱った研究では、コミュニケーションや教育の場としての機能や参加者の体験にフォーカスしているものが多い [38, 39, 40] が、ハッカソンを評価に用いることにフォーカスした研究も多く存在する。加藤ら [41] はリリックアプリを容易に開発できるフレームワークを提案し、プログラミングコンテストの応募作品を通じてその有効性を評価している。Jeanette ら [42] は過去に行われたハッカソンを用いた研究を分析することにより、ハッカソンにおけるどのような要因が創造性を促進し、またその創造性はどのように評価できるかについて議論している。結果として、創造性は新規性と有用性によって評価でき、ハッカソンの規模や競争率などに影響されると述

べている。また方法論としてのハッカソンについても調査しており [43]、同様に過去のハッカソンを用いた研究をプログラム理論を適応して分析し、インプット、プロセス、成果の3つの要素のうち、インプットとプロセスにおいて特定の学習メカニズムを促進するようにデザインすべきだと述べている。

本研究もこれらの研究と同様にハッカソンを用いてシステムの有用性を評価するものであり、得られた成果物や参加者からの評価を分析することでこれを検証する。

## 第3章 スマートフォンのみを用いた首の角度推定手法

### 3.1 提案手法

#### 3.1.1 概要

スマートフォンのみを用いて首の角度を推定するため、ここではスマートフォンの傾きと内カメラから得られる映像に着目する。スマートフォン利用時の内カメラには、ユーザがスマートフォンの画面を見ているためユーザの顔やその周辺が映っていることが多く、そこから鼻や目、首元などのキーポイントが取得可能である。ここで、スマートフォンの位置が固定であるとき、首が下に傾けば傾くほどスマートフォンの内カメラの映像上でユーザの鼻から首元までの距離は短くなるという特徴がある（図3）。この鼻から首元までの距離の、正しい姿勢（以降基準姿勢）のときの値に対する割合を特徴量として利用することで首の角度が推定可能になると期待される。

#### 3.1.2 特徴量とその前処理

3.1.1項で述べた通り、首の角度推定のためユーザの鼻から首元までの距離の変化を利用するが、この値は首に対するユーザの顔の角度や、ユーザの顔とスマートフォンの位置関係、ユーザの顔とスマートフォンとの距離によっても変化すると考えられる。そこ

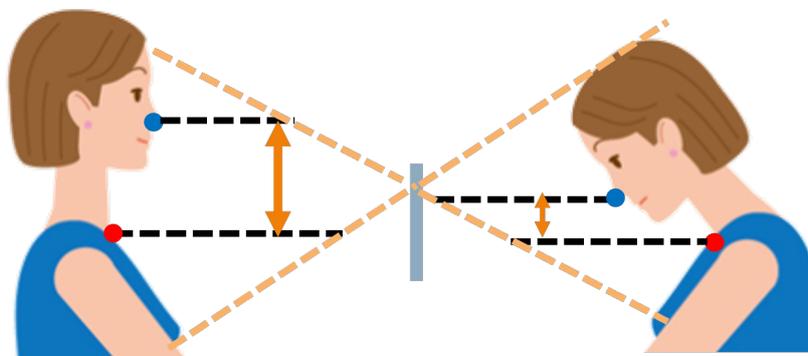


図 3: 鼻から首元までの距離の変化

で、こうした情報を特徴量化し利用することによってユーザの首の角度を推定する．具体的には、スマートフォンに対する顔の角度やスマートフォン自身の地面に対する角度、ユーザの鼻から首元までの距離と、目と目の距離を利用する．この目と目の距離を用いてユーザの鼻から首元までの距離を正規化することにより、スマートフォンとユーザの顔の距離によらず安定した値を取得可能とする．なお本研究では簡単のため、首の角度については前後方向（pitch 軸方向）に限定する．

具体的には、それぞれの値を以下のように定義する．

- $Angle_{\text{face}}$ : 現在のスマートフォンに対するユーザの顔の角度
- $Angle_{\text{phone}}$ : 現在の地面に対するスマートフォンの角度
- $Dist_{\text{eyes}}$ : 現在のユーザの目と目の距離
- $Dist_{\text{neck}}$ : 現在のユーザの鼻から首元までの距離
- $Dist_{\text{eyes}}^{\text{ref}}$ : 基準姿勢時のユーザの目と目の距離
- $Dist_{\text{neck}}^{\text{ref}}$ : 基準姿勢時のユーザの鼻から首元までの距離

ここで、スマートフォンの画面とユーザの顔の距離の変化を考慮するため、以下のよう目と目の距離を用いて正規化を行う．

$$Norm = \frac{Dist_{\text{neck}}}{Dist_{\text{eyes}}}, \quad Norm^{\text{ref}} = \frac{Dist_{\text{neck}}^{\text{ref}}}{Dist_{\text{eyes}}^{\text{ref}}}$$

これにより、最終的な特徴量は以下の3つとする．

$$F = \left\{ Angle_{\text{face}}, Angle_{\text{phone}}, \frac{Norm}{Norm^{\text{ref}}} \right\}$$

### 3.1.3 利用環境

本手法ではスマートフォンの内カメラを用いるため、推定を行うためにいくつかの制約がある．まず、内カメラの画角内にユーザの首元から目が映っている必要がある．多くの場合でこの条件を満たすと考えられる一方で、スマートフォンを持つ位置や角度、また顔との距離によっては十分な情報が得られずに推定が行えない可能性がある、また、画像特徴からユーザの顔や骨格の情報を解析するため、極端に暗い環境では推定が困難となる可能性がある．そのため、本手法を用いて首の角度を推定する際にはこれらの点に留意する必要がある．

## 3.2 データセット構築

### 3.2.1 既存研究におけるデータセット構築手法

既存研究 [44] では首の角度の正解データは、壁に貼り付けられた角度に沿って頭を倒すという形式で実現されていた。この方法では、首の角度と首に対する顔の角度を分離できておらず、実際の首の角度を計測するうえで適切であるとはいえない。また、主観に基づくものであり、データの客観性に問題があった。

Oyeleke ら [45] は良い姿勢（首や頭を曲げない姿勢）と悪い姿勢（頭部を前や横に傾けた姿勢）について画像を収集し、CNN を用いて二値分類を行っている。また Lee ら [14] も、スマートフォンのみを用いて首の角度を推定しており、立位と座位それぞれにおける頭部を持ち上げた姿勢、頭部を倒した姿勢の合計 4 種類の姿勢についてのデータセットを構築している。これらの研究は、良い姿勢と悪い姿勢における明確な基準が存在していない。また、良い姿勢と悪い姿勢の 2 段階のデータセットしかないため、実際にユーザがスマートフォンを利用する際の連続的な姿勢についての検証ができていないという問題がある。

### 3.2.2 本研究でのデータセット構築手法

3.2.1 項で述べた通り、これまでの研究で実現されていたデータセットは、様々な姿勢を取るユーザのスマートフォンの実利用に相当するものではなかった。実利用を考慮すると、首の角度やスマートフォンの角度だけでなく、首に対する顔の角度やスマートフォンと顔の位置関係なども考慮する必要がある。ここで、そのすべての変数の取り得る範囲について、ひとつひとつの値を固定してデータ取得を繰り返すことは工程数も多く現実的ではない。そこで本研究では、ユーザの首の角度を計測する外部のカメラを用いつつ、首や顔の角度とスマートフォンをそれぞれ動かしながらその内カメラとセンサの情報を記録することで、データ数を維持したうえで工程数の削減を実現する。また、外部のカメラから得られるデータとスマートフォンから得られるデータを時間的に同期させることにより、同一姿勢に対するデータを取得する。

### 3.2.3 正解データと基準姿勢

首の角度の定義は大きく 2 つある。一つは、首裏にある C7 と呼ばれる頸椎の上から 7 番目の骨が隆起している点と、トラガスと呼ばれる顔側の耳孔の前にある三角に出っ張っ

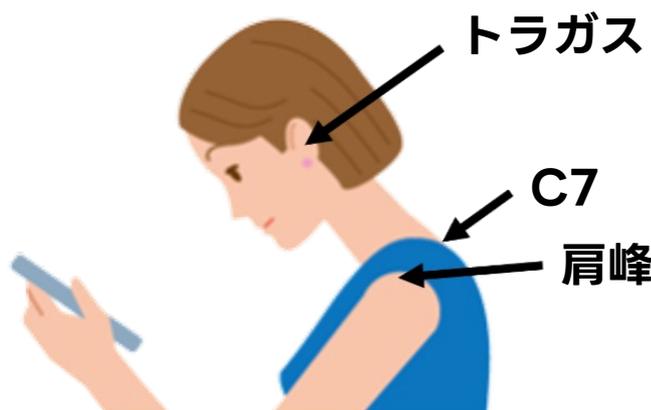


図 4: 各ランドマークの位置

た軟骨部分の点を結んだ直線の傾きとするものである。もう一つは、肩峰と呼ばれる鎖骨と上腕骨の繋ぎ目部分の点とトラガスを結んだ直線の傾きとするものである。C7、トラガス、肩峰の位置をそれぞれ図 4 に示す。どちらも首の角度に関する姿勢矯正の文脈で用いられる手法であるが、前者の場合、肩より下がまっすぐなとき最も首に負担がかからない姿勢でも  $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$  程度傾いていることになる。またその傾きは個人によって異なると考えられる。そこで本研究では、ユーザが目指すべき値を理解しやすくするため、肩峰とトラガスを結んだ直線との傾きを首の角度とした。ここで、Ankrum ら [46] は基準姿勢を「直立し、目の高さにある視覚目標を見るとき頭の首の姿勢」と定義し、その特徴の一つとして肩と耳が一直線に並んでいることをあげている。これは先程定義した「首の角度」が  $0^{\circ}$  である時の姿勢と一致するため、本研究においても基準姿勢を Ankrum らと同様に定義する。具体的には、「肩峰とトラガスが地面に対して垂直に並んだ姿勢」を基準姿勢と定義する。また、この基準姿勢時におけるデータを取得するため、壁に背中と後頭部を付けた際のデータを取得した。

#### 3.2.4 データセット構築のための動作デザイン

本研究では、参加者にスマートフォンを手に持ち様々な姿勢をとってもらいながらそれを横から撮影することで、前節まで述べた特徴量と正解データを収集する。ここで、3.1.2 項で述べたユーザの鼻から首元までの距離に影響を与えられられる 3 つの要因（首に対するユーザの顔の角度、ユーザの顔とスマートフォンとの位置関係、ユーザの顔とスマートフォンの距離）と正解データがいずれも連続的であるため、すべての組み合わせについてバランス良くデータを取るには、ユーザに自由に動いてもらうのではなく

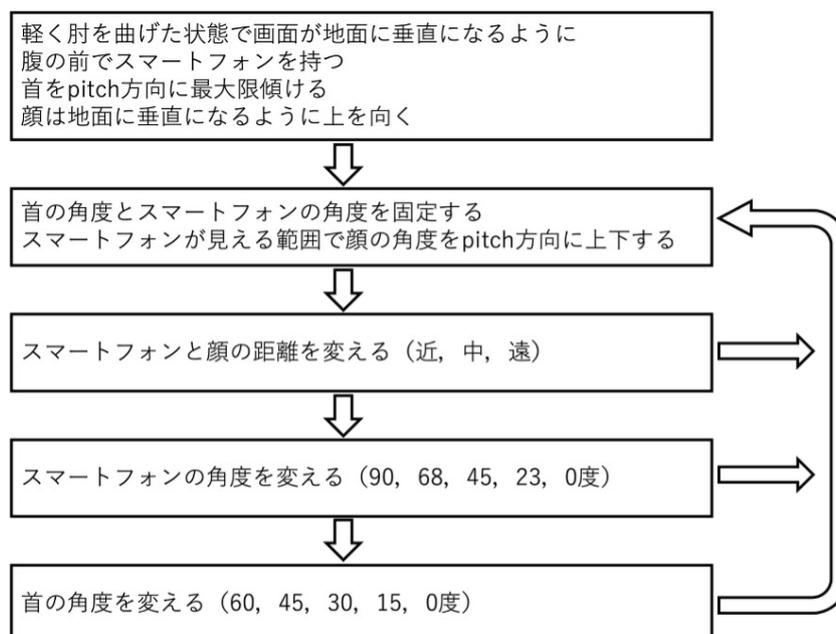


図 5: データセット構築における動作デザイン

ある程度動きを統制する必要がある。そのため、本研究では図 5 に示すように参加者に対して動きのデザインを行った。この図中の動きを 1 セットとし、休憩を挟みつつ合計 5 セット行ってもらった。1 セットあたりの所要時間は 7 分で、トータルで約 60 分であった。参加者には、タブレットを用いて自身の首の角度をリアルタイムに視覚フィードバックし、首の角度を維持すべきときは厳密に意識しすぎる必要はないが、およそ角度を維持するように教示した。なお、スマートフォンがユーザの目の高さ以上の位置にある場合は、首への負担が少ないことから本研究では対象外とした。

### 3.2.5 データセット構築システム

データセットを構築するため、特徴量と正解データを収集するシステムを開発した。システムは特徴量を得るためのスマートフォンを用いた部分と、正解データを得るための外部カメラを用いた部分で構成される。

まず、スマートフォンを用いて 3 つの特徴量を以下のように取得した。

1. 制約の無い end-to-end の頭部姿勢推定手法 [47] を用いて、スマートフォンの内カメラから得られた画像における顔の角度を推定した。なお、推定のスコアが 0.9 未満のものは推定ミスとしてデータから除外した。
2. JavaScript を用いてスマートフォンの方向センサの値を取得した。

3. 姿勢推定フレームワークである OpenPose [48] の学習済みモデルを用いた pytorch-openpose を用いて、スマートフォンの内カメラから得られた画像からユーザの骨格情報を推定し、取得した座標情報から特徴量を算出した。なお、1と同様に両目、鼻のキーポイントの推定スコアが0.7未満のものはデータから除外した。また、首元のキーポイントは推定スコアがある程度低くてもおよそ正確な位置を示していることが多いと判断したため、推定スコアが0.2未満のものを除外対象とした。

これらの特徴量は30fpsで取得した。

次に、外部カメラによる首の角度の取得について、事前に高速に動作する姿勢推定フレームワークである MediaPipe [49] を用いて検証を行ったところ、肩の検出位置が不安定であり、首の角度の計測精度に問題があった。そこで、正解データを取得するため実験参加者の肩峰とトラガスの位置にARマーカを貼り付けた。外部カメラを用いてそれらの座標を検出し、結んだ直線の傾きを求めることで首の角度を算出した。なお、外部カメラのフレームレートは15fps程であった。

ここで、スマートフォンの内カメラと正解データを取得するための外部カメラではフレームレートが異なるため、タイムスタンプの差が40ミリ秒以内のものを同一姿勢に対するデータとして対応付けた。タイムスタンプの差が40ミリ秒以内のデータが複数ある場合には、より時間差が少ない方のデータを採用した。

### 3.2.6 データセット構築環境

データセット構築は十分な明るさの室内で行い、ブラインドを閉めることで昼夜による室内の明るさの変化が小さくなるようにした。また、遮蔽物を置きスマートフォンの内カメラや外部カメラに参加者以外の人映り込まないようにした。データセット構築に使用するスマートフォンはApple iPhone11を、外部カメラにはV4K USB 書画カメラIPEVOを用いた。このとき、外部カメラが地面に対して水平になるようにした。データセット構築の様子を図6に示す。参加者は大学生、大学院生の5人(男性4人、女性1人)であった。また、参加者が巻き肩であると正解データに誤差が生じてしまうため、巻き肩の人は対象外とした。さらに巻き肩でない参加者に対しても、データ取得中は肩が内側に入らないように注意するよう教示した。



図 6: データセット構築の様子

### 3.3 機械学習による推定

#### 3.3.1 推定方法

スマートフォン利用時のユーザの首の角度を推定するため、得られた特徴量と正解データをもとに回帰モデルを用いて精度検証を行う。回帰問題を解く学習モデルはいくつか考えられるが、本手法はセンサ値や画像解析からの推定値を用いるためノイズが含まれること、特徴量同士の関係が非線形であることから、決定木アルゴリズムを用いた学習モデルが適していると考えた。そこでまずはランダムフォレストを用いて推定精度を検証した。参加者1人につき5セット分のデータを取得したため、5セットのうち4セットを学習データ、1セットをテストデータとする5分割交差検証を行った。機械学習には、Pythonのライブラリである `scikit-learn`<sup>1</sup>を用いた。なお、スケールが異なる特徴量を扱うため、事前にデータの標準化を行った。データは1人あたり約15,000件、合計84,374件のデータを収集した。

#### 3.3.2 推定結果

全参加者について5分割交差検証を行った結果、平均  $R^2$  (決定係数) が0.61、平均  $MAE$  (平均絶対誤差) が8.68、平均  $RMSE$  (二乗平均平方根誤差) が11.64であった。また正解データが  $0^\circ \sim 60^\circ$  までを  $10^\circ$  間隔で7段階に分け、それぞれの角度のデータについて推定分類確率を求めた結果を表1に示す。表から、 $0^\circ$  以外の角度においては約40%の確率

<sup>1</sup><https://scikit-learn.org/stable/>

で正しく分類できていることがわかる。また、正しく分類できていない場合でもその付近の角度を推定することがわかった。一方、 $0^\circ$ のデータについては $10^\circ$ と推定してしまうことが最も多いこともわかる。

次に参加者ごとに5分割交差検証を行ったところ、平均  $R^2$  の平均が0.60、平均  $RMSE$  の平均が11.47、平均  $MAE$  の平均が8.42であった。また、参加者ごとに学習させた場合の分類確率の平均を表2に示す。表から、 $0^\circ$ 以外の角度において正解の角度と推定する確率が最も高かった。また全参加者のデータを学習した場合と同様に、不正解の場合でもその近辺の角度と推定していることがわかる。ここで、参加者ごとに学習させた場合、精度に個人差があった。分類確率の精度が全体的に高かった参加者の例と低かった参加者の例を表3、表4に示す。表から、多くの角度において15%程度の差があることがわかる。一方、正解データが $0^\circ$ の分類確率においては全体的に精度が低かった参加者の方が高精度であった。

表 1: ランダムフォレストを用いた分類確率 (全員分のデータを学習)

		推定値 [°]						
		0	10	20	30	40	50	60
正解データ [°]	0	0.16	0.59	0.17	0.05	0.02	0.01	0.00
	10	0.05	0.48	0.32	0.10	0.04	0.02	0.00
	20	0.02	0.24	0.43	0.18	0.10	0.03	0.00
	30	0.01	0.07	0.21	0.30	0.33	0.09	0.01
	40	0.00	0.04	0.11	0.18	0.36	0.28	0.04
	50	0.00	0.02	0.06	0.08	0.27	0.39	0.19
	60	0.00	0.00	0.02	0.04	0.12	0.38	0.43

表 2: ランダムフォレストを用いた分類確率 (個人ごとに学習した平均)

		推定値 [°]						
		0	10	20	30	40	50	60
正解データ [°]	0	0.36	0.41	0.16	0.03	0.02	0.01	0.00
	10	0.15	0.41	0.29	0.08	0.04	0.02	0.00
	20	0.07	0.24	0.40	0.16	0.09	0.04	0.01
	30	0.01	0.07	0.18	0.38	0.24	0.09	0.02
	40	0.00	0.03	0.08	0.19	0.35	0.27	0.08
	50	0.00	0.01	0.04	0.09	0.23	0.39	0.23
	60	0.00	0.00	0.01	0.03	0.10	0.32	0.53

表 3: ランダムフォレストを用いた分類確率 (最も精度が高かった参加者)

		推定値 [°]						
		0	10	20	30	40	50	60
正解データ [°]	0	0.23	0.59	0.17	0.01	0.00	0.00	0.00
	10	0.09	0.55	0.31	0.04	0.01	0.00	0.00
	20	0.04	0.24	0.51	0.14	0.05	0.01	0.00
	30	0.00	0.03	0.12	0.59	0.19	0.06	0.01
	40	0.00	0.01	0.05	0.18	0.36	0.36	0.04
	50	0.00	0.00	0.01	0.07	0.18	0.52	0.22
	60	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.35	0.63

表 4: ランダムフォレストを用いた分類確率 (最も精度が低かった参加者)

		推定値 [°]						
		0	10	20	30	40	50	60
正解データ [°]	0	0.47	0.30	0.13	0.06	0.02	0.01	0.00
	10	0.18	0.34	0.25	0.12	0.06	0.04	0.00
	20	0.09	0.22	0.20	0.23	0.15	0.09	0.01
	30	0.02	0.10	0.22	0.30	0.21	0.14	0.02
	40	0.01	0.05	0.11	0.18	0.30	0.26	0.09
	50	0.00	0.03	0.07	0.12	0.21	0.34	0.23
	60	0.00	0.01	0.03	0.04	0.15	0.40	0.36

## 3.4 考察

### 3.4.1 推定精度

参加者全体、個人ごとともに  $R^2$  が 0.6 程度であることから、全体として本手法が一定の精度で首の角度を予測できていることがわかる。しかし、 $RMSE$  や  $MAE$  の値から、平均で約  $8.5^\circ$  の誤差があることがわかる。これは推定値が  $0^\circ \sim 60^\circ$  の範囲であることを考えると小さくなく、精度には改善の余地があるといえる。

分類確率の結果より、参加者全体、個人ごとともに多くの首の角度において正解の角度と推定している確率が最も高く、不正解の場合でもその近辺の角度と推定していることから、ある程度高精度に分類できていることがわかる。ここで、正解データが  $0^\circ$  と  $60^\circ$  のものについては、 $0^\circ$  より小さく推定した場合、 $60^\circ$  より大きく推定した場合にも正解と分類されることから、他の角度より正解確率が高いことが予想される。しかし、結果としては  $60^\circ$  のデータについては同程度であり、 $0^\circ$  のデータについては逆に精度が低く  $10^\circ$  と推定することが多かった。これは、その角度を維持することが難しかったために参加者の肩の位置が移動してしまったことが影響していると考えられる。ここで、本研究では 3.2.6 項で述べた通り、肩の位置が移動してしまうと正解データの値が実際のものとは異なってしまうため、データセット構築の際に参加者には肩が内側に入らないよう教示した。しかし、逆に肩を外側に開くことについての教示は行っていなかった。 $0^\circ$  や  $60^\circ$  など極端な首の角度を保つことが難しい場合、肩を外側に開いたり内側に閉じたりしてしまうことがある。そのため、実際の首の角度が  $0^\circ$  や  $60^\circ$  で特徴量がそれにともなった値であったとしても、正解データが異なったものとなってしまう可能性が考えられる。

また、データセット構築の参加者が 5 人と少数であり、またその性別や年代にも偏りがあることから、作成した推定モデルの一般化の可能性については検証できていない。個人ごとに学習した場合に精度に差がみられたが、首の傾きと特徴量の変化率が異なり個人に対して最適なモデルが構築できなかった、基準姿勢の取得に誤差があったなどの要因が考えられるが、原因は明らかでない。

### 3.4.2 特徴量による影響

推定精度が下がった要因として、特徴量が不適切であった可能性がある。まず本研究ではスマートフォンの角度とユーザの顔の角度について、pitch 軸のみの角度に着目し、roll, yaw 軸の角度については考慮しなかった。しかし、実際にはそれぞれに傾きがあっ



図 7: Pytorch-OpenPose の骨格推定の例 (左: 正常, 右: 不正確)

たことから、ユーザの鼻から首元までの距離や目と目の距離に影響を与えたことが考えられる。そのため、pitch 軸のみだけでなく roll, yaw 軸の角度も考慮することにより、精度向上につながると考えられる。また、基準姿勢を取得する際、参加者に背中と頭を壁に付け、スマートフォンを顔の前に持ってもらうことで首の角度が $0^\circ$ かつスマートフォンや顔の傾きによる影響を排除しようと考えていた。しかし、スマートフォンや参加者の顔の傾きを完全に排除することはできなかった。そのため、基準姿勢における鼻から首元までの距離や目と目の距離に誤差が生じ、精度に影響を与えた可能性が考えられる。なお、壁に背を付けて良い姿勢をすることは簡単ではないため、そうしたことが影響した可能性も否めない。

一方、今回 pytorch-openpose を用いて骨格推定を行っているが、その精度が十分でなかったために首の角度推定の精度が出ていない可能性も考えられる。実際に pytorch-openpose を用いて同じ首の角度について骨格推定を行った例を図 7 に示す。図の左はスマートフォンの角度が $90^\circ$  付近 (地面に垂直) のもので、右はスマートフォンの角度が $0^\circ$  付近 (地面に水平) のものである。図から、スマートフォンが $90^\circ$  付近の場合は正しく推定できているのに対し、スマートフォンの角度が $0^\circ$  付近の際に、推定すべきである首元よりも下の胸元付近を推定していることがわかる。このように骨格推定の精度が不安定であったことが、推定精度に影響していると考えられる。

### 3.4.3 エクストラツリーを用いた検証

3.4.1 項, 3.4.2 項から得られた考察より、構築したデータセットの特徴量や正解データの精度に不十分な点がみられた。そのため、機械学習を行ううえでノイズや外れ値とな

表 5: エクストラツリーを用いた分類確率 (全員分のデータを学習)

		推定値 [°]						
		0	10	20	30	40	50	60
正解データ [°]	0	0.03	0.72	0.23	0.02	0.00	0.00	0.00
	10	0.00	0.46	0.42	0.11	0.02	0.00	0.00
	20	0.00	0.19	0.49	0.23	0.08	0.01	0.00
	30	0.00	0.05	0.21	0.35	0.34	0.06	0.00
	40	0.00	0.02	0.10	0.20	0.41	0.25	0.01
	50	0.00	0.01	0.05	0.08	0.29	0.43	0.13
	60	0.00	0.00	0.01	0.03	0.13	0.47	0.35

表 6: エクストラツリーを用いた分類確率 (個人ごとに学習した平均)

		推定値 [°]						
		0	10	20	30	40	50	60
正解データ [°]	0	0.12	0.70	0.14	0.03	0.01	0.00	0.00
	10	0.04	0.53	0.32	0.09	0.02	0.00	0.00
	20	0.01	0.25	0.46	0.20	0.08	0.01	0.00
	30	0.00	0.04	0.19	0.39	0.33	0.05	0.00
	40	0.00	0.01	0.07	0.18	0.46	0.26	0.02
	50	0.00	0.00	0.03	0.07	0.28	0.49	0.12
	60	0.00	0.00	0.01	0.02	0.10	0.42	0.45

るデータが多く、精度が下がってしまったことが考えられる。そこで、ランダムフォレストと同様に決定木を用いた学習モデルであり、ランダムフォレストより入力データのノイズや正解データの外れ値に対してロバストであるエクストラツリーを用いることで精度が改善すると考えた。

エクストラツリーを用いて同様の推定を行った結果、全参加者のデータを学習した際、平均  $R^2$  が 0.70、平均  $RMSE$  が 10.17、平均  $MAE$  が 7.88 であり、ランダムフォレストを用いたものよりわずかに精度が向上していることがわかる。分類確率については、表 5 に示すように、全体的にランダムフォレストを用いたものと同様の傾向が得られた。一方、 $0^\circ$ 、 $60^\circ$  のデータに対する正解率は低下したものの、それ以外の角度に対する正解率はわずかに向上していることがわかる。これは、エクストラツリーの外れ値に強いという特性から、中程度の値に対しては比較的正確な一方で極端な値を予測しにくいためと考えられる。また参加者ごとに学習した場合は平均  $R^2$  の平均が 0.75、平均  $RMSE$  の平均が 9.03、平均  $MAE$  の平均が 6.92 であった。平均の分類確率 (表 6) については、全参加者のデータを学習した場合と同様の傾向が得られていることがわかる。

#### 3.4.4 モデルの比較と議論

このように、ランダムフォレストに比べエクストラツリーを用いることで極端な角度の推定精度は下がる一方、全体的な精度は僅かに向上することがわかった。しかし、実利用を想定すると十分に高い精度とはいえない結果となった。実際にアプリケーションに応用する際には、ある程度の誤差を許容する設計にする、時間的に連続している推定結果を平滑化するなどの工夫が必要であると考えられる。また、エクストラツリーでは全体的な精度が高い一方で最も良い姿勢と最も悪い姿勢の推定精度が低いことから、一概にどちらのモデルが優れているとはいえず、使用用途やアプリケーションに応じてより適したモデルを選択する必要がある。例えば、平均  $R^2$  が約 0.7、 $MAE$  が約  $7^\circ \sim 8^\circ$  であることから、臨床診断やリハビリテーションのモニタリングのようなわずかな誤差が大きな影響を与えるようなアプリケーションには十分でないといえる。一方で、一定以上姿勢が悪い状態が続いた場合にユーザに通知するシステムや1日のおよその姿勢を記録するアプリケーション、ゲーミフィケーションによりユーザの姿勢矯正意識を促進するアプリケーションなど、およその首の角度が推定できれば十分なものに対しては実用に耐え得ると考えられる。

## 第4章 上を向いてタップしよう：シリアスゲームを用いた応用

3章より、高精度とはいえないもののスマートフォンのみを用いてユーザの首の角度を一定の精度で推定可能であることが明らかとなった。

そこで本章では、1つのケーススタディとして本手法を用いて実際にユーザの姿勢をリアルタイムに推定しフィードバックを行うことで、姿勢矯正の促進可能性について検証する。ユーザへのリアルタイムフィードバックの手法は様々考えられるが、本章では楽しみながら行えることでモチベーションを保ちやすいシリアスゲームに着目した。シリアスゲームとは、娯楽のみでなく、教育や医療、ビジネスなど社会的に効果のある目的を持ったゲームのことであり、ヘルスケアやフィットネスに対してシリアスゲームのアプローチが有用であることが様々な研究により示されている [50] [51]。そのため、姿勢が良いとスコアが上がりやすく、逆に姿勢が悪いとスコアが上がりにくくなるようなシリアスゲーム (図 8) をデザイン、実装することで、ユーザの姿勢矯正を促進できることが期待される。本章では、このようなゲームを開発し、首の角度のリアルタイムフィードバックの効果について実験により検証する。

### 4.1 姿勢矯正用シリアスゲーム

#### 4.1.1 姿勢に応じたフィードバックの設計

ユーザの姿勢矯正を促進することを目的としたゲームを開発するため、姿勢が良いとゲームにポジティブな影響を、悪いとネガティブな影響を及ぼすようにフィードバックを与える。ゲームにポジティブな影響を与える要素はスコアの補正や報酬音など様々考えられるが、本研究ではゲームプレイ中に姿勢矯正を促進したい、日常的に使う際に周囲の人への影響を小さくしたいなどの理由から、ゲームプレイ中に視覚的にフィードバックを与えることを考える。ここでは、画面やコンポーネントの色やコントラストに着目し、姿勢が良い場合にはコントラストを高く、逆に姿勢が悪い場合には低くすることにより、コンポーネントの識別容易性を制御する。このようにすることで、ユーザはゲームプレ

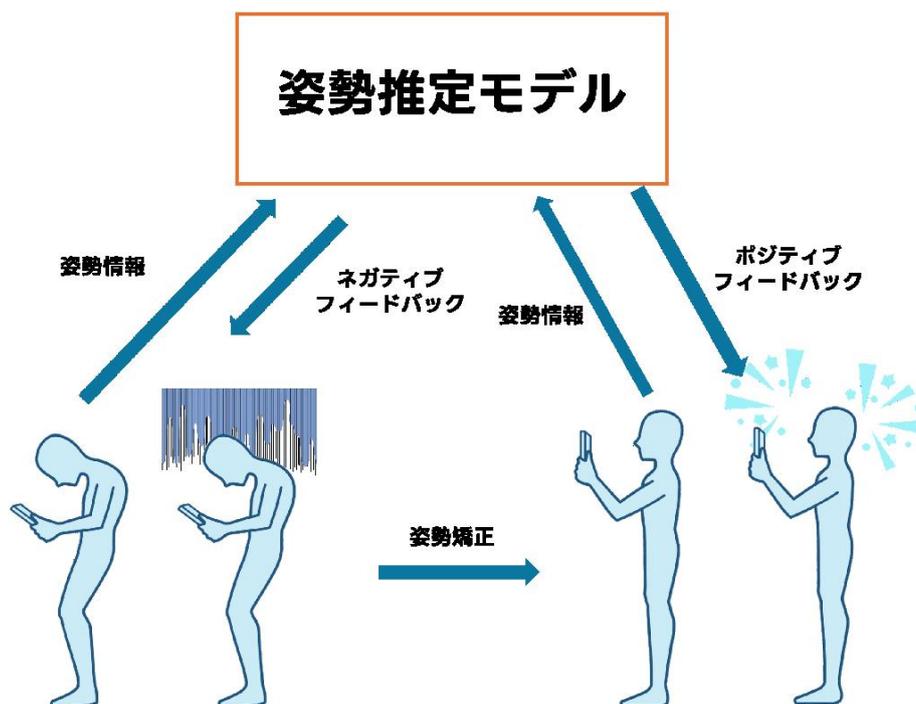


図 8: 姿勢に応じたフィードバックのイメージ

イ中に操作しやすくするために自然と姿勢を正しくすることが期待される。また、一定以上姿勢が正しい場合にさらにユーザーのアドバンテージになるようなフィードバックを行うことで、ユーザーがその閾値の範囲内に姿勢を維持しようとするのが期待される。

ここで、ユーザーがスマートフォンを操作する際に画面と顔の距離が近く、ユーザーの目から首元が内カメラに映らずに姿勢が推定できないままプレイしてしまうことが想定される。そのため、一定時間姿勢が推定できなかった場合はゲームを続けることができないようにすることで、極端に悪い姿勢でプレイし続けることを避けることができると考えられる。

#### 4.1.2 ゲームデザイン

4.1.1 項で設定したフィードバックの効果を高めるため、複数のコンポーネントの中から特定のものを探索するようなタスクが適していると考えられる。そこで本研究では、ランダムに配置された数字を素早く順番に押していく「数字早押しゲーム」を採用することとした。数字早押しゲームは探索力や集中力を必要とし、文章の速読やスポーツにも効果があると言われている [52]。

この数字早押しゲームにおける数字が書かれたボタンを色やコントラスト変化の対象と

することで、複数あるボタンから特定の番号のものを探索する難易度を制御可能と考えられる。また、一定以上姿勢が良い場合に次に押すべきボタンをハイライトすることで、ボタンの探索が容易になりユーザがその範囲に収まるように姿勢を制御することが期待される。なお、ゲームバランスの調整のため、正しい順番でボタンを押せた場合はその後ボタンの色を変化させることで識別しやすくし、間違った番号のボタンを押した場合はペナルティとして 2 秒間次のボタンを押せなくすることで不用意な乱打行為を防ぐ。

#### 4.1.3 キャリブレーション

ユーザの首の角度を正確に推定するためには、ユーザの最も良い姿勢を基準姿勢として取得する必要がある。そのため、ゲーム開始前に姿勢練習画面 (図 9) で姿勢を正してもらいながら、一定の基準を満たしたタイミングのものを基準姿勢として記録した。ここでの基準とは、基準姿勢を取得する際にスマートフォンの角度やユーザの顔の角度などの特徴量が首の角度推定に大きく影響を与えてしまうことから、そのような要因によるブレを小さくするために設けた。具体的には、3 章で扱っている特徴量を用いて以下のような条件を設定した。

1. スマートフォンの 3 軸ジャイロセンサの値 ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) が地面に対して垂直に近いかつユーザに対して正対している
  - $-3 < ((\alpha + 180) \bmod 360) - 180 < 3$
  - $-3 < \beta - 90 < 3$
  - $-3 < \gamma < 3$
2. スマートフォンに対するユーザの顔の角度 ( $\text{pitch}$ ,  $\text{roll}$ ,  $\text{yaw}$ ) が全て  $\pm 3^\circ$  未満である
3. ユーザの目から首元までが正常に骨格推定可能である

#### 4.1.4 システム構成

本章でこれまで述べてきたようなゲームを実現するため、本研究ではブラウザで動作する Web アプリケーションとして実装した。システム構成は図 10 に示すように大きく 3 つのコンポーネントからなる。まずはユーザが実際に操作するフロントエンド、ユーザ情報やゲームのスコア情報をやり取りするゲーム API、そしてユーザの画像とセンサ情報から首の角度を推定する姿勢 API である。ゲーム API では単純な DB と連携した REST



図 9: 姿勢練習画面

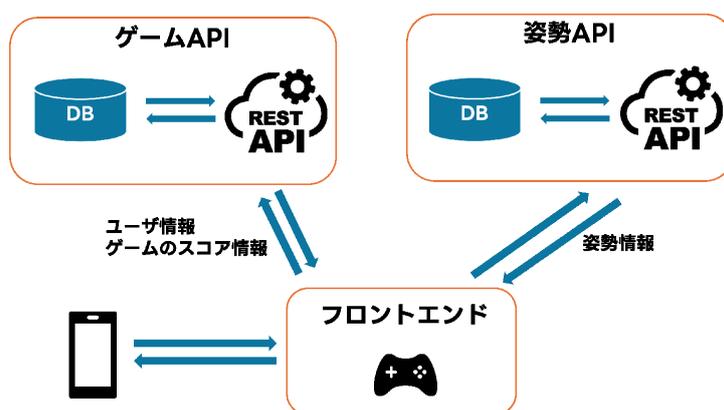


図 10: システム構成

APIとしての処理，姿勢APIではGPUを用いて画像処理や機械学習など計算量が多く重い処理を行っている。

ここで，3章で得られた考察より，ランダムフォレストよりもエクストラツリーの方が $R^2$ ， $RMSE$ ， $MAE$ の全ての指標において僅かに精度が高かったため，本システムではエクストラツリーを用いて学習したモデルを用いた。

## 4.2 実験

### 4.2.1 実験概要

ユーザの姿勢に応じてゲームの難易度を操作するフィードバックがゲーム中の意識や体験に与える影響を明らかにするため、以下の2つの仮説を立て実験を行った。

- 仮説1: ユーザの姿勢が良いとゲームがやりやすく、姿勢が悪いとゲームがやりにくくなるようなフィードバックを与えることで、ユーザの姿勢矯正意識が増加する
- 仮説2: ユーザの姿勢の良さに連動したゲームの難易度の調整により、そのインタラクティブ性やプレイ中の姿勢を入力とする新しさからゲームの楽しさが増加する

実験はユーザの首の角度に連動したフィードバックを行う条件と行わない条件の2条件を用意し、それぞれのプレイ終了後にゲームの楽しさや姿勢への意識についての主観評価を行うことで比較する。ここで、首の角度に連動したフィードバックを行わない条件でも姿勢データを取得するため、フィードバックを行う場合と同様にユーザの姿勢が推定できない場合はボタンを押せないようにした。姿勢推定に失敗する場合は顔認識に失敗するケースが多いため、姿勢推定の失敗のみをフィードバックする条件を顔認識FB条件、それに加え首の角度に連動したフィードバックを行う条件を顔+姿勢認識FB条件とする。なお、顔認識に成功していてもユーザの首元が映っていない場合や確信度が低い場合は、顔認識失敗時と同様に姿勢推定失敗として扱った。

実験参加者ごとに普段のゲームへの慣れや姿勢への意識などが異なることが予想されたため、実験者内計画を採用した。データポイントを複数取得するため、顔認識FB条件をプレイした後に顔+姿勢認識FB条件をプレイし、その後主観評価を行う一連の流れを1セットとし、それを5セット行うこととした。ここで、ゲームやフィードバックに慣れておらず評価が特異であることが予想されるため、事前練習として主観評価は行わず顔認識FB、顔+姿勢認識FB条件を交互に2回ずつプレイしてもらうこととした。実験参加者は大学生、大学院生10人で、全て男性であった。

### 4.2.2 実験手順

実験の流れを図11に示す。実験参加者にはまず実験の流れを説明した後、4.1.3項で述べたキャリブレーションを行ってもらった。参加者の基準姿勢を取得した後、図9における画面中央の「キャリブレーション中」と表示されている場所に推定された首の角度

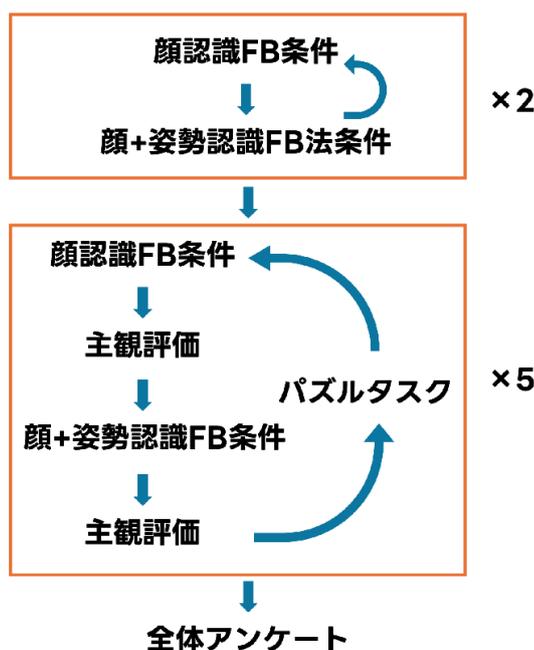


図 11: 実験の流れ

を表示し、どのような姿勢で首が何度と推定されるか把握してもらった。その後、事前練習として顔認識FB条件、顔+姿勢認識FB条件の順にゲームをプレイするという流れを2回繰り返してもらった。そして本実験として、顔認識FB条件をプレイ後主観評価を行い、その後顔+姿勢認識FB条件をプレイ後主観評価を行うという手順を5セット行ってもらった。顔+姿勢認識FB条件での姿勢が良い場合、中程度の場合、悪い場合の画面、顔認識FB条件の画面、姿勢推定失敗時の画面を図12に示す。なお、ボタンの背景色とテキスト色のコントラストは図12(a)のものから図12(c)のものまで、 $10^\circ$ ごとに6段階で変化する。そのため、首の角度が $10^\circ$ 以下と推定された場合は常に図12(a)の、 $60^\circ$ 以上と推定された場合は常に図12(c)のコントラストが適用される、また、図12(a)のように次に押すべきボタンがハイライトされる条件は、首の角度が $15^\circ$ 以内とした。

ここで、ゲームプレイ中は立った状態で手にスマートフォンを持って行ってもらった。また、各セット間では前後効果を考慮するため、ピースを並び替え枠内に納めるブロックパズルに取り組むパズルタスクを3分間座って行ってもらった。全てのセットが終了したのち、全体についてのアンケートに回答してもらい、実験を終了した。実験は全体でおよそ45分を要した。なお、実験環境においてフロントエンドでユーザの顔画像を取得してから首の角度の推定結果が得られるまでのレイテンシはおよそ0.5~1.0秒程度であった。



図 12: ゲーム中の画面

## 4.3 結果

各セットごとにゲーム中の姿勢への意識とゲームの楽しさについて、5段階のリッカート尺度で評価してもらった結果を実験条件ごとに示したものを図13、図14に示す。姿勢についての意識は顔+姿勢認識FB条件の方が高い一方、ゲームの楽しさはほとんど差がないことがわかる。各セットにおける顔認識FB条件での評価と顔+姿勢認識FB条件での評価をペアとして、対応のあるt検定 ( $n = 5$ セット  $\times$  10人) を行ったところ、姿勢についての意識は顔+姿勢認識FB条件の方が有意に高いことが示された ( $p < .001$ )。

また、ユーザの姿勢がどのように推定されていたかを調べるため、各セットごとの首の角度の推定結果について分析を行う。各セットでの全体的なユーザの姿勢の違いを評価するため、極端に姿勢の良いまたは悪いデータを除いた平均を比較する。ここでは、角度ごとのヒストグラムを作成したところ外れ値となるようなデータが存在したため、上下10%のデータを除き中央80%のデータを採用することでそのようなデータを除外した。図15は、実験条件ごとに中央80%の首の角度の平均を箱ひげ図で示したものである。同様に対応のあるt検定を行ったところ、顔+姿勢認識FB条件の方が有意に姿勢が良いと推定されていることがわかった ( $p < .001$ )。また、顔+姿勢認識FB条件では首の角度が15°以下と推定された場合に次に押すべきボタンのテキスト色を変化させることで、ユーザが首の角度を15°以内に維持しようとするのが期待された。そこで、各セットにおいて首の角度が15°以内と推定された割合を実験条件ごとに比較した結果を図16に示す。対応のあるt検定を行った結果、顔+姿勢認識FB条件の方が有意に首の角度が15°以内であると推定された割合が高いことがわかった ( $p < .001$ )。

また、全体に関するアンケートの結果から、首の角度に連動したフィードバックは新しく魅力的である一方、ゲームに疲労感を感じる参加者が多かった。姿勢に関するフィードバックは、多くの参加者が背景色の変化よりテキスト色がハイライトされるものの方が効果的だと回答している一方、「次に押すべきボタンがハイライトされることによりポップアウトするため、ゲームが簡単になりすぎて面白さが減る」といった意見も得られた。

## 4.4 考察

### 4.4.1 姿勢への意識

4.3節で得られた結果より、ユーザの首の角度に連動したフィードバックはユーザの姿勢矯正への意識を高めることが明らかになり、仮説1が支持される結果となった。これ

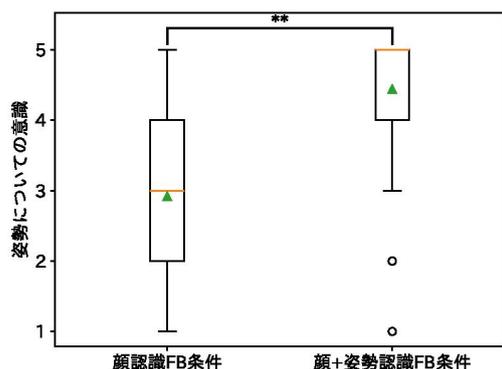


図 13: ゲーム中の姿勢への意識

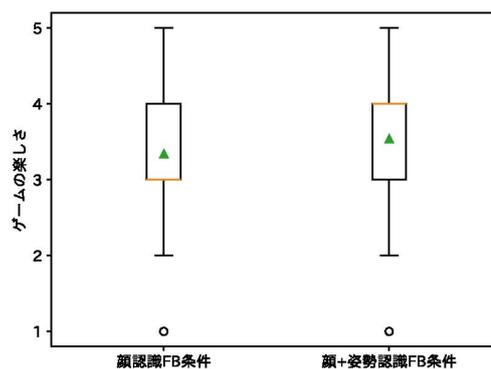


図 14: ゲーム中の楽しさ

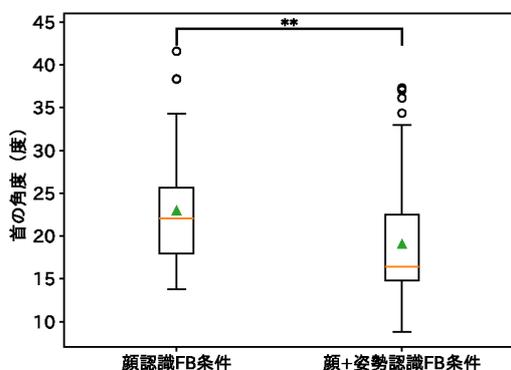


図 15: 首の角度の平均 (中央 80%)

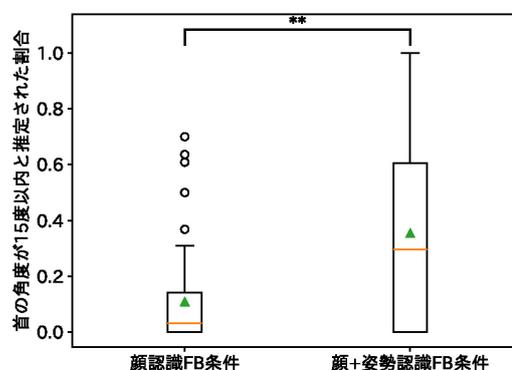


図 16: 首の角度が 15° 以内の割合

は、ユーザの姿勢がリアルタイムに画面に反映され、ユーザが自身の姿勢が悪くなっていることに気づきやすかったこと、姿勢が良いとゲームがプレイしやすくなるために正しい姿勢を維持するモチベーションが持続したことが要因として考えられる。また、首の角度推定モデルによって推定された角度も顔+姿勢認識FB条件の方が有意に高かったことから、ユーザの姿勢への意識が推定結果にも表れているといえる。さらに、首の角度が 15° 以内と推定された割合も顔認識FB条件に比べ有意に高かったことから、ある閾値より姿勢が正しい場合にゲームをプレイしやすくなるフィードバックにより、ユーザの姿勢をその閾値以内に維持するように誘導できたといえる。この閾値を変化させることで、よりユーザの姿勢を正しくするように誘導できる可能性が考えられる。ユーザの主観評価の結果からも、推定モデルはある程度精度よく推定できていたと感じている一方、「姿勢が良いと評価される時とそうでない時の違いがわからなかった」、「細かな首の動きでもフィードバックが変化していた」などの意見が得られていたことから、安定

性の面では懸念があるといえる。

一方、顔認識FB条件では姿勢に応じたフィードバックは行っていないにもかかわらず、姿勢への意識について顔+姿勢認識FB条件と同程度の評価をつけた参加者も複数名いた。これは、3分間のパズルタスクを行っているにも関わらず、前回の顔+姿勢認識FB条件で得た姿勢への意識がリフレッシュしきれていなかった可能性が考えられる。各セットにおける姿勢への意識について参加者平均を実験条件ごとに示したものを図17に示す。図から、顔+姿勢認識FB条件では1セット目から姿勢への意識が高く最終セットまでほとんど変化がないのに対し、顔認識FB条件では1セット目では姿勢への意識が低く、セットが進むにつれ姿勢への意識が上がっていく傾向にあることがわかる。これは顔+姿勢認識FB条件で得た姿勢への意識がパズルタスクを行っても次のセットに残り、顔認識FB条件でも意識したためと考えられる。このことから、本フィードバック手法による姿勢への意識向上はある程度持続力があるものであるといえる。また、各セットにおける首の角度（上下10%を除いた中央80%の平均）の参加者平均を実験条件ごとに示したものを図18に示す。図から、顔+姿勢認識FB条件ではセットが進むにつれ首の角度の値が小さくなっているが、顔認識FB条件では変化がないことがわかる。これは姿勢については意識しているがフィードバックがないために首の角度を修正できていない、疲れにより正しい姿勢を維持できなかったなどの要因が考えられる。実際に実験で疲労感を感じた参加者もあり、「正しい姿勢を続けるのは疲れるなと思った」、「スマートフォンを顔の高さに維持するために腕が疲れた」などの意見が得られた。そのため、試行回数を減らす、インターバルを増やすなど実験設計を改善することにより姿勢への意識と首の角度の変化について要因を明らかにできると考えられる。

また、首の角度に連動したフィードバックを行わない条件でも首の角度を推定するため、両条件ともにユーザの顔が認識できない場合はゲームを続行不可能としたが、内カメラに顔から首元までが映るようにしようとする行為が姿勢への意識につながった可能性も考えられる。これは、姿勢情報をスマートフォンからではなくユーザを真横から撮影するなどして取得することで、よりユーザの普段の姿勢や姿勢に対する意識を測ることができると考えられる。

#### 4.4.2 ゲームの楽しさ

4.3節で得られた結果より、首の角度に連動したフィードバックではゲームへの楽しさは変化せず、仮説2は支持されない結果となった。これは、ゲーム自体が単調であり、複

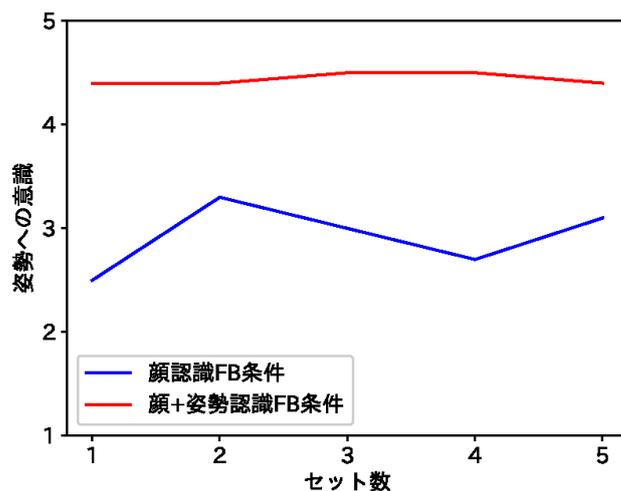


図 17: 姿勢への意識のセットごとの参加者平均

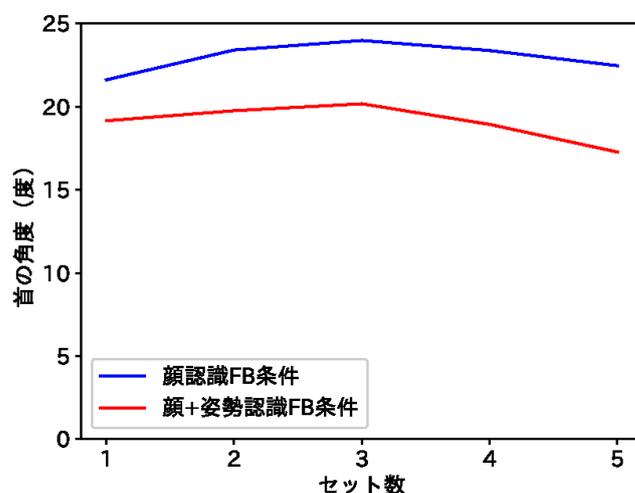


図 18: 首の角度のセットごとの参加者平均

数回行くと飽きてしまうことが考えられる。実際にユーザからの主観評価の結果、「ゲーム内容が単調なので、何かギミックがあれば面白そう」、「パズルなどもう少し内容の多いゲームだといいかなのと思った」、「ゲーム自体がすぐに飽きそう。ただ、タイムアタックは悔しかったので更新したい」などの意見が得られ、ゲームの内容を改善することで楽しさが変わることが期待される。

また、姿勢推定の精度やクリアタイムが影響した可能性も考えられる。横軸にゲームのクリアタイム (秒)、縦軸にゲームの楽しさをとった散布図を図 19 に示す。図から、ゲームのクリアタイムとゲームの楽しさには強い負の相関があった ( $R^2 = -0.52$ )。ユーザの主観評価からも、「顔が検出されない状態が長く続くとつまらないと感じた。クリア時間の半分以上を占めていた場合もあり、操作ができないのに時間だけが過ぎていく設定は面白くないと感じた。」、「自分が悪いのかもしれないが認識ができないが多かった

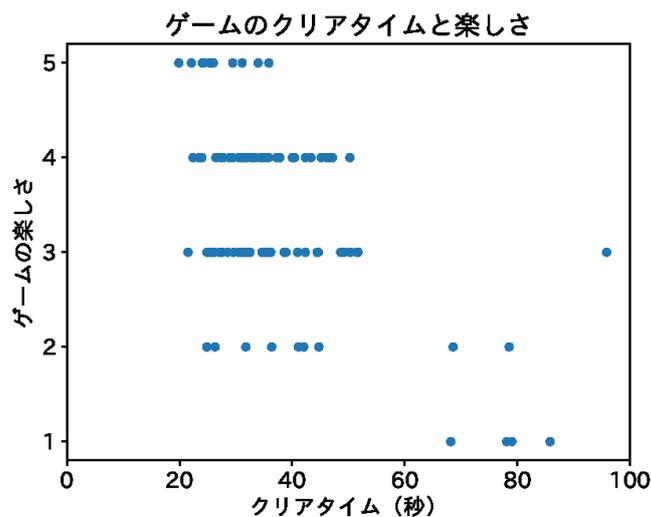


図 19: ゲームの楽しさとクリアタイム

ため。安定してプレイできればやりたいと思った。」などのコメントが得られ、姿勢推定に失敗した割合などによって楽しさが低減した可能性がある。さらに、本システムではユーザが姿勢を制御してからフィードバックに反映されるまで0.5~1秒程度のレイテンシがあり、スピードを競う数字早押しゲームにおいてこのような遅延が影響していることも考えられる。

このようにゲームの楽しさの評価にはゲーム自体の内容や姿勢推定の精度、クリアタイムなど様々な要因が影響しており、首の角度に連動したフィードバックによる差が現れなかった可能性がある。そのため、ゲームの内容や姿勢推定の成功率、実験設計を改善することでそのような影響を考慮してゲームの楽しさを測ることができると考えられる。

## 第5章 首の角度推定精度の向上

3章において精度が低下してしまった要因として、正解データの不正確さ、学習方法の不適切さなどが考えられた。そこで、人手によるアノテーションを行うことで正解データのノイズを軽減し、また学習方法を最適化することで推定精度の向上を図る。

### 5.1 正解データのアノテーション

#### 5.1.1 概要

これまでの研究において、データセット構築の際参加者を真横から撮影し、肩と耳に貼り付けたARマーカを結んだ直線の傾きを求めることで正解データとしていた。しかし、このような方法ではユーザの肩の位置によって同じ首の角度でも値が変わってしまうという問題があった。例えば、巻き肩のように通常より肩が内側に入り込んでしまうと実際の値より小さく、逆に胸を張るように肩を外に開いてしまうと実際の値より大きく計測されてしまう。そこで、計測された肩や耳のランドマークの位置を人手でアノテーションを行い修正することで、正解データの質を向上する。

#### 5.1.2 アノテーションシステム

人手によるアノテーションを効率的に行うためにマウスのドラッグ&ドロップでランドマーク座標の修正が可能なシステムを開発した。実際のシステム画面を図20に示す。

まずアノテータはアノテーション画面(図20(a))にアクセスし、画面中央に表示される正解データを取得する際に撮影した画像から正しい肩と耳のランドマークをアノテーションする。肩と耳のランドマークにはそれぞれ緑と赤の円が表示され、またそれらを結ぶ黄色の直線が表示されている。アノテータはこの緑と赤の円をドラッグ&ドロップすることでランドマークの座標を変更可能であり、その際の直線の傾き(首の角度)を画像上に表示した。画像上のランドマーク以外の部分をクリックするかエンターキーを押下することによりデータが保存され、次のデータが表示される。画面上部の直前に戻るボタンを押すと誤ってデータを送信してしまった場合にそのデータに戻って修正が可能

で、また画面右下のクエスチョンマークのボタンを押すことでアノテーション方法や注意点について確認可能であった。またアノテータは履歴画面（図 20(b)）から自身の過去のアノテーションが閲覧可能で、カードをクリックすることでそのデータに対する修正が行えた。

著者は管理者画面（図 20(c)）からデータの収集状況を閲覧可能で、どの姿勢データに対してどのアノテータがどのようなアノテーションを行ったかが確認できた。データは GUI ベースで任意のキーを用いてソートやフィルタが可能であった。角度の最大誤差の列で複数人のアノテータが付けた首の角度の誤差の最大値を確認可能で、 $10^\circ$  以上誤差がある場合には緑色でハイライトされた。

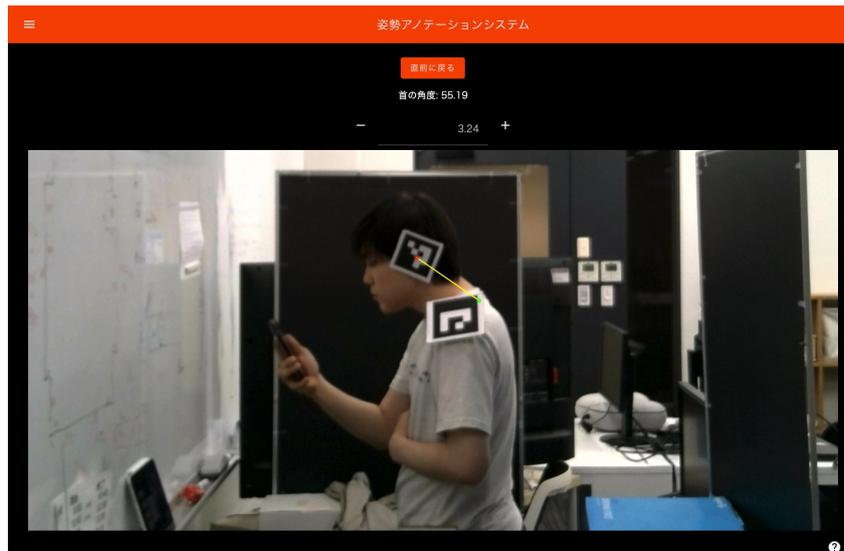
### 5.1.3 アノテーション手法

まずアノテーションの基準を共有するため、各アノテータに対してアノテーションの基準や注意点などのガイドラインの説明、システムの使い方に関するチュートリアルを 15 分程度行い、その後練習としてデータセットに影響を与えないサンプルデータに対してアノテーションを 30 件程度行ってもらった。著者がサンプルデータに対するアノテーションの付け方を確認し、アノテーションの基準と齟齬がある場合は指摘を行い、必要に応じてサンプルデータに対して追加でアノテーションを行ってもらった。アノテータの熟達を確認した後、本番データに対してアノテーションを開始してもらった。アノテーションはアノテータの任意の時間で開始、終了可能であった。

データの信頼性向上のため、1 件のデータにつき 2 人のアノテータを割り当て、その評価の平均を取ることで新しい正解データとした。またアノテータ間で  $10^\circ$  以上差がある場合は著者とアノテータで確認を行い、差が  $10^\circ$  未満になるように再度アノテーションを行ってもらった。

### 5.1.4 アノテーション結果

アノテーションの結果、計 8 人のアノテータから 11,414 件のデータに対してアノテーションが得られた。アノテーションによる正解データの修正量として  $MAE$  を算出したところ、7.88 ( $SD = 7.03$ ) であった。ここで、データセット構築に参加した 5 人のうち 1 人の首の角度についてアノテータ間の評価の差が大きく、また  $0^\circ \sim 60^\circ$  に広く分布しているはずのデータのうち  $0^\circ$  のデータが極端に少なくなってしまった。そのため、この 1



(a) アノテーション画面



(b) アノテーション履歴画面

id	画像	件数	もとの首の角度	角度の平均	角度の最大誤差	角度の差	アノテータ
85381	<a href="#">画像を非表示</a>	2	9.9581	18.1694	6.8148	8.2114	6.12
85159	<a href="#">画像を非表示</a>	2	5.3145	13.8514	6.8265	8.5369	9.1
85057	<a href="#">画像を非表示</a>	2	0.0000	5.3305	6.9142	5.3305	11.10
84829	<a href="#">画像を非表示</a>	2	14.8757	22.1129	6.7558	7.2372	6.9
84733	<a href="#">画像を非表示</a>	2	15.7086	26.2068	6.8439	10.4982	9.6
84667	<a href="#">画像を非表示</a>	2	15.1011	26.1985	6.6981	11.0974	6.9
84571	<a href="#">画像を非表示</a>	2	12.5755	21.8125	6.6937	9.2370	9.12
84061	<a href="#">画像を非表示</a>	2	34.1725	48.9653	6.4801	14.7927	13.7
83941	<a href="#">画像を非表示</a>	2	43.4176	61.6996	6.8416	18.2820	9.6
83365	<a href="#">画像を非表示</a>	2	52.7336	74.1754	6.9771	21.4418	9.6

(c) 管理者画面

図 20: アノテーションシステム画面

人のデータを学習の対象から除外した。なお、対象とした 4 人の参加者のデータに関しての修正量は 5.95 ( $SD = 4.52$ ) であった。

## 5.2 学習方法の改善

3 章では、特徴量同士や目的変数の非線形な関係やロバスト性などから決定木アルゴリズムを用いるモデルを採用し、初期検討としてランダムフォレストやエクストラツリーを用いて学習を行ってきた。しかし、特徴量の非線形で複雑な交互作用をより精密に表現しやすい勾配ブースティングを用いたモデルの方が適している可能性がある。そこで、リアルタイム性が高い LightGBM を用いて学習を行い、その結果を比較する。このとき、これまでの研究ではモデルが特徴量を解釈しやすいように加工していたが、LightGBM では特徴量をより精密に解釈するため、加工前と加工後、さらにこれまで簡単のために除いていた特徴量も含めて学習した。なお、ハイパーパラメータを適切にチューニングし正規化することでノイズや過学習を抑制した。最終的な特徴量は以下である。

- $Angle_{face}^{pitch}$ : 現在のスマートフォンに対するユーザの顔の角度の pitch 角
- $Angle_{face}^{roll}$ : 現在のスマートフォンに対するユーザの顔の角度の roll 角
- $Angle_{face}^{yaw}$ : 現在のスマートフォンに対するユーザの顔の角度の yaw 角
- $Angle_{phone}^{pitch}$ : 現在の地面に対するスマートフォンの角度の pitch 角
- $Dist_{eyes}$ : 現在のユーザの目と目の距離
- $Dist_{neck}$ : 現在のユーザの鼻から首元までの距離
- $Dist_{eyes}^{ref}$ : 基準姿勢時のユーザの目と目の距離
- $Dist_{neck}^{ref}$ : 基準姿勢時のユーザの鼻から首元までの距離
- $Norm$ :  $\frac{Dist_{neck}}{Dist_{eyes}}$
- $Norm^{ref}$ :  $\frac{Dist_{neck}^{ref}}{Dist_{eyes}^{ref}}$
- $Ratio$ :  $\frac{Norm}{Norm^{ref}}$
- $Pos_x^{neck}$ : 現在のユーザの首元の X 座標
- $Pos_y^{neck}$ : 現在のユーザの首元の Y 座標

- $Pos_x^{nose}$ : 現在のユーザの鼻の X 座標
- $Pos_y^{nose}$ : 現在のユーザの鼻の Y 座標
- $Diff_x: Pos_x^{neck} - Pos_x^{nose}$
- $Diff_y: Pos_y^{neck} - Pos_y^{nose}$

また、データセットを構築する際に  $0^\circ \sim 60^\circ$  の範囲でデータを収集したが、その角度ごとのデータ量にばらつきがあった。具体的には、 $0^\circ$  付近のデータが少なく、 $60^\circ$  付近のデータが多い傾向にあった。そのようなデータ分布の偏りを反映した学習が行われてしまい推定精度が低下していた可能性が考えられる。このような偏りをなくすために、データの分布が少ない範囲にデータ量を合わせるアンダーサンプリングを行った。ここで、3章での評価と同様にデータを  $10^\circ$  ごとに分割したところ、各範囲のデータ数が少なくなりすぎてしまったため、 $15^\circ$  ごとに分割することとした。そのため、今後範囲ごとの結果について言及する場合も  $15^\circ$  ごとに分割する。なお、アンダーサンプリングを行った結果、実際に学習に使われたデータは 3,000 件~3,500 件程度であった。

### 5.3 結果

本章でこれまで述べてきた処理を行い、再度学習し 5 分割交差検証を用いて精度検証した結果について、メトリクスの比較を表 7 に示す。ここで、従来モデルはエクストラツリーを用いてアノテーション前のデータを学習したものを、改善モデルは LightGBM を用いてアノテーション後のデータを学習したものを指す。なお、改善モデルのみでアンダーサンプリングを行い、正確な正解データに対する推定精度を評価するために両モデルでアノテーション後の値を正解データとして用いた。表から、 $R^2$ ,  $MAE$ ,  $RMSE$  の全ての指標において精度が向上していることがわかる。また  $0^\circ \sim 60^\circ$  を  $15^\circ$  ごとに分類し、正解データとそれに対する推定値がそれぞれどこに分類されるかを表す分類確率マトリックスについて、従来のもものと改善後のものをそれぞれ表 8, 表 9 に示す。従来モデルでは  $0^\circ$  と  $60^\circ$  で対角線上のセルの値が小さく、その他の角度ではおよそ 40~60% 程度であったのに対し、改善後はほとんどの角度で 70% 以上となった。ここで、このような分類による結果では境界値付近のデータは誤差が小さい場合でも不正解と判定されてしまう場合があるため、正解データと推定値の誤差が  $\pm 7.5^\circ$  以内であった割合について求めた。その結果、従来モデルは 48% であったのに対し、改善後のモデルは 77% であった。これらは、従来モデルが学習していた正解データが特に  $0^\circ$  や  $60^\circ$  付近で不正確だっ

表 7: 推定精度のメトリクス比較

	$R^2$	$MAE$	$RMSE$
従来モデル	0.51	12.12	15.91
改善モデル	0.88	5.60	7.38

表 8: 従来モデルの分類確率

		推定値 [°]				
		0	15	30	45	60
正解データ [°]	0	0.13	0.77	0.09	0.00	0.00
	15	0.02	0.63	0.32	0.03	0.00
	30	0.02	0.32	0.44	0.21	0.00
	45	0.01	0.14	0.28	0.52	0.05
	60	0.00	0.06	0.14	0.42	0.38

表 9: 改善モデルの分類確率

		推定値 [°]				
		0	15	30	45	60
正解データ [°]	0	0.70	0.28	0.01	0.00	0.00
	15	0.08	0.70	0.21	0.01	0.00
	30	0.01	0.18	0.64	0.17	0.00
	45	0.00	0.01	0.17	0.72	0.10
	60	0.00	0.00	0.01	0.26	0.73

たこと、アンダーサンプリングの実施や学習モデルの変更により推定の安定性が向上したことが要因であると考えられる。なお、各特徴量の重要度を図 21 に示す。これらの結果より、データセットの質や学習方法を改善することで従来のモデルより推定精度が大きく向上したことが明らかになった。これにより、本手法の応用可能性が向上することが期待される。

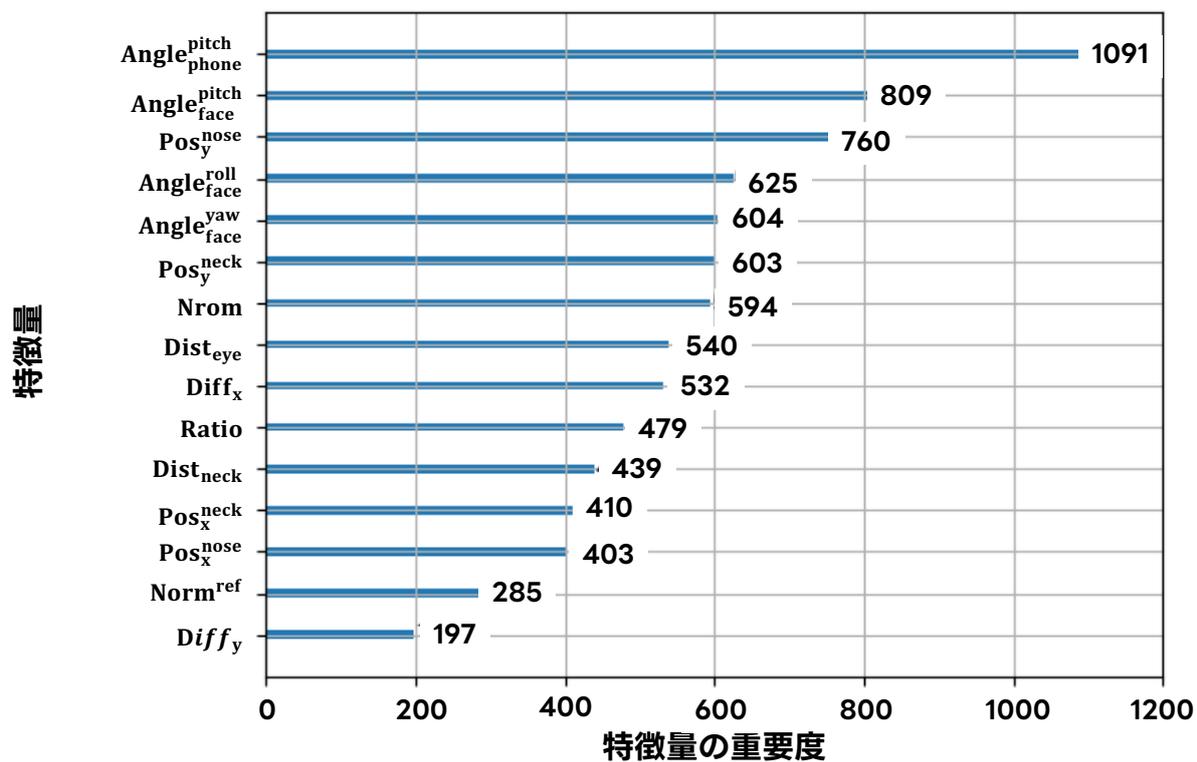


図 21: 特徴量の重要度

## 第6章 ハッカソンによる応用可能性の検証

4章にて、スマートフォン利用者の首の角度をリアルタイムに推定しフィードバックすることが姿勢矯正意識の促進に効果的であることが示唆された。一方で、単一のケーススタディしか示しておらず、本手法を用いてどのような応用が可能かについては未検証である。また、他の研究者や開発者などの第三者にとって本手法をどの程度容易に利用可能かについても示しておらず、このような点について明らかにすることは研究分野の発展において重要であると考え。そこで本章では、5章で改善した首の角度推定モデルをライブラリとして利用可能とするとともに、その応用可能性について検証する。ここでは、提案手法を用いたアイデアの多様性や開発容易性を評価したKatoら [53] や栗原ら [54] の先行研究を参考に、ハッカソンを実施することによりシステムの応用可能性について評価する。

### 6.1 首の角度推定ライブラリ

#### 6.1.1 概要

ハッカソン参加者がより容易に本手法をアプリケーションに取り込めるよう、カメラやセンサのアクセスリクエストやバックエンドへのAPIリクエスト、姿勢推定成功時のコールバック関数の設定など必要な処理を実装しやすくしたJavaScriptライブラリを開発し、公開した<sup>1</sup>。ライブラリ利用者は図22に示すようなシンプルなコードで首の角度推定を行うことができる。

#### 6.1.2 首の角度推定システムの動作環境

首の角度推定システムはGPU (NVIDIA GeForce RTX 4090, 24GB) を搭載したPCで動作させた。REST APIとしてセンサ情報や画像フレームを受け取り、特徴量抽出、推論、DB I/Oを行ったのち推定結果を返すようになっている。シングルプロセスでの処理時間は1リクエストあたり約0.2秒~0.3秒程度要するため、12人からの同時リクエスト

<sup>1</sup><https://github.com/nkmr-lab/neck-pose-estimator/pkgs/npm/neck-pose-estimator>

```
// インスタンス化
const estimator = new NeckAngleEstimator({
  apiUrl: "/path/to/api",
  appId: "<your_app_id>",
  interval: 1000, // default 500[ms]
});
estimator.onEstimate((result) => {
  console.log(result.neckAngle);
});
const start = async () => {
  try {
    await estimator.sensor.requestPermission();
    await estimator.start();
  } catch (error) {
    console.error(error);
  }
};
const stop = () => {
  estimator.stop();
}
```

図 22: ライブラリを用いたサンプルプログラム

を断続的に処理できるよう、API サーバを 2 つ用意し、各サーバで 3 つのアプリケーションワーカを起動した。さらに、各アプリケーションワーカには 4 つの推論用プロセスを割り当てることで、1 台のサーバにつき最大 12 件の推論を並列に実行できるようにした。リクエストはグループ単位でサーバを均等に振り分けることで、多数の同時リクエストが発生した場合でも処理が滞りにくいようにした。なお、実装の簡略化のため 2 台の API サーバにリクエストを中継するプロキシサーバを用意した。

パフォーマンステストとして、1 端末から 0.3 秒ごとに約 3 分間リクエストを送った際の処理時間の統計量を表 10 に示す。本推定手法は大きくスマートフォンに対するユーザの顔の角度を推定する頭部姿勢推定、目や鼻、首元などのランドマークを取得する骨格推定、それらの情報を含んだ特徴量を用いた回帰モデルによる推論の工程に分けられる。なお、頭部姿勢推定と骨格推定はマルチプロセスにより非同期で取得している。表から、回帰モデルを用いた推論にはほとんど時間がかかっておらず、次に頭部姿勢推定、骨格推定の順に時間がかかっていることがわかる。

また、骨格推定と全体の合計が同程度の値を示していることから、骨格推定の処理速度がボトルネックとなっていることがわかる。骨格推定の処理速度は GPU の処理性能や処

表 10: 首の角度推定における各工程の処理時間 (秒)

	頭部姿勢推定	骨格推定	推論	合計
平均	0.073	0.197	0.001	0.210
標準偏差	0.153	0.089	0.000	0.141
中央値	0.028	0.166	0.001	0.168
最小値	0.017	0.138	0.000	0.139
最大値	1.706	0.849	0.004	1.708

理する画像サイズに依存しており、現状のシステムではフロントエンドから送られてきた画像データを  $384 \times 384$  ピクセルにリサイズしているが、この値をさらに小さくすることで処理速度が向上する可能性がある。一方、画像サイズを小さくするほど画像解析の精度が低下すると予想されるため、処理速度と推定精度はトレードオフの関係にあるといえる。また、頭部姿勢推定と骨格推定において、平均と標準偏差に対して最大値が大きく、外れ値となるような値が存在していることがわかる。これは、API ワークが再起動してしまうことで頭部姿勢推定や骨格推定を行う推論モデルが再度ロードされ、その後の初回推論時にオーバーヘッドが発生しているためと考えられる。

## 6.2 ハッカソン

### 6.2.1 概要

提案手法の応用可能性を検証するため、ハッカソンを開催した。参加者には 6.1 節のライブラリを使ってアプリケーションを開発してもらった。ハッカソンでは、発案されたアイデアの多様性や開発されたアプリケーションの他者評価から手法の応用可能性を、参加者の主観評価や参加者の会話ログからライブラリの開発容易性を評価した。参加者は研究室内の大学生 3 年～大学院修士 1 年の 12 人であり、JavaScript や HTML などの基本的な Web 開発の知識を有していた。

### 6.2.2 ハッカソンの流れ

参加者は 2 人 × 6 グループに分けられ、アイデア出しの際に他のグループの影響を受けにくいようグループごとに離れて着席してもらった。ハッカソンはアイデアセッション (2 時間)、開発セッション (4 時間 30 分)、最終成果発表 (30 分) に分けられ、アイデアセッションと開発セッションの間と開発セッションの途中に 30 分ずつの休憩を設けた。

アイデアセッションでは、テーマを与えられた後 30 分間グループごとにそのテーマに関するアイデアを出してもらい、各グループ 60~90 秒でそのアイデアについて発表してもらおうという流れを合計 3 回行ってもらった。発表はスライドを用いない口頭発表で、アプリケーションの内容に加えてターゲットユーザ、アプリケーションが活用されるシチュエーションについて説明してもらった。その後、発表内容についてメモに記述してもらった。また、*Helpfeel Cosense*<sup>2</sup>を用いて各グループの発表に対して他のグループからリアルタイムで感想やコメントなどを書いてもらうことで相互フィードバックを得られるようにした。

アイデアセッションで提示した 3 つのテーマはそれぞれ以下である。

- 高校生向けの姿勢矯正アプリ
- 大学生・大学院生向けの姿勢矯正アプリ
- 学生向けの姿勢矯正アプリ

各テーマで、PC やタブレットではなくスマートフォン利用時のアプリケーションを考えること、他のグループやセッションとは違う斬新なアプリケーションを考えることについて教示した。

開発セッションでは、アイデアセッションで考えた 3 つのアプリケーションの中から 1 つ選ぶか、さらに新しく考えたアプリケーションについて開発してもらった。ここでは、あらかじめグループごとに用意した VPS サーバにログインしてもらい、その中で開発してもらった。VSCode の拡張機能である *SSH FS*<sup>3</sup>を用いてログインしてもらうことで、普段の開発環境に近い状態で共同開発をしてもらった。

冒頭の 30 分でサーバへのログインやライブラリについての説明、ライブラリを使ったサンプルプログラムの動作確認を行い、その後 4 時間各グループごとに開発を行ってもらった。開発の際は、簡単のためフロントエンドをフレームワークなどを用いないシンプルな HTML/JavaScript/CSS で実装してもらい、必要に応じて PHP や MySQL などを用いてサーバサイドの処理を実装してもらった。また、短時間での開発になるため生成 AI の活用を推奨した。開発の進み方や開発が難航したポイントを分析するため、参加者の同意のもと開発中の会話を録音してもらった。

最終成果発表では、スライドを用いて実際に開発したアプリケーションについて説明してもらった。各グループ 5 分程度で発表してもらい、ターゲットユーザ、着目した問題

<sup>2</sup><https://cosen.se/>

<sup>3</sup><https://marketplace.visualstudio.com/items?itemName=Kelvin.vscode-sshfs>

点や課題，ユースケース，アプリケーションのアピールポイント，アプリケーションのデモを含めるように求めた。なお，最終成果発表を録画することで，ハッカソンに参加していない評価者に開発されたアプリケーションの創造性や発展性について評価してもらった。また，参加者からも最終成果発表終了後にアイデアや実際に開発したアプリケーションの満足度，ライブラリの使いやすさなどについての主観評価を収集した。

## 6.3 成果物とその評価

### 6.3.1 成果物の概要と創造性の評価

ハッカソンにより得られた最終成果として発表されたアプリケーション6件と，アイデアセッションで得られたものの実装はされなかった13件を合わせた計19件のアイデアについて，アプリケーションのジャンルと首の角度推定を用いたフィードバックの粒度をもとにカテゴライズした結果を表11に示す。フィードバックの粒度は閾値を用いた二値的なもの，連続値をある程度の間隔でまとめた段階的なもの，連続値をそのまま用いる連続的なものに分けられる。表から，ジャンルやフィードバックの粒度に偏りなく応用例が考え出されていることがわかる。

また，最終成果として発表されたアプリケーション6件の創造性について評価者10人（修士2年7人，博士1年2人，教員1人）から評価を得た。ここで，ソフトウェアアプリケーションは一般的に新規性と有用性によって評価されることが多く，近年でも盛んに用いられている [55]。またアイデアの発散的思考の評価としては1960年代にトランスが提案したTTCT (*Torrance Tests of Creative Thinking*) [56] が広く用いられ，流暢性（アイデアの数量），柔軟性（アイデアの多様性），新規性，精緻性（アイデアの具体性）によって評価される。ハッカソンにより開発されたアプリケーションの個々について評価するため，これらの中からアイデアの数や多様性を示す流暢性と柔軟性を除いた3つの指標（新規性，有用性，精緻性）を用いて，その平均を取ることで創造性スコアを算出した。評価者から得られた創造性スコアを図23に示す。グラフから，全体的に中程度から高い評価を得ており，中でもグループ2とグループ4が安定して高い評価を得ていることがわかる。

### 6.3.2 特に評価が高かったアプリケーション

評価者による創造性スコアが高かった上位3件について紹介する。

表 11: アイディアの分類結果 [個]

	二値	段階	連続	合計
ゲーム	1	1	2	4
SNS	1	1	2	4
日常的なログ	3	1	1	5
その他特定のシーン	2	2	2	6
合計	7	5	7	19

(a) *NeckTube*

360° 動画視聴時にスマートフォンの傾きではなくユーザの首の角度に連動して視点を変える動画視聴アプリケーション (図 24(a)). 動画視聴時に姿勢が悪くなりやすい点に着目し, ユーザがインタラクティブに視点を変更可能な 360° 動画を用いて姿勢矯正を促すことを目的としていた. 評価者からは, 首の角度をコントローラのように入力として使っている点, コンテンツによっては有用性が高いと思われる点などが評価されていた.

(b) *Love Sight*

スマートフォン利用時の姿勢が特に悪い場合はクラスにいる気になる異性から幻滅される内容, 特に良い場合は褒められる内容のメッセージが届く通知アプリ (図 24(b)). 学生向けという点にフォーカスしてモチベーションをデザインし, 通知時に異性からどのように見られているかというイメージ図を生成 AI に出力させて添付することでインパクトを増強していた. 評価者からは, 客観的に他人からの姿勢を提示することが有用だと思われる点, ターゲットユーザを明確に定め, それに対して効果が大きいようにデザインしている点などが評価されていた.

(c) *Neck-romancer*

スマートフォン利用中のあるタイミングで通知が届き, 首の角度に連動した釣り竿を操作して魚を釣り上げるフィッシングゲーム (図 24(c)). 普段の姿勢が良いと大きな魚やレアな魚が登場しやすくなり, また釣りの際に姿勢が悪い場合に釣り竿が地面に引っかかりゲームオーバーとすることで, 日常的に良い姿勢を保ちつつ定期的に首のストレッチをさせることを目指していた. 評価者からは, 良い姿勢を維持させるだけでなくストレッチも促している点, 釣り竿を上引っ張る動きが首の動きとマッチしていてゲームデザインの納得性が高い点などが評価されていた.

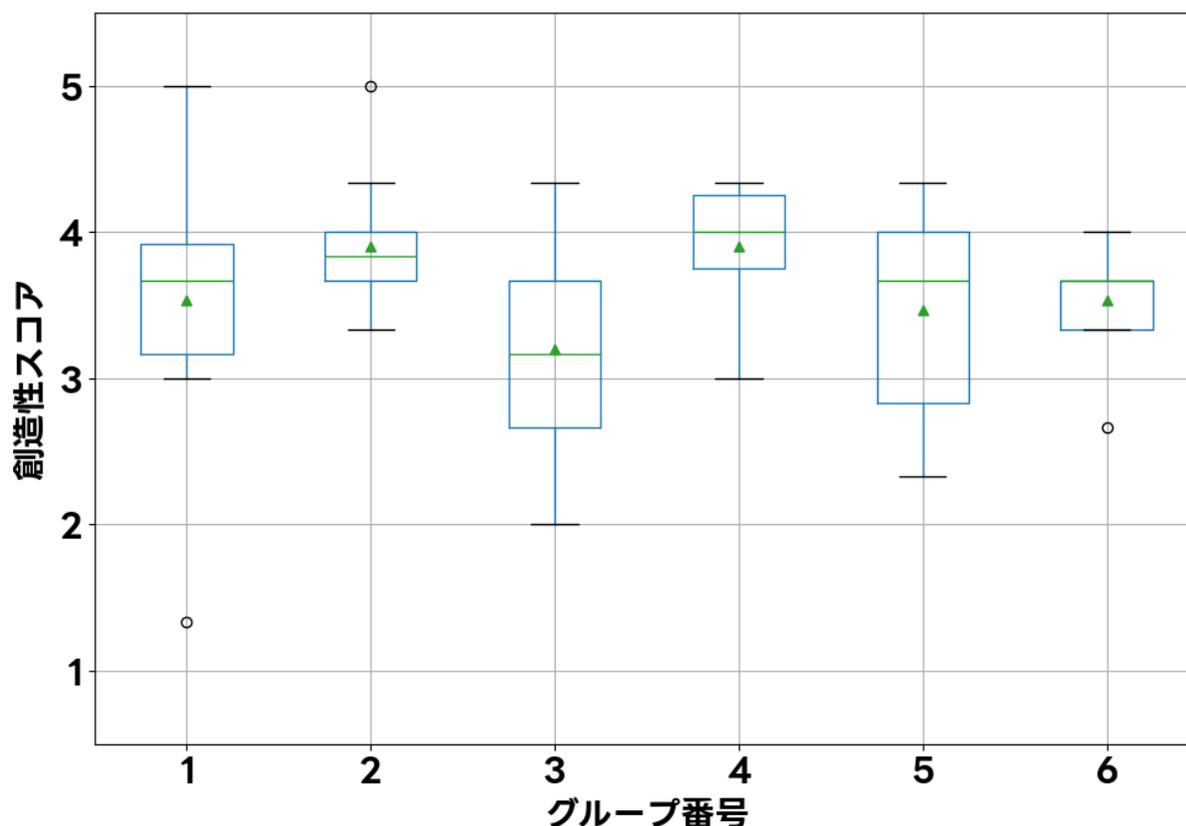


図 23: 最終成果物の創造性スコア

## 6.4 開発体験および開発容易性の評価

### 6.4.1 参加者の主観評価

参加者から収集したライブラリや成果物に対する評価を図 25 に示す。ライブラリの使いやすさ、首の角度推定の精度、考えたアイデアの満足度、開発したアプリケーションの満足度は1～5のリッカート尺度で、理想とした完成度に対する実際の実装達成率は0～100%の整数値で回答してもらった。図から、ライブラリの使いやすさと推定精度では全体的に高い評価が得られたが、アイデアの満足度とアプリケーションの満足度、実装達成率をみると、参加者はおおむねアイデアや開発したアプリケーションに満足しているものの理想に対して実際に実装したものの満足度が低いことがわかる。参加者に苦労した点や満足でない点について聞いたところ、2人の参加者から首の角度推定のプログラムや自分がやりたいこととの連携が難しかったという意見が得られた。一方、多くの参加者はアイデアの質や機能の不十分さについて言及していた。

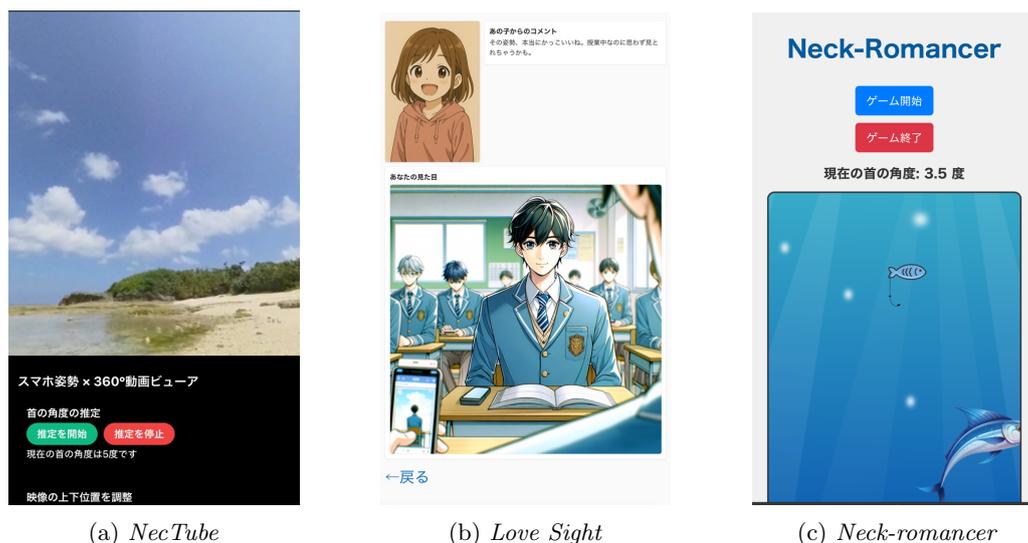


図 24: 開発されたアプリケーションのスクリーンショット

### 6.4.2 会話ログ分析

開発セッション中の会話ログから得られた開発段階の推移について図 26 に示す。ここでは、開発段階を以下の 4 つに分類した。

- 設計：アイディアの深掘りや方向性の決定、仕様策定などの上流工程
- コア機能実装：首の角度推定を用いたアイディアの核となる機能の実装
- 全機能実装：ユーザが体験する一連のフローや全ての機能の実装
- ブラッシュアップ：細かいデザインや値の調整、発表準備など

図から、多くのグループが制限時間よりも前に余裕をもって全機能の実装を終えていることがわかる。グループ 4 では一度アプリケーションを実装し終えた後、そのアプリケーションをブラッシュアップすることに限界を感じ、新しいアイディアを考えて実装し発表したという行動がみられた。また、コア機能の開発にかかった時間の平均は約 62 分 ( $SD = 33$ ) であった。60 分以上時間がかかったグループの会話をさらに分析したところ、生成 AI の API やデータベースとの連携、ファイル保存などに多くの時間を要していたことがわかった。

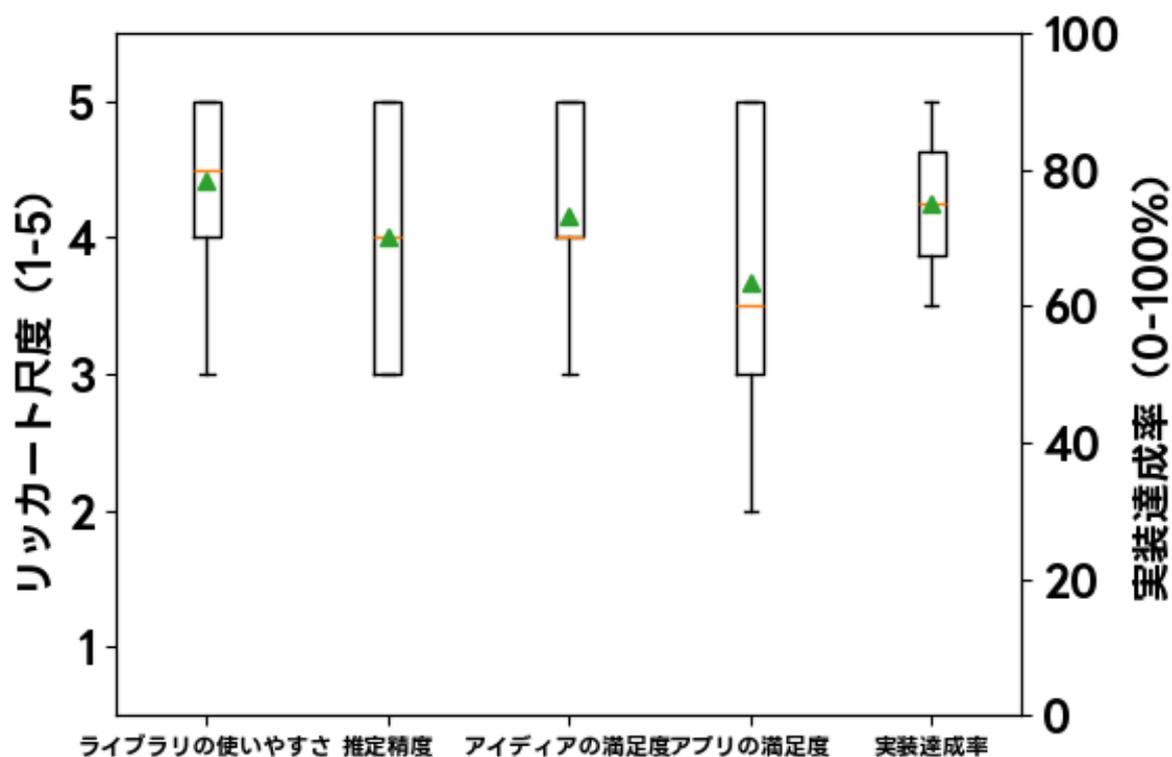


図 25: 参加者の主観評価

## 6.5 考察

### 6.5.1 応用可能性

ハッカソンにより得られた結果から、様々なジャンルやフィードバック方法のアイデアが偏りなく創出されており、本手法を用いて多様な応用先が考えられることがわかった。6.3.2節で紹介したもの以外にも、ユーザの姿勢をリアルタイムに別のオブジェクトやキャラクターの形態を変化させることで可視化するものや、1人のユーザのみでなく複数人で協力して姿勢矯正やストレッチを促すものなど、著者らの予想していなかった創造性が高いアプリケーションが得られた。評価者による創造性スコアでも大きな差はみられず、それぞれのアプリケーションについて有用性や発展性を支持するコメントが得られた。

首の角度推定の精度について、6.4.1節で得られた参加者の主観評価では中程度～高い評価を得ていた。推定精度が原因で苦戦した点や精度が高ければ実現したかったアイデアについても聞いたところ、12人中10人が特にないと回答していた。回答があった2件では、推定結果をそのまま用いて画面を操作するには不安定に感じた、精度をあまり気にしないアイデアだったのでわからないというフィードバックが得られた。以上のこ

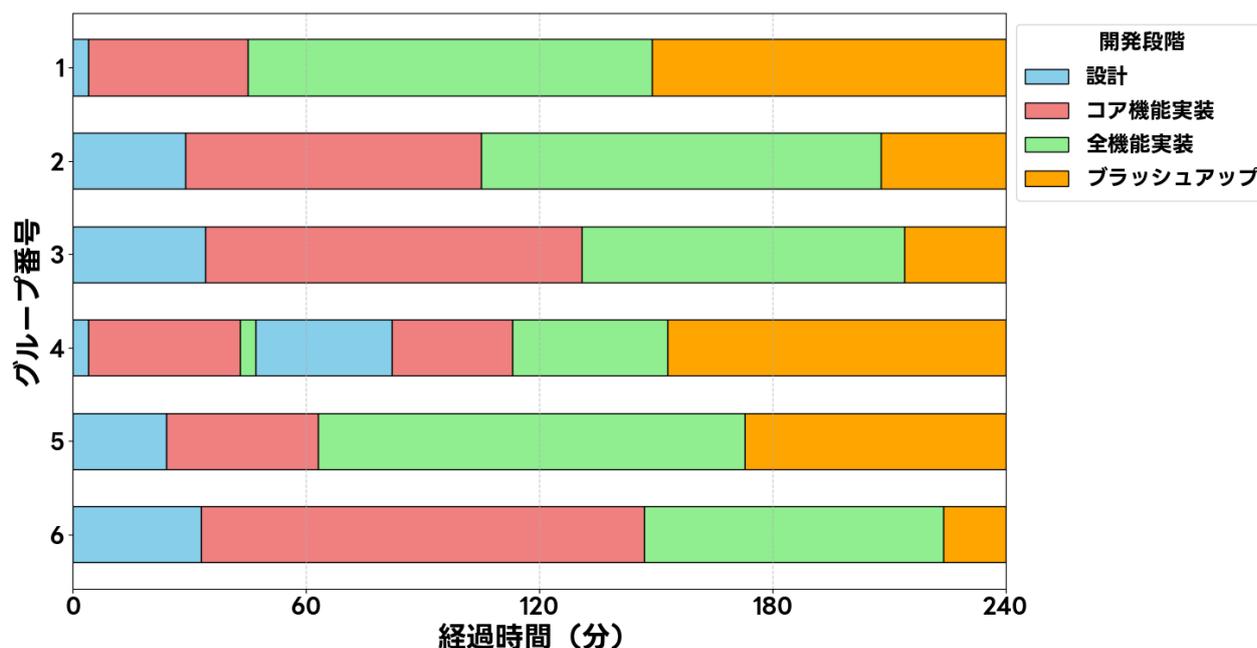


図 26: グループごとの開発の進行状況

とより、姿勢が良いまたは悪いの二値的なフィードバックに用いる場合は十分な精度であることが考えられる。また、推定した角度を連続値として用いる場合でも時系列的に連続した推定結果を平滑化することにより UX を損なわない可能性が考えられる。

本手法は本来キャリブレーションとして首の角度を推定したいユーザの最も姿勢が良いときのデータを取得してその比較をもとに現在の首の角度を推定するものであるが、ハッカソンでは時間短縮のためデータセット構築の参加者の値を参照して決めた基準値を用いて首の角度推定を行った。このことにより、個人の身体的特性を考慮しにくくなり精度が低下したことが考えられる。時間に余裕がある場合はキャリブレーションを行い、各ユーザに対してより正確な推定を行うことが望ましい。

ただし、参加者も評価者も全て同じ研究室のメンバーであったため、著者との関係性により全体的な評価が高くなっていることが考えられる。そのため、一般に公募しより多様かつ多数の参加者を集めることでより客観的な結果を得る必要がある。

### 6.5.2 開発容易性

開発セッションが4時間30分の短時間のハッカソンであったにもかかわらず、参加者はアイデアと実際に開発したアプリケーションについてある程度満足感を得ていたことがわかる。また目標とした完成度に対する実際の達成率も約70~80%程度に集中して

いたことから、本手法とライブラリを用いて短時間で満足感のあるアプリケーションを開発できたといえる。

首の角度推定を用いたコア機能の開発は平均約 62 分で終わっており、本ライブラリを適応させることが容易だったことがうかがえる。参加者からのコメントでも「姿勢の API は使いやすく、すぐに姿勢をシステムに取り込めたが、chatGPT のプロンプトがうまくいかず想定通りの画像生成とならなかった。」といったフィードバックが得られた。またライブラリの使いやすさについて高い評価を得ており、これにはライブラリを単純な処理で動作可能にした点に加え、あらかじめサンプルプログラムを用意しチュートリアルとして解説したことも大きく貢献していると考えられる。

ソースコードを分析したところ、6 グループ中 3 グループがサンプルプログラムに書き足すように拡張して開発しており、他の 3 グループは必要な処理のみを適切に書くことができていた。これはサンプルプログラムのシンプルさゆえに拡張性が高かったこと、その解説により参加者がライブラリの使い方を十分に理解し各自のアプリケーションに適応できたことを示唆している。

ただし、参加者はすべて情報系の学部や研究科に所属する学生で、プログラミング経験が 3～6 年程度であったため、ある程度 Web アプリケーション開発の知識を有していた。そのため、一定のプログラマにとって利用しやすい可能性は示唆されたが、必ずしも初学者にとって使いやすいとはいえないことに留意する必要がある。

## 第7章 本研究の制約と発展の可能性

本研究において、参加者の属性や評価が限定的であるために一般性や客観性についていくつかの課題がある。

### 7.1 限定的な評価

まず、3.2節で構築したデータセットは参加者が20代前半の5人であり、5.2節により1人を学習および評価対象から除外したため、最終的に4人（男性3人、女性1人）の日本人のデータを用いている。参加者ごとに基準姿勢を取得しキャリブレーションしているものの、個人の身体的特徴によりどのように特徴量に変化するか、またどの程度首の角度推定モデルが一般化できているかについては検証できていない。これはデータセットに様々な属性の参加者を含めて拡張することにより解決可能である。6章で得られた結果により、主観的な推定精度が高いという評価を得たが、参加者が自身の首の角度を正確に把握しているとは限らないため、実環境での推定精度を客観的に明らかにできたわけではない。そのため、光学マーカなどを用いてユーザの首の角度を正確に取得することにより、実環境での客観的な推定精度を検証できると考えられる。

また、4章や6章で実施した実験では、参加者が全て著者と同じ研究室のメンバーであったため、その関係性により参加者の行動や主観評価にバイアスがかかり、提案手法の評価が高くなってしまったことが考えられる。そのため、多くのユーザに本手法やライブラリを利用してもらうことで、手法の有用性や応用可能性をより強固に示すことができる。

### 7.2 応用についての制約と懸念

6章にて提案、開発されたアプリケーション案では、スマートフォンで他の様々なアプリケーションを利用している際にバックグラウンドで姿勢を推定することを想定したものがいくつかあった。そのようにスマートフォン利用時のユーザの姿勢を常に計測すること

で、フィードバックがより有効に動作することが期待される。しかし、iOS<sup>1</sup>や Android<sup>2</sup>の規約によりカメラをバックグラウンドで利用することができないため、提案手法で用いる画像特徴が取得できず、バックグラウンドでの姿勢計測が実装不可能である。このように、理論的には実現可能なものの OS の規約により応用可能性が狭まってしまうことが考えられる。一方で、ブラウザの拡張機能やモバイルアプリケーション利用時のプラグインなど、フォアグラウンドでは十分に実現できると考えられる。

本研究では姿勢矯正への影響にのみフォーカスしており、実利用するうえでいくつかの懸念がある。提案手法ではセンサやカメラを常時起動するものであることから、通信量や電力の消費が大きいことが予想される。さらに、Gustafsson ら [57] は高速なテキスト入力が姿勢を悪化させる可能性について言及しており、また Aarii ら [58] はタスク難易度が上昇するほど首の角度が大きくなることを明らかにしている。これらのことから、スマートフォンの操作に集中すると姿勢が悪くなりやすいことが考えられ、良い姿勢を保持とした場合の作業効率については別途検証が必要である。一方で、良い姿勢を維持するためには腹筋や背筋をはじめとした体幹筋が重要であることが知られており [59, 60], これらを鍛えることで作業効率を落とさずに良い姿勢を維持できることが期待される。

<sup>1</sup><https://developer.apple.com/documentation/avfoundation/avcapturesession/interruptionreason/videodevicenotavailableinbackground?language=objc>

<sup>2</sup><https://developer.android.com/develop/background-work/services/fgs/restrictions-bg-start>

## 第8章 結論

本研究では、スマートフォン利用時の姿勢矯正への意識を促進させることを目的として、スマートフォン利用時のユーザの姿勢を追加のデバイスを用いずにリアルタイムに推定する手法を提案した。

まず、既存研究の課題であったデータの連続性と正解データの定義の不明瞭さについて改善するためのデータセット構築手法について検討し、大学生、大学院生5人からなる84,374件のデータセットを構築した。本データセットを用いて回帰モデルを訓練し、推定精度の検証を行った。データの非線形性やノイズへの耐性からランダムフォレストとエクストラツリーを用いて学習および評価を行ったところ、改善の余地はあるものの両方のモデルで一定の精度で首の角度を推定可能であることが明らかとなった。各モデルを比較したところ、正確に推定可能な範囲や誤差の大きさの傾向が異なり、アプリケーションやフィードバック方法により適切なモデルが異なる可能性が示唆された。

次に、スマートフォン利用時のユーザの姿勢矯正意識を促進させるため、ケーススタディとして本手法をシリアスゲームに応用した。ユーザの姿勢をリアルタイムに推定し、姿勢が悪いとネガティブなフィードバック、姿勢が良いとポジティブなフィードバックを行うことでユーザの姿勢矯正を促すようにゲームをデザインした。このようなフィードバックの有用性を検証するため、シンプルなゲームを実装し首の角度に連動したフィードバックの有無による比較実験を行った。その結果、フィードバックがある場合にゲームプレイ中の姿勢矯正意識が有意に向上することが明らかになった。

また、本手法の応用可能性を向上させるため、データセットの質や学習方法を改善した。提案した首の角度推定手法の精度が低下してしまった要因として、データセットの正解データに誤差が生じてしまっていること、学習方法が適切ではなかったことなどが考えられた。そこで、人手によるアノテーションを行い正解データの質を向上させ、また特徴量やデータセットの特性を考慮し学習モデルと学習方法を改善した。アノテーションによって得られた9,387件のデータを用いてLightGBMで学習および評価を行ったところ、従来のモデルより高い推定精度を示した。

最後に、提案手法の応用可能性について検証するためハッカソンを実施した。本手法

を適応しやすくするために JavaScript のライブラリとして他者が利用可能にし、そのライブラリを用いて姿勢矯正のための Web アプリケーションをテーマとしたハッカソンを行った。その結果、様々なジャンルで多様なフィードバックを行うアプリケーション案が得られ、また実際に開発されたアプリケーションに対してもその創造性が評価された。参加者の主観評価や開発プロセスの分析から、本ライブラリは各アプリケーションに適応しやすく、開発容易性が高いことが示された。

これらの成果から、スマートフォンのみを用いてユーザの首の角度がリアルタイムに推定可能であり、またそれをフィードバックすることでユーザの姿勢矯正意識を短期的に促進可能であることが明らかになった。また本手法を用いて限られた時間でも多様なアプリケーションが開発可能であり、その応用可能性の高さが示唆された。

## 謝辞

本研究に取り組むにあたって、多くの方々にご支援・ご指導を賜りました。この場を借りて感謝を申し上げます。

はじめに、4年間にわたり研究の進め方や論文執筆、発表準備などについて懇切丁寧にご指導くださった中村聡史先生に深く感謝申し上げます。また、研究の議論や論文執筆の際のチェックなど様々な場面で協力していただいた中村研究室の皆様、姿勢による身体への負荷や理想的な姿勢などについてご教授いただいた間庭史貴先生に厚く御礼申し上げます。そして、これまで経済面や精神面で支えてくれた家族に心からの感謝を伝えたいと思います。

最後に、これまでの大学・大学院生活において関わってくださったすべての方々に改めて感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 拓文西川スマホ時代に増える“ストレートネック”とは?, <https://news.hosp.mie-u.ac.jp/health/advice/2603/> (2025). Accessed: 2025-12-14.
- [2] Elvan, A., Cevik, S., Vatansever, K. and Erak, I.: The Association between Mobile Phone Usage Duration, Neck Muscle Endurance, and Neck Pain Among University Students, *Scientific reports*, Vol. 14, No. 1, p. 20116 (2024).
- [3] Hansraj, K. K.: Assessment of Stresses in the Cervical Spine Caused by Posture and Position of the Head, *Surgical Technology International*, Vol. 25, No. 25, pp. 277–279 (2014).
- [4] Auspice Safety Inc.: Smartphone Ergonomics 101: Preventing Phone-Related Injuries, <https://auspicesafety.com/blog/smartphone-ergonomics-101-a-guide-to-preventing-injuries-for-a-healthier-you/> (2025). Accessed: 2025-12-15.
- [5] Editorial Team: Why Your Phone Is Causing Neck Pain?, <https://continentalhospitals.com/blog/why-your-phone-is-causing-neck-pain/> (2025). Accessed: 2025-12-15.
- [6] Hincapié-Ramos, J. D., Guo, X., Moghadasian, P. and Irani, P.: Consumed Endurance: a Metric to Quantify Arm Fatigue of Mid-air Interactions, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1063–1072 (online), 10.1145/2556288.2557130 (2014).
- [7] Kim, S.-Y. and Koo, S.-J.: Effect of Duration of Smartphone Use on Muscle Fatigue and Pain caused by Forward Head Posture in Adults, *Journal of physical therapy science*, Vol. 28, No. 6, pp. 1669–1672 (2016).

- [8] EFG Co., Ltd.: ALEX PLUS — EFG Co., Ltd., [https://www.enjoyfg.com/brand/alex\\_plus/](https://www.enjoyfg.com/brand/alex_plus/). (Accessed: 2023-12-14).
- [9] Allahyari, T., Sahraneshin Samani, A. and Khalkhali, H.-R.: Validity of the Microsoft Kinect for Measurement of Neck Angle: Comparison with Electrogoniometry, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, Vol. 23, No. 4, pp. 524–532 (2017).
- [10] Lawanont, W., Inoue, M., Mongkolnam, P. and Nukoolkit, C.: Neck Posture Monitoring System Based on Image Detection and Smartphone Sensors Using the Prolonged Usage Classification Concept, *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 13, No. 10, pp. 1501–1510 (online), <https://doi.org/10.1002/tee.22778> (2018).
- [11] Namwongsa, S., Puntumetakul, R., Neubert, M. S. and Boucaut, R.: Factors Associated with Neck Disorders Among University Student Smartphone Users, *Work*, Vol. 61, No. 3, pp. 367–378 (2018).
- [12] Namwongsa, S., Puntumetakul, R., Neubert, M. S. and Boucaut, R.: Effect of Neck Flexion Angles on Neck Muscle Activity Among Smartphone Users with and without Neck Pain, *Ergonomics*, Vol. 62, No. 12, pp. 1524–1533 (2019).
- [13] Kuo, Y. R., Fang, J. J., Wu, C. T., Lin, R. M., Su, P. F. and Lin, C. L.: Analysis of a Customized Cervical Collar to Improve Neck Posture during Smartphone Usage: a Comparative Study in Healthy Subjects, *European Spine Journal*, Vol. 28, No. 8, pp. 1793–1803 (2019).
- [14] Lee, H.-j.: Neck Pain and Functioning in Daily Activities Associated with Smartphone Usage, *The Journal of Korean physical therapy*, Vol. 28, No. 3, pp. 183–188 (2016).
- [15] Ishimatsu, H. and Ueoka, R.: BITAIKA: Development of Self Posture Adjustment System, *Proc. of the 5th Augmented Human International Conference*, pp. 1–2 (2014).
- [16] Kim, J., Lee, N. H., Bae, B.-C. and Cho, J. D.: A Feedback System for the Prevention of Forward Head Posture in Sedentary Work Environments, *Proc. of the 2016 ACM*

- Conference Companion Publication on Designing Interactive Systems*, pp. 161–164 (2016).
- [17] Park, S. Y. and Yoo, W. G.: Effect of EMG-based Feedback on Posture Correction during Computer Operation, *Journal of occupational health*, Vol. 54, No. 4, pp. 271–277 (2012).
- [18] Piñero-Fuentes, E., Canas-Moreno, S., Rios-Navarro, A., Domínguez-Morales, M., Sevillano, J. and Linares-Barranco, A.: A Deep-Learning Based Posture Detection System for Preventing Telework-Related Musculoskeletal Disorders, *Sensors*, Vol. 21, No. 15, p. 5236 (2021).
- [19] Choi, K.-H., Cho, M.-U., Park, C.-W., Kim, S.-Y., Kim, M.-J., Hong, B. and Kong, Y.-K.: A Comparison Study of Posture and Fatigue of Neck According to Monitor Types (Moving and Fixed Monitor) by Using Flexion Relaxation Phenomenon (FRP) and Craniovertebral Angle (CVA), *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 17, No. 17, p. 6345 (2020).
- [20] Breen, P. P., Nisar, A. and O’Laighin, G.: Evaluation of a Single Accelerometer Based Biofeedback System for Real-time Correction of Neck Posture in Computer Users, *2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 7269–7272 (2009).
- [21] Kim, T., Chen, S. and Lach, J.: Detecting and Preventing Forward Head Posture with Wireless Inertial Body Sensor Networks, *2011 International Conference on Body Sensor Networks*, pp. 125–126 (2011).
- [22] Jang, H., Han, H. and Yoon, S.: Comprehensive Monitoring of Bad Head and Shoulder Postures by Wearable Magnetic Sensors and Deep Learning, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 20, No. 22, pp. 13768–13775 (2020).
- [23] Liao, D.-Y.: Design of a Secure, Biofeedback, Head-and-neck Posture Correction System, *2016 IEEE First International Conference on Connected Health: Applications, Systems and Engineering Technologies (CHASE)*, IEEE, pp. 119–124 (2016).

- [24] Chung, H.-Y., Chung, Y.-L. and Liang, C.-Y.: Design and Implementation of a Novel System for Correcting Posture Through the Use of a Wearable Necklace Sensor, *JMIR mHealth and uHealth*, Vol. 7, No. 5, p. e12293 (2019).
- [25] Martins, J., Cerqueira, S. M., Silva, A. F., Catarino, A., Rocha, A. and Santos, C. P.: Towards a Smart-Vest for Forward Posture Monitoring: Improving Usability with E-Textiles, *2023 IEEE 7th Portuguese Meeting on Bioengineering (ENBENG)*, IEEE, pp. 215–218 (2023).
- [26] Lawrence, A., Eapen, A. A., Amitha, M. P., Rajith, R., George, R., Thomas, V. and Jose, J.: Wearable Smart Cervical Collar with Real-time Rehabilitation of Neck Posture Correction, *2022 IEEE 6th Conference on Information and Communication Technology (CICT)*, pp. 1–5 (2022).
- [27] Gupta, H.: Smartphone based cervical spine stress prevention, *Journal of Software Engineering and Applications*, Vol. 11, No. 2, pp. 110–120 (2018).
- [28] Zindahi, S., Rashmi, K. S., Karthik, V. and Kumar, A.: Posture Alert System for Prolonged Neck Flexion While Using Smart Phones, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 912, No. 6, p. 062024 (2020).
- [29] Lee, H., Lee, S., Choi, Y. S., Seo, Y. and Shim, E.: A New Posture Monitoring System for Preventing Physical Illness of Smartphone Users, *2013 IEEE 10th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, IEEE, pp. 713–716 (2013).
- [30] Baños, R. M., Cebolla, A., Oliver, E., Alcañiz, M. and Botella, C.: Efficacy and acceptability of an Internet platform to improve the learning of nutritional knowledge in children: the ETIOBE mates, *Health education research*, Vol. 28, No. 2, pp. 234–248 (2013).
- [31] Fuchslocher, A., Niesenhaus, J. and Krämer, N.: Serious Games for Health: An Empirical Study of the Game “Balance” for Teenagers with Diabetes Mellitus, *Entertainment Computing*, Vol. 2, No. 2, pp. 97–101 (2011).
- [32] Mihajlovic, Z., Popovic, S., Brkic, K. and Cosic, K.: A System for Head-neck Rehabilitation Exercises Based on Serious Gaming and Virtual Reality, *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 77, pp. 19113–19137 (2018).

- [33] Beltran-Alacreu, H., Navarro-Fernández, G., Godia-Lledó, D., Graell-Pasarón, L., Ramos-González, Á., Raya, R., Zugasti, A. M.-P. and Fernandez-Carnero, J.: A Serious Game for Performing Task-oriented Cervical Exercises Among Older Adult Patients with Chronic Neck Pain: Development, Suitability, and Crossover Pilot Study, *JMIR Serious Games*, Vol. 10, No. 1, p. e31404 (2022).
- [34] Roig-Maimó, M. F., Varona, J., Mas-Sansó, R., Mackenzie, I. S. and Salinas-Bueno, I.: Puzzling Patterns: Assessing Neck Range of Motion Using a Mobile Puzzle Exergame, *Proceedings of the XXIV International Conference on Human Computer Interaction*, Interacción '24, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), 10.1145/3657242.3658589 (2024).
- [35] Youssef, A. R., Gumaa, M. and Al-Kabbany, A.: Necknasium: A Virtual Reality Rehabilitation Game for Managing Faulty Neck Posture (2023).
- [36] Asadzadeh, A., Salahzadeh, Z., Samad-Soltani, T. and Rezaei-Hachesu, P.: An Affordable and Immersive Virtual Reality-based Exercise Therapy in Forward Head Posture, *PLOS ONE*, Vol. 19, No. 3, p. e0297863 (online), 10.1371/journal.pone.0297863 (2024).
- [37] Andrew, L., Barwood, D., Boston, J., Masek, M., Bloomfield, L. and Devine, A.: Serious Games for Health Promotion in Adolescents - a Systematic Scoping Review, *Education and information technologies*, Vol. 28, No. 5, pp. 5519–5550 (2023).
- [38] Hope, A., D'Ignazio, C., Hoy, J., Michelson, R., Roberts, J., Krontiris, K. and Zuckerman, E.: Hackathons as Participatory Design: Iterating Feminist Utopias, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–14 (online), 10.1145/3290605.3300291 (2019).
- [39] Birbeck, N., Lawson, S., Morrissey, K., Rapley, T. and Olivier, P.: Self Harmony: Rethinking Hackathons to Design and Critique Digital Technologies for Those Affected by Self-harm, *CHI 2017 - Proceedings of the 2017 ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, United States, ACM, pp. 146–157 (online), 10.1145/3025453.3025931 (2017).

- [40] Schulten, C., Yuan, L., Gama, K., Nolte, A. and Chounta, I.-A.: Exploring the Potential Hackathons as a Means to Promote Understanding of AI Literacy: A Case Study, *Collaboration Technologies and Social Computing: 31st International Conference, CollabTech 2025, Jakarta, Indonesia, November 4–7, 2025, Proceedings*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, p. 244–251 (online), 10.1007/978-3-032-10156-3\_18 (2025).
- [41] 加藤 淳, 後藤 真孝インタラクティブな歌詞駆動型視覚表現「リリックアプリ」開発用フレームワークの提案と実証研究, *情報処理学会論文誌*, Vol. 66, No. 2, pp. 273–285 (オンライン), 10.20729/0002000020 (2025).
- [42] Falk, J., Chen, Y., Rafner, J., Zhang, M., Bjerva, J. and Nolte, A.: How Do Hackathons Foster Creativity? Towards Automated Evaluation of Creativity at Scale, *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '25, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), 10.1145/3706598.3713447 (2025).
- [43] Falk, J., Kannabiran, G. and Hansen, N. B.: What Do Hackathons Do? Understanding Participation in Hackathons Through Program Theory Analysis, *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), 10.1145/3411764.3445198 (2021).
- [44] Lawanont, W., Mongkolnam, P. and Nukoolkit, C.: Smartphone Posture Monitoring System to Prevent Unhealthy Neck Postures, *2015 12th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE)*, IEEE, pp. 331–336 (2015).
- [45] Oyeleke, R. O. and Sorinolu, B. G.: Towards Explainability in mHealth Application for Mitigation of Forward Head Posture in Smartphone Users, *2022 IEEE International Conference on E-health Networking, Application & Services (HealthCom)*, IEEE, pp. 49–55 (2022).
- [46] Ankrum, D. and Nemeth, K. J.: Head and Neck Posture at Computer Workstations - What's Neutral?, *Proc. of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Vol. 44, No. 30, pp. 5–565–5–568 (2000).

- [47] Hempel, T., Abdelrahman, A. A. and Al-Hamadi, A.: 6d Rotation Representation for Unconstrained Head Pose Estimation, *2022 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, IEEE, pp. 2496–2500 (2022).
- [48] Cao, Z., Simon, T., Wei, S.-E. and Sheikh, Y.: Realtime Multi-person 2d Pose Estimation Using Part Affinity Fields, *Proc. of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 7291–7299 (2017).
- [49] Lugaresi, C., Tang, J., Nash, H., McClanahan, C., Uboweja, E., Hays, M., Zhang, F., Chang, C.-L., Yong, M., Lee, J., Chang, W.-T., Hua, W., Georg, M. and Grundmann, M.: MediaPipe: A Framework for Perceiving and Processing Reality, *Third Workshop on Computer Vision for AR/VR at IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) 2019*, (online), [https://mixedreality.cs.cornell.edu/s/NewTitle\\_May1\\_MediaPipe\\_CVPR\\_CV4ARVR\\_Workshop\\_2019.pdf](https://mixedreality.cs.cornell.edu/s/NewTitle_May1_MediaPipe_CVPR_CV4ARVR_Workshop_2019.pdf) (2019).
- [50] Graafland, M. and Schijven, M.: How Serious Games will Improve Healthcare, *Digital health: scaling healthcare to the world*, pp. 139–157 (2018).
- [51] Haruna, H., Zainuddin, Z., Mellecker, R. R., Chu, S. K. and Hu, X.: An Iterative Process for Developing Digital Gamified Sexual Health Education for Adolescent Students in Low-tech Settings, *Information and Learning Sciences*, Vol. 120, No. 11/12, pp. 723–742 (2019).
- [52] 日本速読協会スポーツにも役立つ！？ 数字早押しトレーニングに挑戦 — 速読情報館, <https://www.sokunousokudoku.net/media/?p=766>. Accessed: 2025-02-21.
- [53] Kato, J., Ogata, M., Inoue, T. and Goto, M.: Songle Sync: A Large-Scale Web-based Platform for Controlling Various Devices in Synchronization with Music, *Proceedings of the 26th ACM International Conference on Multimedia, MM '18*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1697–1705 (online), 10.1145/3240508.3240619 (2018).
- [54] 栗原 一貴, 土井伸洋 GameControllerizer : 既存デジタルゲームへの入力をプログラミングするためのミドルウェア, *情報処理学会論文誌*, Vol. 61, No. 11, pp. 1680–1696 (2020).

- [55] Prasch, L., Maruhn, P., Brünn, M., Bengler, K. et al.: Creativity Assessment via Novelty and Usefulness (canu)–Approach to an Easy to Use Objective Test Tool, *Proceedings of the Sixth International Conference on Design Creativity (ICDC 2020)*, pp. 019–026 (2020).
- [56] Torrance, E. P.: *The Minnesota Tests of Creative Thinking*. (1962).
- [57] Gustafsson, E.: Ergonomic Recommendations When Texting on Mobile Phones, *Work*, Vol. 41, No. Suppl 1, pp. 5705–5706 (online), 10.3233/WOR-2012-0925-5705 (2012).
- [58] Ariei, H., Tazawa, M., Ibe, Y., Nakao, Y., Toyama, R., Miyashita, K. and Wada, N.: The Neck Flexion Angle Increases with Difficulty of Tasks Performed on a Smartphone, *Work*, Vol. 80, No. 4, pp. 1761–1768 (online), 10.1177/10519815241297845 (2025).
- [59] Zachary, S., Sarah, W. and Christopher, B.: A Systematic Review of the Effectiveness of Core Stability Exercises in Patients with Non-Specific Low Back Pain, *International Journal of Sports Physical Therapy*, Vol. 17, No. 5, pp. 766–774 (online), 10.26603/001c.37251 (2022).
- [60] Plumbo, G.: Core Muscle Strength — Why it's Important to Maintain, <https://newsnetwork.mayoclinic.org/discussion/core-muscle-strength-why-its-important-to-maintain/> (2012). Mayo Clinic News Network. Accessed: 2025-12-16.

## 研究業績

- [1] 松田 さゆり, 中川 由貴, 船崎 友稀奈, 渡邊 健斗, 大石 琉翔, 中村 聡史, 小松 孝徳, 鳥居 武史, 澄川 瑠一, 高尾 英行: ドレミハンドル: 操舵角に応じた音提示手法の複数種のカーブを用いた検証, 情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , 第 2022-HCI-200 巻, pp. 1-8 (2022).
- [2] 渡邊 健斗, 松田 さゆり, 大石 琉翔, 中川 由貴, 中村 聡史, 小松 孝徳, 鳥居 武史, 澄川 瑠一, 高尾 英行: ドレミハンドルにおける一音階に対する角度幅がカーブ走行の上達に与える影響の調査, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , 第 2023-HCI-201 巻, pp. 1-8 (2023).
- [3] 大石 琉翔, 中川 由貴, 渡邊 健斗, 松田 さゆり, 中村 聡史, 鳥居 武史, 澄川 瑠一, 高尾 英行: 内発的動機付けが運転に及ぼす影響の調査: クリック選択と音声選択の比較, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , 第 2023-HCI-201 巻, pp. 1-8 (2023).
- [4] 渡邊 健斗, 松田 さゆり, 大石 琉翔, 中川 由貴, 小松 孝徳, 鳥居 武史, 澄川 瑠一, 高尾 英行: 操舵角度に応じた音提示の音高変化がカーブ走行時の操舵に及ぼす影響, 信学技報 ヒューマンコミュニケーション基礎研究会 (HCS) , 第 123 巻, pp. 151-156 (2023).
- [5] 松田 さゆり, 渡邊 健斗, 横山 幸大, 青木 由樹乃, 青木 柊八, 中村 聡史, 掛 晃幸, 石丸 築: メロ字ィ: ペンの位置に応じた音階の音提示による手書き文字練習システムの提案, 信学技報 ヒューマンコミュニケーション基礎研究会 (HCS) (2023).
- [6] 松田 さゆり, 渡邊 健斗, 中村 聡史, 小松 孝徳, 鳥居 武史, 澄川 瑠一, 高尾 英行: ドレミハンドル: 操舵角に応じた音階提示手法の AssettoCorsa を用いた複合的なカーブにおける検証, 情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , 第 2023-HCI-204 巻, pp. 1-8 (2023).

- [7] 渡邊 健斗, 中村 聡史: スマートフォン利用時の姿勢矯正に向けた首の角度推定手法の提案, 情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , 第 2024-HCI-206 巻, pp. 1-7 (2024).
- [8] 鳩貝 怜央, 松田 さゆり, 渡邊 健斗, 中村 聡史, 掛 晃幸: メロ字ィ: 手書き練習における軌跡とお手本との距離を考慮したメロディ提示手法, 信学技報, 第 123 巻, pp. 7-12 (2024).
- [9] 松田 さゆり, 渡邊 健斗, 中村 聡史, 鳥居 武史, 高尾 英行, 清水 紗英里: ドレミハンドル: 操舵角に応じた音階提示手法の実車を用いた検証, 信学技報 ヒューマンコミュニケーション基礎研究会 (HCS) (2024).
- [10] 會田 萌々花, 鳩貝 怜央, 渡邊 健斗, 松田 さゆり, 中村 聡史, 掛 晃幸: 手書き文字練習における筆圧に応じたフィードバック手法の比較検証: 音提示と色提示の比較, HCG シンポジウム 2024, No. A-3-1 (2024).
- [11] 渡邊 健斗, 中村 聡史: 上を向いてタップしよう: 首の角度のリアルタイム推定を用いた姿勢矯正を誘導するゲームの実現, 情報処理学会研究報告エンタテインメントコンピューティング (EC) , 第 2025-EC-75 巻, pp. 1-8 (2025).
- [12] Matsuda, S., Nakamura, S., Watanabe, K., Torii, T., Takao, H., Mizuhara, Y. and Shimizu, S.: Sonification-based Steering Assistance for Curve Driving: Evaluations in Virtual and Real-World Environments, in *Proceedings of the International Conference on Auditory Display (ICAD 2025)* (2025).
- [13] Watanabe, K. and Nakamura, S.: Can We Prevent “Text Neck” Using Only a Smartphone? Real-Time Neck Angle Estimation and a Serious Game as a Case Study, in *Proceedings of the 37th Australian Conference on Human-Computer Interaction (OzCHI 2025)*, pp. 356-370 (2025).
- [14] Hatogai, R., Matsuda, S., Watanabe, K., Nakamura, S. and Kake, A.: Don't Break the Melody: Encouraging Accurate Handwriting Practice with Sound Feedback, in *Proceedings of ACM Multimedia Asia 2025 (MMAsia '25)*, pp. 1-7 (2025).
- [15] 渡邊 健斗, 中村 聡史: スマートフォンのみを用いた首の角度リアルタイム推定手法のハッカソンによる応用可能性の検証, 情報処理学会研究報告デジタルコンテンツリエーション (DCC) , 第 2026-DCC-42 巻, pp. 1-8 (2026).