

行動環境センシングによる洗濯行動の最適化支援システムの開発 —デュアル IMU と生成 AI を用いた環境介入型フィードバックの 提案—

島津拓歩^{†1} 佐野睦夫^{†1}

概要: 家事労働における身体的負担の軽減は QoL 向上のための重要な課題であるが、従来のカメラを用いた姿勢推定手法は、プライバシーへの懸念や撮影範囲の死角といった制約から、家庭内での常時利用が困難であった。本研究では、スマートフォン2台（体幹部および上腕部）に内蔵された慣性センサ（IMU）と気圧センサを用い、非映像型で洗濯行動を多角的に評価・改善支援するシステムを提案する。本システムは、重力加速度から体幹前屈角および上腕挙上角を推定し、ISO 11226 基準に基づく客観的な姿勢リスク評価を行う。さらに、気圧変化から階層間の移動効率を分析し、大規模言語モデル（LLM）を用いて、「洗濯カゴを台に乗せる」といった、作業環境への物理的介入を含む具体的かつ受容性の高いフィードバックを生成する。被験者を用いた評価実験の結果、システムのアドバイスに基づく環境改善により、体幹の前屈リスクが劇的に低減（ISO スコア：65 点→93 点）し、上腕の静的負荷も緩和されることを確認した。本研究は、単なる身体動作の矯正に留まらず、ユーザと環境の相互作用を変容させる新たな行動支援のアプローチを示すものである。

1. はじめに

1.1 研究の背景

現代社会において、家事労働の負担軽減と効率化は QoL（Quality of Life）向上のための重要な課題である。中でも洗濯行動は、「投入」「運搬」「干す」「取り込み」「畳む」「収納」といった多段階の工程からなり、家事の中でも拘束時間が長く、立位や中腰、重量物の運搬といった身体的負荷の高い動作を伴う。リンナイ株式会社の意識調査 [1] によれば、洗濯行動を面倒に感じたことのある人は7割を超えており、効率的かつ身体負担の少ない手法の習得が求められている。特に、洗濯機への投入や取り出しに伴う深い前屈動作は、腰部への負担が大きく、腰痛などの筋骨格系障害（Musculoskeletal Disorders: MSDs）を誘発するリスクがある。したがって、人間工学的な観点から洗濯中の姿勢を定量的に評価し、適切な身体の使い方を学習支援するシステムの重要性は高い。

1.2 関連研究と課題

これまで、詳細な姿勢推定においては、OpenPose や MediaPipe [2] といった骨格推定技術を用いた映像解析が主流である。筆者らも先行研究 [3] において、単眼カメラを用いた洗濯姿勢の可視化システムを開発し、その有効性を検証した。しかし、カメラを用いた手法には家庭内導入における大きな障壁が存在する。第一に、脱衣所や寝室といったプライベート空間における撮影への心理的抵抗感（プライバシー問題）である。第二に、死角の問題である。洗濯行動は複数の部屋や階層を移動しながら行われるため、固定カメラの画角内ですべての工程を評価することは困難

である。

1.3 ウェアラブルセンサと生成 AI の活用

映像を用いない代替手法として、身体装着型の慣性センサ（IMU）を用いた行動認識が挙げられる。特に、加速度センサを用いた体幹の前屈角度推定（Inclinometry）は、労働環境における腰部負担評価の手法として確立されており、高い信頼性が報告されている [4]。また、スマートフォンに内蔵される気圧センサは、GPS の届かない屋内環境において、階層移動や立ち座りといった鉛直方向の動作検知に有効であることが示されている [5]。さらに、計測されたデータを行動改善に繋げるためには、ユーザへの効果的なフィードバックが不可欠である。従来のシステムでは、「姿勢が悪い」といったルールベースの定型的な警告に留まることが多く、ユーザのモチベーション維持や具体的な改善行動への誘導（行動変容）には限界があった。近年、大規模言語モデル（LLM）の発展に伴い、個人の文脈に合わせた共感的なコーチングやアドバイス生成が可能となり、ヘルスケア分野での応用が進んでいる [6]。

1.4 本研究の目的

そこで本研究では、スマートフォンに内蔵された慣性計測装置（IMU）を用いた、非映像型の洗濯行動支援システムを提案する。本システムは、ユーザの身体（胸や腰）に装着したスマートフォンのみで計測を行うため、場所を選ばず、かつ映像を記録しない安心感のあるセンシングを実現する。具体的には、重力データから推定した体幹前屈角に対し、ISO 11226（人間工学—静的作業姿勢の評価）に準拠した Porta らの評価手法 [7] に基づき、リスク判定を行う。に基づくリスク判定を行う。さらに、他のセンサから得られる情報を統合し、大規模言語モデル（LLM）を用いることで、単なる数値提示にとどまらない、ユーザが実践

しやすい具体的な行動指針を提示する。

2. 提案システム

2.1 システム構成

提案システムの構成を図1に示す。ユーザはスマートフォンを「体幹部（胸）」と「上腕部」の2箇所に装着し、センサロガーアプリ（Phyphox等）を用いてデータを取得する。PC上の解析システムは、2台の端末間の時刻同期を行った後、キャリブレーションを行い、以下の3つの観点から多角的な評価を行う。

1. 姿勢リスク評価: 重力加速度から各部位の傾斜角を算出し、ISO 11226（静的作業姿勢の評価）[6]に基づくリスク判定を行う。
2. 動作強度解析: 加速度と角速度のピーク値から、動作の滑らかさや衝撃（Impact）を評価する。
3. 移動効率解析: 加速度と気圧データの変動から、無駄を検知する。

時刻同期には上半身と腕をそろえて同時にお辞儀することで同期を行う。キャリブレーションはお辞儀の後の静止で行う。

PC解析エンジンでは、最初にユーザログインを行う。ここでユーザの新規登録も可能である。ユーザ別でログインをすることで複数人のフィードバックを混合することなく管理を行う。次にメインメニューに進み、新規測定と履歴閲覧を選択する。新規測定では、遂行タスクを選択し、体幹のIMUデータと上腕のIMUデータを入力する。履歴閲覧では、同一ユーザが行ったタスクの履歴を閲覧できる。後述するタスクのスコアや詳細レポートのフィードバックを閲覧することができる。新規測定の画面を図2、履歴閲覧画面を図3に示す。

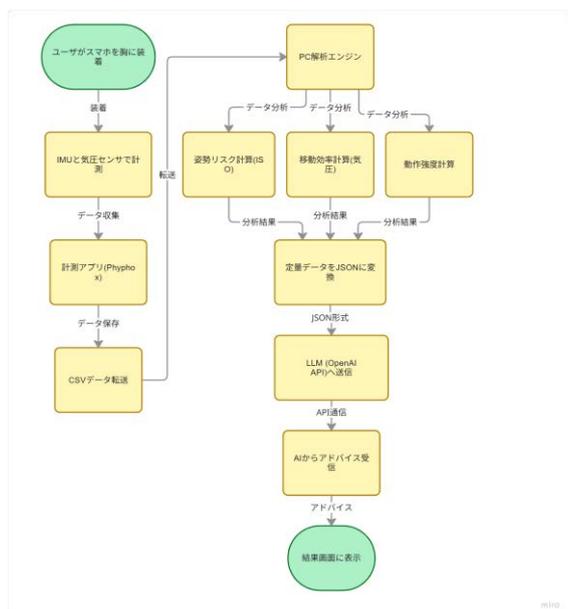


図1 システム構成



図2 新規測定



図3 履歴閲覧画面

2.2 センシングと評価指標

本システムでは、以下の3つの指標を用いて洗濯行動を定量化する。

- (1) ISO 基準に基づく姿勢評価 体幹および上腕の装着端末から得られる重力加速度ベクトルを用い、鉛直方向に対する傾斜角を算出する。傾斜角は式(1)を用いて計算する。

$$\theta = \arccos\left(\frac{a_{target}}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}}\right) \times \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

算出された角度は、ISO 11226（静的作業姿勢の評価）に基づき、各部位ごとに「安全」「注意」「危険」のリスクレベルに分類される。特に体幹の前屈（20°以上/60°以上）と上腕の挙上（20°以上/60°以上）を重点的に評価し、危険域への滞在時間割合から「ISO 姿勢スコア」を算出する。

上腕の傾斜角度に関しては、体幹の傾斜角から上腕の傾斜角を引くことで算出する。この処理を行うことで腕は垂直に垂れているが腰が曲がっている際の肩の負担を計上することができる。

- (2) 動作強度とブレ、無駄の検知 姿勢だけでなく、動作の「質」を評価するために合成加速度と角速度（ジャイロ）、気圧を用いる。「丁寧な動作」は加速度変化が滑らかであるのに対し、「雑な動作（放り投げや急な方向転換）」はス

パイク状の値を及ぼす。本システムでは、最大加速度（衝撃）と最大角速度（ひねり）を監視し、閾値（例: 2.5G, 150dps）を超えた場合に「身体への過剰負荷」として検知する。気圧情報からは階層の移動を検知する。

(3) 総合スコア (Comprehensive Score) の算出 ユーザが直感的に自身のパフォーマンスを把握できるように、上記指標を統合した「総合品質スコア (100 点満点)」を算出する。基本点を 70 点とし、良好な姿勢 (ISO スコア) や滑らかな動作 (低加速度・低ジャイロ) に対して加点を行い、一方で危険な動作 (高衝撃) や長時間の作業に対して減点を行うアルゴリズムを実装した。

2.3 フィードバック生成

数値データの提示だけでは、ユーザが具体的な改善行動 (Actionable Insight) を取ることは難しい。そこで本システムでは、OpenAI API を介して大規模言語モデル (GPT-4o mini) を利用したフィードバック生成機構を実装した。解析モジュールが出力した「ISO 動作スコア」「危険姿勢の発生頻度」「移動効率の判定」に加え、「洗濯機への投入」「干す」といったタスクの種類情報をプロンプト (指示文) として LLM に入力する。LLM は、人間工学に基づいた改善レバー (Improvement Levers) を参照し、例えば「洗濯カゴを床ではなく台の上に置くことで、前屈角度を緩和してください」といった、個別の状況に即した具体的なコーチングメッセージを生成する。本システムでは、同じタスクを行ったことがある場合に、前回の履歴と比較する機能も備わっている。AI フィードバックの生成例を図 4 に示す。

システム利用者自身が数値的な体の動きを理解するために体幹と上腕の入力データを統合しグラフにまとめたものも提示する。グラフで傾斜角だけでなく体のひねりの速度や激しい動き、階層の移動を読み取れるようになっている。グラフではユーザの体幹データは橙色、上腕のデータは青色で記されており、角度、加速度、ジャイロ、気圧の情報を得ることができる。提示されるセンサグラフ例を図 5 に示す。

また、ユーザが視覚的に自らの行動を振り返られるようにセンサデータから仮想のアバターを生成し背中動きと腕の動きの推定アニメーションを生成する。アニメーションの生成例を図 6 に示す。図中左側が側面からの推定アニメーション、図中右側が上からの見降ろしの推定アニメーションである。図 6 のアニメーションでは実際には図 7 の耐性を取っていた際の構図である。アニメーションがグラフのどの部分を指しているのかが分かるようにグラフ上に赤い線を示す。

ユーザがフィードバックを受ける際は、AI のフィードバックとグラフ、アニメーションが一画面に収まる形で提示される。実際のフィードバック提示例を図 8 に示す。

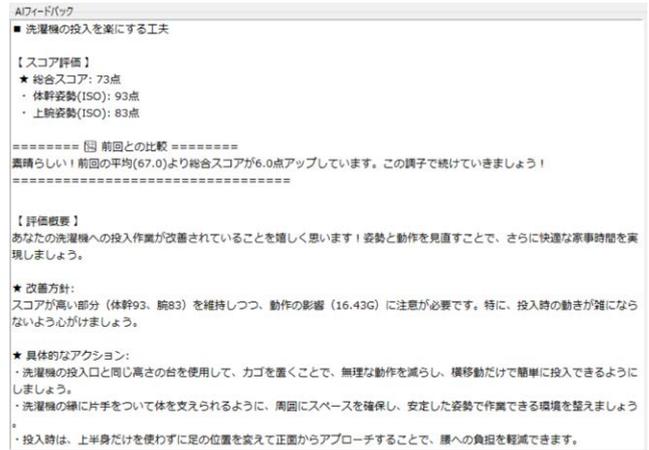


図 4 AI フィードバック生成

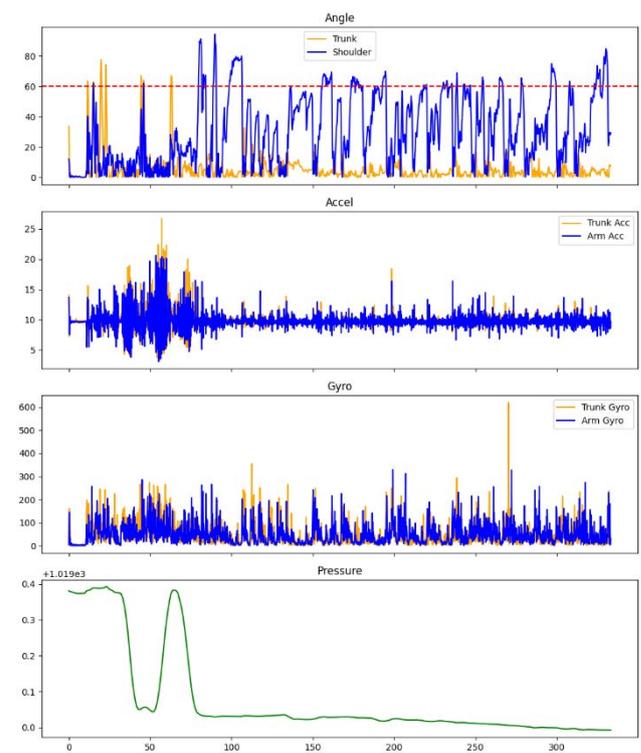


図 5 センサグラフ

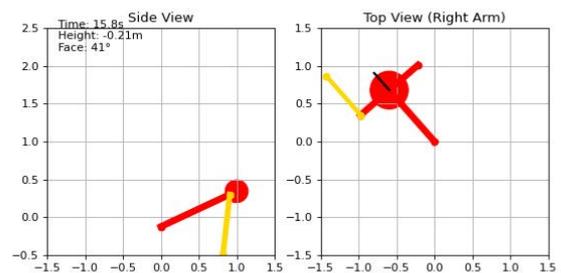


図 6 生成アニメーション



図 7 図 6 時の実際の姿勢

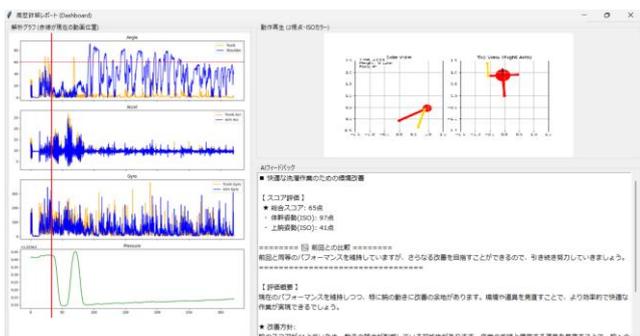


図 8 提示されるフィードバック例

3. 実験と結果

3.1 実験概要

提案システムの有効性を検証するため、被験者（大学生 1 名）を対象に評価実験を行った。被験者はスマートフォン 2 台（体幹部および上腕部）を装着し、以下の 2 種類のタスクを行った。

- タスク A (単一作業)：洗濯カゴから衣類を取り出し、洗濯機へ投入する。
- タスク B (複合作業)：1 階で洗濯物を回収し、2 階ペランダへ運搬して干す。

実験は「ベースライン (実験 1 回目)」、「実験 2 回目」、「実験 3 回目」の 3 段階で実施し、システムが提示するフィードバック (FB) によって行動がどう変容し、スコアがどう

推移するかを検証した。

3.2 実験 1:洗濯機への投入タスク

まず、身体負荷の高い「深い前屈」が発生しやすい投入動作において検証を行った。実験でのスコアの表を表 1 に示す。

(1) ベースライン (1 回目) 通常の床置きカゴを使用した作業では、体幹の前屈角が頻繁に危険域 (60 度以上) を超過し、体幹 ISO スコアは 65 点に留まった。また、動作の荒さを示す最大加速度は 18.8G と高い値を示した。これに対しシステムは「Medium Risk」と判定し、「洗濯カゴを台の上に乗せる」という環境改善の FB を提示した。

(2) 2 回目の実験では、FB に基づきカゴを高さ約 40cm の椅子に設置した結果、体幹 ISO スコアは 93 点へと劇的に向上した。物理的に前屈する必要がなくなったため、赤ゾーン (危険域) への滞在が消失したことが確認された。一方で、AI は次なる課題として「腕の動作」に着目し、「カウンターバランス (足を引く動作)」による身体安定化を提案した。

(3) 3 回目の実験では、環境改善に加え、AI が提案した身体スキルを意識した結果、上腕 ISO スコアが 83 点から 92 点へ向上し、最大加速度も 13.8G まで減少した。表 1 にタスク A の結果まとめる。環境 (台) と身体 (スキル) の両面からのアプローチにより、身体負担と動作の質の両方が最適化されたことがわかる。実験一回目のセンサグラフを図 9、実験三回目の結果を図 10 に示す。

表 1 タスク A のスコア結果

評価項目	実験 1 回目	実験 2 回目	実験 3 回目
総合スコア (点)	67	73	74
体幹 ISO スコア (点)	65	93	93
上腕 ISO スコア (点)	67	83	92
最大加速度 (G)	18.8	16.4	13.8

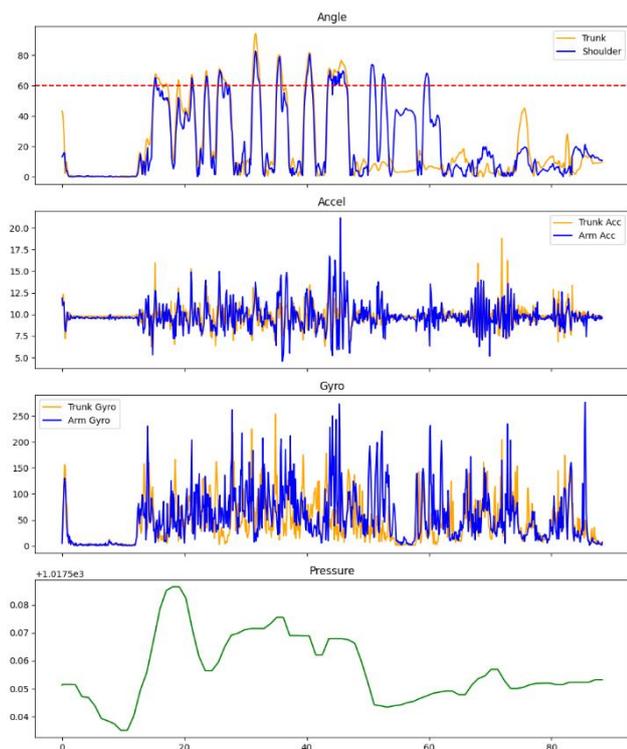


図 9 タスク A 実験一回目

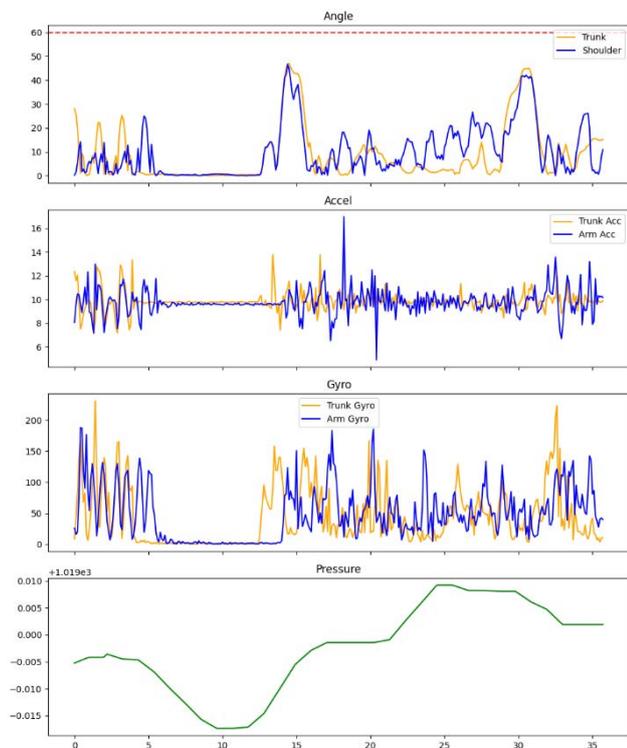


図 10 タスク A 実験三回目

実験 2 : 複合タスク (回収～運搬～干す)

次に、移動や高所作業を含む複合的な家事行動において検証を行った。実験でのスコアの表を表 2 に示す。

(1) ベースライン (1 回目) 1 階から 2 階への運搬を含む

作業を行った結果、気圧センサは階層移動を正確に検知した。しかし、上腕 ISO スコアは 0 点という極めて低い値を記録した。これは、低い位置のカゴから高い物干し竿へ干す際、腕を挙上し続ける「静的負荷」が発生したためである。システムは「干し場にも台を設置し、高低差を減らす」よう FB を行った。

(2) 2 回目の実験では、ベランダに台を設置しカゴを高くした結果、上腕 ISO スコアは 0 点から 41 点へと有意に回復した。腕を下ろす時間が生まれたことで、血流障害のリスクが低減されたといえる。しかし、重いカゴを手で運搬する際の衝撃 (加速度 27.1G) は依然として高く、システムは「ワゴンの利用」を提案した。

(3) 3 回目の実験では、キャスター付きワゴンによる運搬は難易度が高く実行することはできなかったが、姿勢に対する意識をより強く実験を行うと、上腕スコアは 49 点まで向上した。なお、最大加速度 (26.7G) や角速度 (619dps) の数値は減少しなかった。効果的な FB は提示されなかったが行動変容という観点では、実験の目的は達成された。実験一回目のセンサグラフを図 1 1、実験三回目の結果を図 1 2 に示す。

表 2 タスク B のスコア結果

評価項目	実験 1 回目	実験 2 回目	実験 3 回目
総合スコア (点)	60	65	65
体幹 ISO スコア (点)	73	97	96
上腕 ISO スコア (点)	0	41	49
最大加速度 (G)	28.6	27.1	26.7

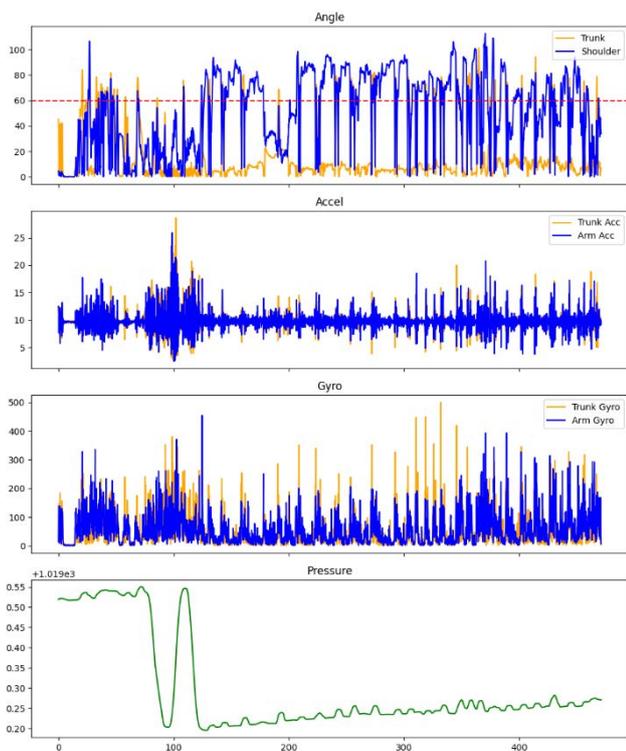


図 11 タスク B 実験一回目

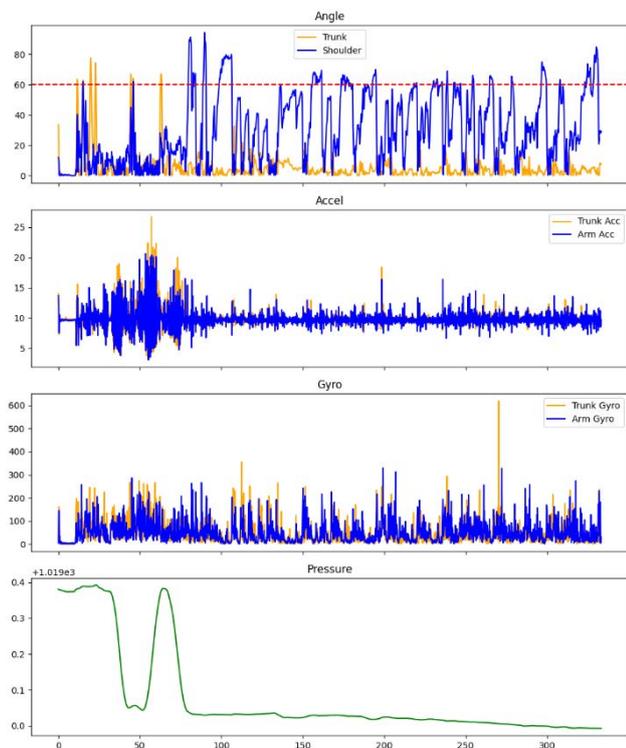


図 12 タスク B 実験三回目

4. おわりに

本研究では、スマートフォン内蔵センサと生成 AI を用いた洗濯行動支援システムを開発した。実験の結果、ISO

基準に基づく客観的な姿勢評価と、AI による具体的なフィードバック（環境改善・道具利用の提案）により、ユーザの姿勢リスクが大幅に低減されることを確認した。特に、単なる「姿勢の矯正」ではなく、「洗濯カゴを台の上に乗せる」といった環境要因への介入が、即効性のある負担軽減に繋がることが示された。今後は、IMU では検知困難な「重量負荷」を推定する手法の検討や、長期的な利用による行動定着率の検証を進める予定である。

参考文献

- [1] リンナイ株式会社: “洗濯に関する意識調査 半数が洗濯迷子！生乾き臭には熱湯が効果的”, ニュースリリース, 2025 年 7 月 23 日.
<https://www.rinnai.co.jp/releases/2025/0723/images/releases20250723.pdf>. (参照 2025-12-20).
- [2] Lugaresi, C. et al.: MediaPipe: A Framework for Perceiving and Processing Reality, CVPR Workshop on Computer Vision for AR/VR, 2019.
- [3] 島津拓歩, 佐野睦夫: 行動環境センシングによる洗濯行動の最適化・改善アプリの開発と検証, 2025 年度情報処理学会関西支部 支部大会講演論文集, G-01, 2025.
- [4] Brandl, C. et al.: Evaluation of In-Cloth versus On-Skin Sensors for Measuring Trunk and Upper Arm Postures and Movements, *Sensors*, Vol.23, No.9, 4268, 2023.
- [5] Van Gaalen, K. et al.: Barometer-based indoor localization with crowdsourced landmarks, *IoT Journal*, 2022.
- [6] Ayers, J. W. et al.: Comparing Physician and Artificial Intelligence Chatbot Responses to Patient Questions Posted to a Public Social Media Forum, *JAMA Internal Medicine*, Vol.183, No.6, pp.589-596, 2023. Validity and reliability of triangulation
- [7] n for estimating trunk angles, *Journal of Biomechanics*