

令和 7 年度 卒業論文

スマートフォン IMU を用いた
リアルタイム PC 操作のための
実用的ジェスチャインタフェース

指導教員	岡部 誠 准教授
提出者	50216016 河田 旭瑠
提出日	2026 年 2 月 12 日

目次

第1章 はじめに	4
第2章 関連研究	5
2.1 手持ち入力と hands-free 入力	5
2.2 カメラベースと慣性センサベース	5
2.3 深層学習とテンプレートマッチング	5
第3章 提案手法	6
3.1 システム概要	6
3.2 センサ取得と前処理	6
3.2.1 取得データ	6
3.2.2 基準姿勢と差分量	7
3.2.3 欠損値・更新停止の扱い	7
3.3 キャリブレーション	7
3.4 基本ジェスチャ認識	8
3.4.1 射影スコア	8
3.4.2 動的閾値（強度×係数）	8
3.4.3 双方向判定	9
3.4.4 ヒステリシスと実行間隔	9
3.4.5 角速度によるゲーティング	9
3.5 ロールジェスチャ認識	10

3.6 自由ジェスチャ認識.....	11
3.6.1 特徴系列	11
3.6.2 固定長化（線形リサンプリング）	11
3.6.3 Z正規化.....	11
3.6.4 ベクトル化とコサイン類似度.....	11
3.7 アクション実行と安全機構.....	12
3.8 ユーザインタフェース	14
第4章 結果と考察	15
4.1 ジェスチャ認識精度の評価.....	15
4.1.1 実験1：ユーザ係数調整前の基礎特性.....	15
4.1.2 実験2：ユーザ係数調整後の基礎特性.....	16
4.2 ユーザテスト	16
4.2.1 実験手順	17
4.2.2 実験結果とアンケート	17
第5章 まとめと今後の展望.....	19
5.1 まとめ	19
5.2 今後の展望.....	19
謝辞	20
参考文献.....	21

第1章 はじめに

2020年代に入り、PC・スマートフォンに加えてスマートウォッチやXRデバイス等を含む多様な端末利用を前提とした計算環境が議論されてきた[1][2][3]。しかし入力には依然としてキーボード・マウスやタッチ操作が中心であり、会議中や作業中など hands-busy (両手が塞がった) 状況では「触れずに素早く操作したい」という要求に対して負担が残る。この問題に対し、場所や姿勢に縛られにくいジェスチャ入力が研究されてきた[4]。一方、実環境で継続利用するには、認識精度に加えて導入負担、環境依存、誤動作時の安全性、省電力性といった要素も重要であり、省電力性は継続利用の観点で課題となり得る[5]。

既存のジェスチャ認識は、カメラに基づく手法(骨格推定・ハンドトラッキング等)[6]と、慣性センサ(加速度・ジャイロ)に基づく手法に大別できる。前者は遮蔽や照明条件により追跡精度が変動し得る[7]ほか、常時撮影に伴うプライバシー懸念が残る。後者は死角に強いが、手持ちや手首装着を前提とする場合が多く、hands-busy 環境での実用性に課題がある[4][8]。そこで本研究では、胸ポケット内のスマートフォン内蔵 IMU で体幹動作を検出し、PC のショートカット操作へ変換する hands-free 入力を提案する。提案システムの全体構成を図1に示す。既存のショートカット文化(例: Emacs のキーバインド体系[9][10])と接続し、学習コストの低減を狙う。

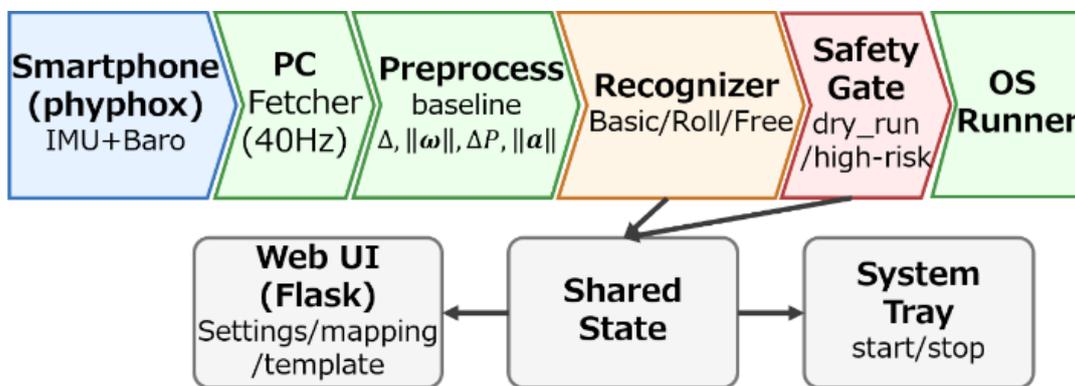


図1 IMU Gesture の全体構成.

第 2 章 関連研究

2.1 手持ち入力と hands-free 入力

hands-free 入力として、手首装着デバイス[11]やリング型多指ジェスチャ[12]、腕・手首回転によるショートカット拡張[8]が提案され、HMD では頭部動作入力[13]、スマートウォッチの光学式センサを用いた入力[14]も報告されている。一方、スマートフォン手持ち方式 (uWave[4]) や手首装着方式では、hands-busy 環境で付随運動がノイズとなり誤動作を誘発し得る[8]ほか、持ち直しによるホーミング時間増大が作業効率を低下させる[15]ため、本研究では体幹 (胸ポケット) を入力部位として採用する。

2.2 カメラベースと慣性センサベース

MediaPipe[6]などによりカメラベースのジェスチャ認識は広く利用可能になった一方、遮蔽や環境条件により追跡精度が変動し得る点が指摘されている[7]。これに対し IMU は死角や照明に依存しにくい。胸部装着 IMU の応用と課題は総説で整理され[16]、複数センサ統合による姿勢推定 (Pose-on-the-Go[17]、BaroPoser[18]) や装着多様性[19][20]、スマートフォンでの計測妥当性[21]、IMU 融合[22]などが報告されている。

2.3 深層学習とテンプレートマッチング

センサ時系列の認識では CNN や LSTM 等の深層学習が主流であり、高精度化が進んでいる[23]。一方、個人差やその場で定義した新規ジェスチャへの対応では再学習が必要となる場合があり、即時利用の観点で負担となる。ユーザ定義ジェスチャの登録・学習支援の枠組みも提案されている[24]。本研究では、少数回の登録で利用可能なテンプレートマッチング (例: \$1 Recognizer[25]) を採用し、即時性と軽量性を重視する。ショートカット拡張に関しては発見支援[26]や入力手法の拡張[8][27][28]も報告されている。

第3章 提案手法

3.1 システム概要

提案システム「IMU Gesture」は、スマートフォンで計測したセンサ値を PC へ送信し、PC 側でジェスチャ認識と OS 操作（キーボード／マウスイベント）を実行するクライアント・サーバ型入力インタフェースである（図 1）。スマートフォン側では phyphox[29]で内蔵センサ値を取得し、HTTP 経由で JSON として配信する[30]。PC 側は一定周期で取得したセンサ値を前処理し、認識結果に応じて OS へ入力イベントを送信する。PC 側は 40 Hz でサンプルを取得し、基準姿勢（baseline）差分 Δ 、角速度ノルム $\|\omega\|$ 、気圧差分 ΔP 、加速度ノルム $\|a\|$ などを算出する。その後、Basic/Roll/Free の順に判定し、Safety Gate（Dry-run, 高リスク制御）を経て OS 入力として実行する。PC 側には設定変更・テンプレート登録を行う Web UI とログ出力モードを備える。処理は判定ループ、Web UI (Flask)、System Tray の 3 系統で構成され、Shared State に集約して排他制御する。以降、基本ジェスチャを Basic、ロールジェスチャを Roll、自由ジェスチャを Free と表記する。

3.2 センサ取得と前処理

角度は (deg) 角速度は (deg/s) 気圧は (hPa) として扱う。

3.2.1 取得データ

本システムは胸ポケットにスマートフォンを装着した状態で動作し、以下の値を利用する。

- ・姿勢角（ヨー・ピッチ・ロール： θ_{yaw} , θ_{pitch} , θ_{roll} ）
- ・角速度（3 軸： ω_x , ω_y , ω_z ）
- ・気圧 (P)
- ・加速度（3 軸： a_x , a_y , a_z ）

PC 側では、姿勢角は基準姿勢との差分として扱い、気圧は直前値との差分（変化量）として扱う。また自由ジェスチャ（テンプレート照合）では、加速度 3 軸そのものではなく、3 軸から算出した加速度ノルム（大きさ）を特徴量として用いる。時刻 t の加速度 3 軸を $a_x(t)$, $a_y(t)$, $a_z(t)$ とすると、加速度ノルム $\|\mathbf{a}(t)\|$ は

$$\|\mathbf{a}(t)\| = \sqrt{a_x(t)^2 + a_y(t)^2 + a_z(t)^2}$$

で与えられる。

3.2.2 基準姿勢と差分量

装着状態（胸ポケット内での向き）や個人差の影響を抑えるため、起動時（または再キャリブレーション時）に基準姿勢を計測する。基準姿勢は開始後3秒間の姿勢角平均として求め、固定値として保持する。再キャリブレーションはユーザ操作で任意に実行できる。基準姿勢を

$$\boldsymbol{\theta}_{\text{base}} = [\theta_{\text{yaw}}^{\text{base}}, \theta_{\text{pitch}}^{\text{base}}, \theta_{\text{roll}}^{\text{base}}]^T$$

とし、時刻 t の姿勢角を

$$\boldsymbol{\theta}_t = [\theta_{\text{yaw}}(t), \theta_{\text{pitch}}(t), \theta_{\text{roll}}(t)]^T$$

とする。本システムが用いる差分ベクトルは

$$\mathbf{v}_t = [\Delta\theta_{\text{yaw}}(t), \Delta\theta_{\text{pitch}}(t), \Delta\theta_{\text{roll}}(t)]^T$$

である。ここで角度は周期性を持つため、差分角は循環量として扱い、最終的に $[-180, 180)$ に写像した値を用いる。すなわち、

$$\begin{aligned} \text{wrap}_{[-180, 180)}(x) &= ((x + 180) \bmod 360) - 180 \\ \Delta\theta_{\alpha}(t) &= \text{wrap}_{[-180, 180)}(\theta_{\alpha}(t) - \theta_{\alpha}^{\text{base}}), \alpha \in \{\text{yaw}, \text{pitch}, \text{roll}\} \end{aligned}$$

により算出する。

気圧については、直前の値 $P(t - \Delta t)$ との差分

$$\Delta P(t) = P(t) - P(t - \Delta t)$$

を計算し、テンプレート照合用の特徴量として利用する。

3.2.3 欠損値・更新停止の扱い

HTTP 取得では値の欠損やタイムスタンプ停止により、同一データが繰り返される場合がある。本実装では、姿勢角・角速度の欠損周期、およびタイムスタンプ非更新周期を無効サンプルとして扱い、当該周期の処理をスキップする。気圧・加速度の欠損は照合を不定にして発火しにくくなる一方、欠損が継続すると無反応が増える可能性がある。

3.3 キャリブレーション

基本ジェスチャおよびロール判定では、個人差（差分姿勢の出やすい方向）や装着向きに起因する符号反転を吸収するため、起動時（または任意タイミング）にキャリブレーションを行う（図2）。キャリブレーションでは、(1)基準姿勢の取得、(2)前後・左右方向ベクトルと強度、(3)ロール符号（ROLL_SIGN）を推定する。得られたパラメータは以降の判定に用い、Web UI から係数を調整して感度を微調整できる。

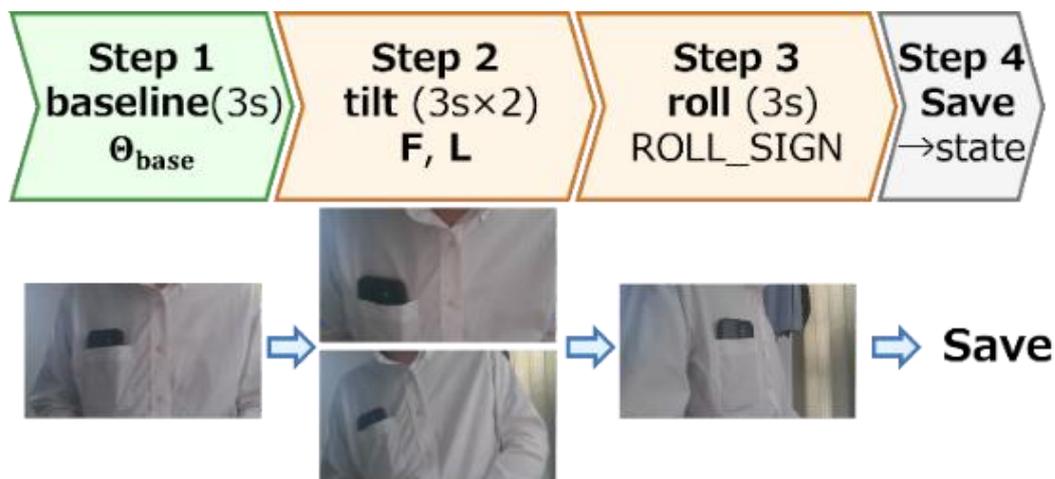


図2 キャリブレーション手順とその様子.

Step 1 で基準姿勢 θ_{base} を取得. Step 2 では前後・左右方向ベクトル \mathbf{F}, \mathbf{L} と閾値基準（強度）を推定. Step 3 ではロール方向の符号（装着向き補正）と強度を推定. 推定値は Shared State に保存され, Web UI から係数調整が可能.

3.4 基本ジェスチャ認識

3.4.1 射影スコア

基本ジェスチャ（前後・左右）は, キャリブレーションにより取得した基準方向を用いて判定する. 前後用の基準方向ベクトルを \mathbf{F} , 左右用の基準方向ベクトルを \mathbf{L} として, 差分ベクトル \mathbf{v}_t との内積

$$S_{\text{fwd}}(t) = \mathbf{v}_t^T \cdot \mathbf{F}, \quad S_{\text{side}}(t) = \mathbf{v}_t^T \cdot \mathbf{L}$$

をスコアとして用いる.

3.4.2 動的閾値（強度×係数）

キャリブレーションで得られる動作の大きさ（強度）を $M_F = \|\mathbf{F}\|$, $M_L = \|\mathbf{L}\|$ とし, ユーザ係数を k_{fwd} , k_{side} とすると, 判定閾値は

$$T_{\text{fwd}} = M_F k_{\text{fwd}}, \quad T_{\text{side}} = M_L k_{\text{side}}$$

で与える. これにより, ユーザごとの動作の大きさ（個人差）を基準にしながら, 係数により感度を調整できる.

3.4.3 双方向判定

前後は $S_{\text{fwd}}(t)$ の符号より Forward/Backward を判定する：

$$\text{Forward} \Leftrightarrow S_{\text{fwd}}(t) > T_{\text{fwd}}, \quad \text{Backward} \Leftrightarrow S_{\text{fwd}}(t) < -T_{\text{fwd}}$$

左右も同様に

$$\text{Left} \Leftrightarrow S_{\text{side}}(t) > T_{\text{side}}, \quad \text{Right} \Leftrightarrow S_{\text{side}}(t) < -T_{\text{side}}$$

とする。

3.4.4 ヒステリシスと実行間隔

閾値境界付近のチャタリングを抑えるため、状態はヒステリシスを持つ。一度発動状態に入った後は、スコア絶対値が閾値の一定割合 ρ を下回るまで中立状態へ戻らない。例えば前後の中立復帰条件は

$$|S_{\text{fwd}}(t)| < \rho T_{\text{fwd}}$$

である。状態遷移の概念を図3に示す。

また連続発火を抑えるため、ジェスチャ実行には最小間隔を設け、直近の発火時刻との差がこの値を超える場合のみ実行する。

3.4.5 角速度によるゲーティング

基本ジェスチャ判定では、歩行などの大きな体動に伴う誤発火を抑制するため、角速度に基づくゲーティングを行う。時刻 t の角速度3軸を $\omega_x(t)$ 、 $\omega_y(t)$ 、 $\omega_z(t)$ とすると、角速度ノルム $\|\boldsymbol{\omega}(t)\|$ は

$$\|\boldsymbol{\omega}(t)\| = \sqrt{\omega_x(t)^2 + \omega_y(t)^2 + \omega_z(t)^2}$$

で与えられる。本システムは $\|\boldsymbol{\omega}(t)\| \leq \Omega_{\text{max}}$ （設定パラメータ）のときのみ基本ジェスチャ判定を有効とし、超過時は当該周期を無効とする。

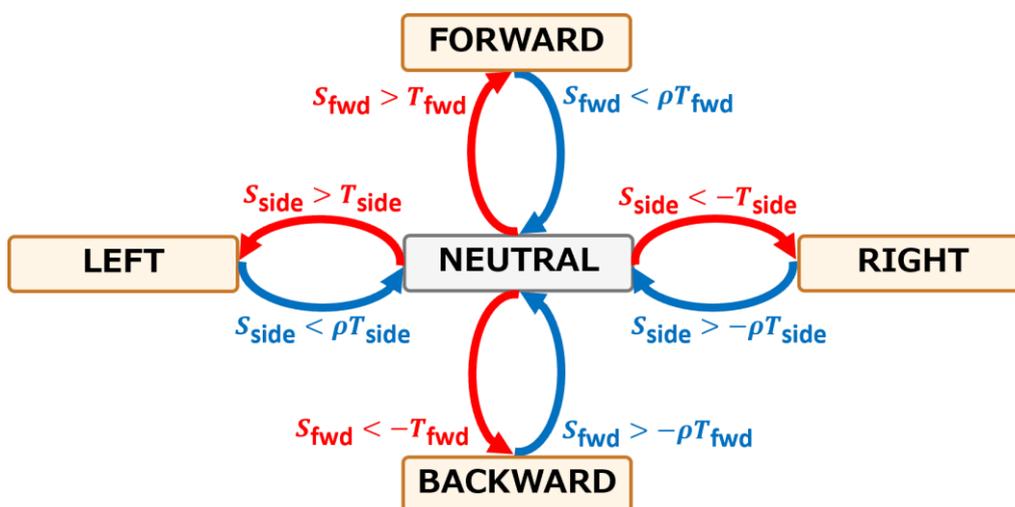


図3 基本ジェスチャ(前後・左右)の状態遷移.

スコアが閾値を超えると各状態へ遷移し，復帰条件に ρ を導入してチャタリングを抑制．連続発火は最小実行間隔で抑え，判定は角速度ゲート通過時のみ有効．

3.5 ロールジェスチャ認識

ロール判定は，装着向きによる符号反転を補正するため，キャリブレーションで得た $ROLL_SIGN \in \{+1, -1\}$ を用いて補正した量 $R(t) = \widetilde{\Delta\theta}_{roll}(t) \cdot ROLL_SIGN$ を評価する．ここで，極端な姿勢での誤判定を抑えるため，

$$\begin{aligned} \widetilde{\Delta\theta}_{roll}(t) &= \Delta\theta_{roll}(t) I(|\Delta\theta_{roll}(t)| \leq 90) \\ I(C) &= 1 (C:\text{true}), \quad I(C) = 0 (C:\text{false}) \end{aligned}$$

とする．ロールは回転を伴う動作であるため， $\|\omega(t)\| \geq \Omega_{min}$ (Ω_{min} は設定パラメータ) のときのみ判定する．

閾値はキャリブレーションで得た強度 M_R と係数 k_{roll} により

$$T_{roll} = M_R k_{roll}$$

とし，

$$Roll_Right \Leftrightarrow R(t) > T_{roll}, \quad Roll_Left \Leftrightarrow R(t) < -T_{roll}$$

と判定する．さらに，左右傾きとロールが短時間に連続して発火しないように，傾き・ロールの直後一定時間は他方を抑制するミュートクセス時間を設ける．ロール判定部の位置づけは処理フロー図 (図6) に示す．

3.6 自由ジェスチャ認識

3.6.1 特徴系列

自由ジェスチャは、ユーザが開始・終了操作により動作区間を明示し、その区間をテンプレート照合により認識する方式である。時刻 t で得られる特徴量を

$$x(t) = [\Delta\theta_{\text{yaw}}(t), \Delta\theta_{\text{pitch}}(t), \Delta\theta_{\text{roll}}(t), \|\boldsymbol{\omega}(t)\|, \Delta P(t), \|\boldsymbol{a}(t)\|]$$

として時系列バッファに蓄積し、入力区間（サンプル数 T ）をテンプレート照合のため固定長 N に正規化する。 N および照合閾値は設定ファイルで管理し、Web UI から調整可能とした。

3.6.2 固定長化（線形リサンプリング）

動作速度差を吸収するため、入力系列長 T を固定長 N へ線形補間に変換し、固定長系列 $x'(i)$ ($i = 1, \dots, N$) を得る。 $\tau = i \cdot \frac{T-1}{N-1}$ を元データ上の対応時刻、 $\alpha = \tau - \lfloor \tau \rfloor$ を補間係数として以下のように補間する。

$$x'(i) = (1 - \alpha)x(\lfloor \tau \rfloor) + \alpha x(\lceil \tau \rceil)$$

ここで、 $\lfloor \cdot \rfloor$ は床関数、 $\lceil \cdot \rceil$ は天井関数を表す。

3.6.3 Z 正規化

次元ごとのスケール差を抑えるため、固定長系列に対して次元独立の Z 正規化を行う：

$$z(i) = \frac{x'(i) - \mu}{\sigma + \varepsilon}$$

ここで μ, σ は系列全体の平均・標準偏差、 ε はゼロ除算防止の微小項である。

3.6.4 ベクトル化とコサイン類似度

本研究は \$1 Recognizer[25] の「少数例テンプレート照合」という思想を援用し、IMU の多次元時系列に対して固定長化と正規化を行った上で類似度計算により照合する。正規化後の系列 $z(i)$ を縦に連結して特徴ベクトル \mathbf{v} を作成し、テンプレートベクトル \mathbf{v}_{tpl} と入力ベクトル \mathbf{v}_{in} のコサイン類似度

$$\text{sim} = \frac{\mathbf{v}_{\text{tpl}}^T \cdot \mathbf{v}_{\text{in}}}{\|\mathbf{v}_{\text{tpl}}\| \|\mathbf{v}_{\text{in}}\| + \varepsilon}$$

を計算する。複数テンプレートのうち最もスコアが高いものを採用し、スコアがテンプレートに保存された閾値以上であれば当該ジェスチャとして発火させる。また本システム

は、テンプレートが保持するチャンネル集合と実行時に利用可能なチャンネル集合の共通部分のみで比較することで、次元欠けが生じても照合可能とし頑健性を向上させる（図4）。誤連発を抑えるため、テンプレートごとにクールダウン時間を設け、同一テンプレートの再発火を禁止する。

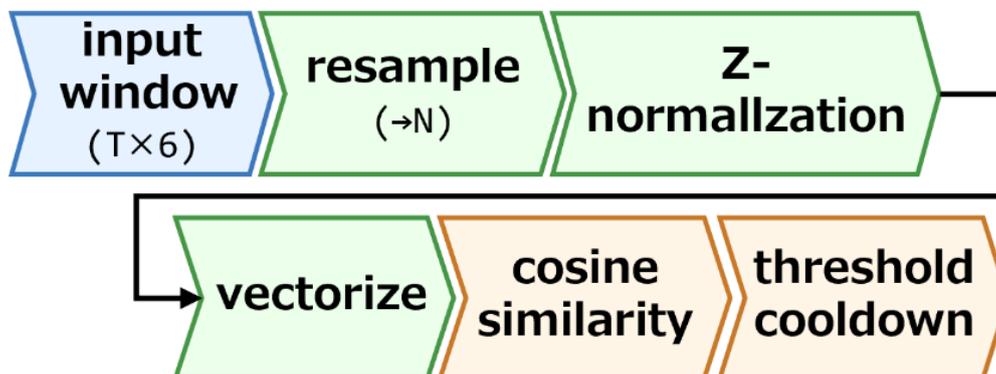


図4 自由ジェスチャ(テンプレート照合)の処理。

入力区間を固定長化，Z正規化後にベクトル化してコサイン類似度を計算，
閾値判定とクールダウンにより制御。

3.7 アクション実行と安全機構

ジェスチャが認識されると、あらかじめ設定された「ジェスチャー→アクション」対応に従ってOS操作を実行する。誤認識時に影響が大きい操作（作業中断，未保存データの消失，意図しないセキュリティ状態の変更等）を「高リスク操作」と定義し，実行直前にSafety Gateで制御する。高リスク操作は許可設定が有効なときのみ実行する。高リスク判定は危険とみなす操作列を正規表現パターンとして管理し，入力コマンド列が一致した場合にブロックする。これにより，修飾キー表記や空白差などの表記揺れを含めて検出できる。

また安全な導入と動作確認のため，OS操作を送信せずログ出力のみを行うDry-runモードを備える。Safety Gateの動作例を図5に示す。図5ではCtrl+;を高リスク操作に設定し，Dry-runではOS操作を実行せずログのみ出力（左上），Liveでは通常操作は実行（右上），高リスク操作は許可設定が有効な場合のみ実行（左下/右下）する様子を示す。処理フロー上の位置づけは図6のとおりである。

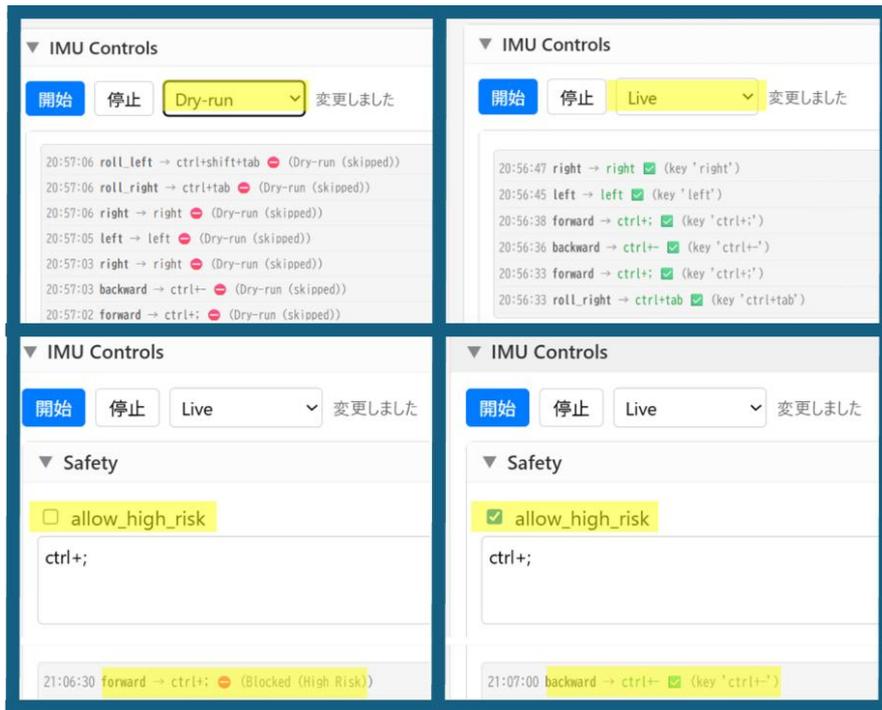


図 5 Safety Gate の動作規則。

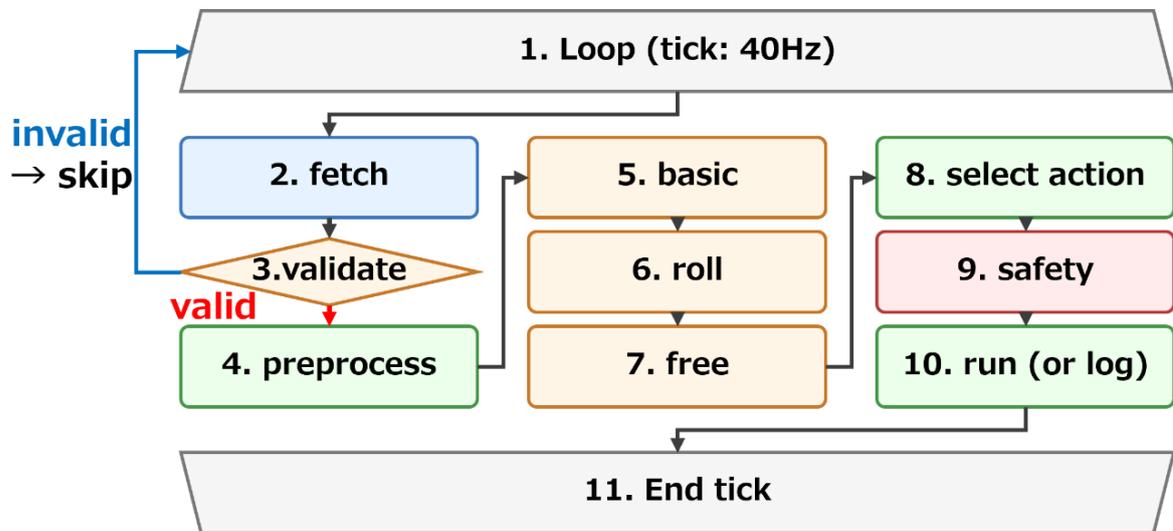


図 6 ジェスチャ判定ループの処理フロー。

各周期でサンプルを取得し，妥当性検証後に前処理を行う．続いて Basic/Roll/Free を順に評価して実行候補を決定し，Safety Gate により dry-run/高リスク設定に応じて実行またはログ出力を行う．同一周期に複数候補が成立した場合は，誤発火抑制のため優先順位 (Basic→Roll→Free) に従い 1 件のみ採用する．

3.8 ユーザインタフェース

Web UI はローカルで動作する Flask サーバとして実装し、状態表示と設定変更を提供する。基本ジェスチャ係数、実行間隔、安全設定、実行モードに加え、自由ジェスチャの録画・保存（閾値、クールダウン等）とマッピング編集・プロファイル切替を行える。既存のショートカット文化に基づく割当を登録でき、利用者の操作知識を活用する設計とする[9][10]。Web UI の画面構成例を図7に示す。

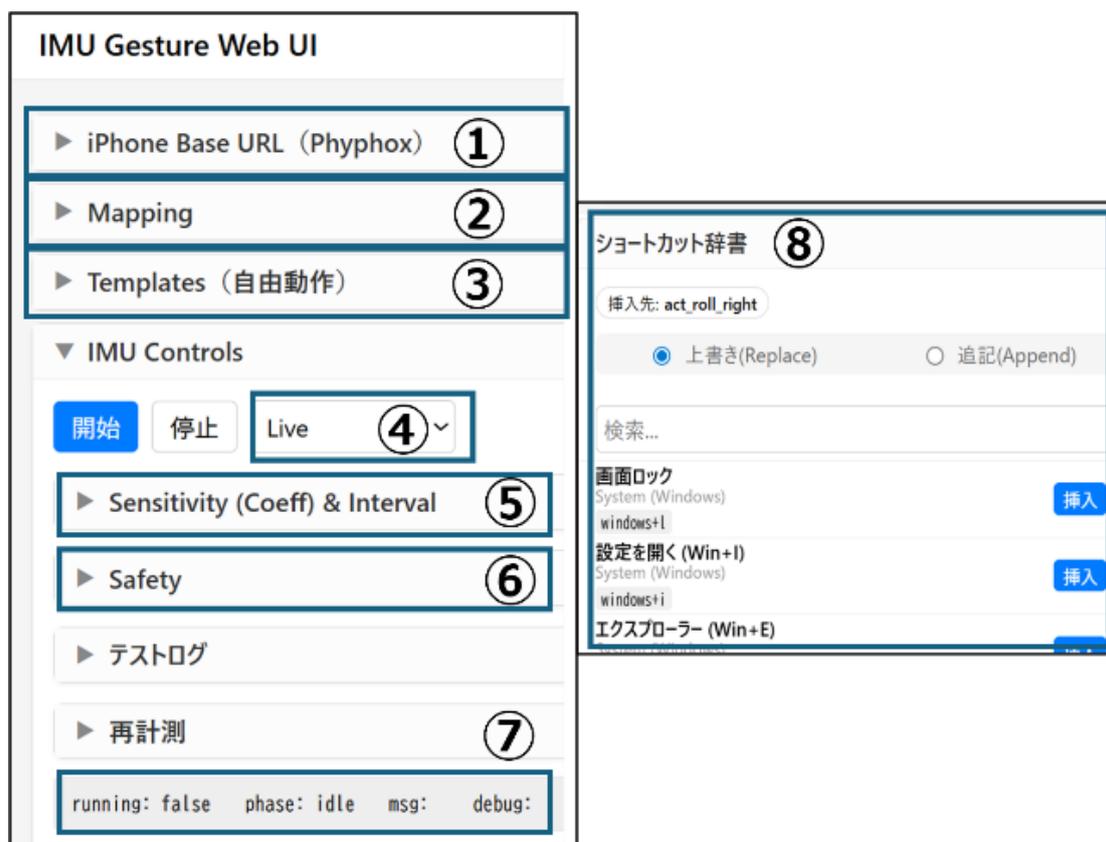


図7 Web UI の画面構成例.

- ①リンク設定 (iPhone Base URL)
- ②操作割当とプロファイル切替 (Mapping)
- ③自由ジェスチャの録画保存 (Templates)
- ④実行モード切替 (Live/Dry-run)
- ⑤各種係数・実行間隔の設定 (Sensitivity & Interval)
- ⑥安全設定 (Safety)
- ⑦システム状態表示
- ⑧ショートカット辞書

第4章 結果と考察

4.1 ジェスチャ認識精度の評価

提案システムの基礎的な認識性能を確認するため、ユーザ係数による感度補正の有無（調整前／調整後）でジェスチャ認識結果を比較する。被験者は開発者本人で、スマートフォンは左胸ポケットに装着した。各ジェスチャは100回試行し、成功数と失敗内訳を集計した（成功：意図したジェスチャが1回のみ発火し、他ジェスチャとして誤認識されない場合）。本実験は単一被験者・装着条件固定の基礎確認であり、個人差や装着条件は今後の課題である。

4.1.1 実験1：ユーザ係数調整前の基礎特性

設定：ユーザ係数を $k_{\text{fwd}} = k_{\text{side}} = k_{\text{roll}} = 1.0$ とする。

表1に認識結果を示す。Forward/Backwardは高い成功率を示した一方、Left/RightおよびRoll系では失敗が増加した。とくにRollは回転の符号判定を伴うため、静止時の微小変動や装着ずれの影響を受けやすい。本条件では、一律の閾値設定のみでは左右差や回転動作に伴う混信（誤検知・多重検出）を十分に抑えられないことが示された。

表1 ユーザ係数調整前のジェスチャ認識結果（各100回試行；成功数と失敗内訳）。

ジェスチャ種別	成功数	失敗の主な内訳
Forward (前傾)	98	無反応 (2)
Backward (後傾)	95	無反応 (5)
Left (左傾)	88	Roll_Left 誤検知 (6), 無反応 (6)
Right (右傾)	83	無反応 (14), Roll_Right 誤検知 (3)
Roll_Left (左回転)	67	多重検出 (28), Left 誤検知 (7)
Roll_Right (右回転)	64	多重検出 (35), Forward 誤検知 (11)

4.1.2 実験2：ユーザ係数調整後の基礎特性

設定：ユーザ係数を $k_{\text{fwd}} = 1.2, k_{\text{side}} = 1.5, k_{\text{roll}} = 0.3$ とする。

表2にチューニング後の結果を示す。成功率は向上し、多重検出は抑制された一方、Rightの無反応が残った。装着状態や動作の個人差により、閾値が一部動作に対して保守的になった可能性がある。以上より、感度補正で混信抑制と成功率改善が確認できたが、無反応低減や閾値の自動最適化は今後の課題である。

表2 ユーザ係数調整後のジェスチャ認識結果（各100回試行；成功数と失敗内訳）。

ジェスチャ種別	成功数	失敗の主な内訳
Forward (前傾)	99	無反応 (1)
Backward (後傾)	99	無反応 (1)
Left (左傾)	93	無反応 (7)
Right (右傾)	90	無反応 (10)
Roll_Left (左回転)	94	無反応 (6)
Roll_Right (右回転)	97	無反応 (3)

4.2 ユーザテスト

提案システムの有用性を、実際のPC操作タスクにおけるユーザ評価により検証する。被験者8名に対し、Microsoft Wordを用いたテキスト作成タスクとテキスト編集タスク（図8）を課し、既存手法（マウス操作）と胸ポケット装着スマートフォンのIMUジェスチャによる提案手法を比較した。評価は7段階（1が悪い、7が良い）のリッカート尺度で実施した[31]。

以下の[見本]通りの文章を[本番]に作成してください。
入力しながら、指示通りにリアルタイムで書式を変えてください。

[見本]

1行目は普通に書いてください。
2行目はここから太字にして、さらに下線も引いてください。
3行目は両方解除して、斜体にしてください。
4行目は斜体のまま太字にして、両方解除して下線を引いてください。
5行目は元に戻してください。

[本番]

(a)

以下の[修正前の文章]を、[修正指示]に従って書き換えてください。

[修正前の文章]

ジェスチャ入力システムは、加速度ベクトルを利用した新しいインタフェースです。
特徴1：ハンズフリーであること。
特徴2：安価であること。
特徴3：場所を選ばないこと。
以上の特徴により、作業効率の向上が期待されます。特に文章作成時のホームイング時間を削減できます。

[修正指示]

1. 「加速度ベクトル」という単語を「加速度センサ」に修正し、下線を引いてください。
2. 「特徴1」「特徴2」「特徴3」を全て太字にしてください。
3. 最後の行の「ホームイング」を斜体にしてください。

(b)

図 8 (a)テキスト作成タスク, (b)テキスト編集タスク.

4.2.1 実験手順

実験は「自由探索とチューニング」後に本番タスクへ移行する手順で行った。既存手法では、太字や斜体などの書式操作にキーボードショートカット (Ctrl+B 等) を使用せず、必ずマウスでツールバーをクリックするルールとした。一方、提案手法では、手をキーボードから離さずホームポジションを保ち、書式操作はジェスチャで実行するルールとした。アンケートでは、(1) 身体的負荷、(2) 操作の円滑さ、(3) 精神的負荷 の3指標を用いて、評価は7段階 (1が悪い, 7が良い) で実施した。

4.2.2 実験結果とアンケート

表3に平均値を示す。作成・編集の両タスクにおいて、3指標すべてで提案手法が既存手法を下回った。特に精神的負荷の差が大きく、提案手法では確認・注意が増えた可能性がある。本評価は探索的評価として実施しており、有意差検定は行っていない。また提示順序はカウンタバランスしていないため、順序効果の影響を完全には排除できない。そのため結果は傾向として解釈する。

表3 タスク実験結果 (平均, N=8, 7段階: 1が悪い~7が良い).

テキスト作成タスク	既存手法	提案手法	テキスト編集タスク	既存手法	提案手法
身体的負荷	5.62	5.25	身体的負荷	5.62	4.88
操作の円滑さ	5.62	4.75	操作の円滑さ	5.5	4.5
精神的負荷	5.75	3.75	精神的負荷	5.5	3.62

自由記述では、提案手法が低評価となった要因として主に以下が挙げられた。

- **誤反応・多重反応：**
一度に複数の操作が反応し、意図しない書式変更が発生するという指摘があった。
- **無反応（特に Right の難しさ）：**
右傾が他動作より反応させにくい、左傾は反応するが右傾が難しい、といった報告があった。
- **確認コストの増加（精神的負荷の悪化）：**
どの動きがどの操作に対応するかの確認に注意が向き、集中力と時間が必要になったという指摘があった。また、文字入力に集中していると体が動き、誤反応しそうになるという不安も報告された。
- **装着条件依存：**
服装や胸ポケットの有無によって反応が左右される可能性が示された。
- **身体負担（重量）：**
胸ポケットにスマートフォンを入れ続けることで首・肩に負担がかかるという意見があり、軽量デバイス化の必要性が示唆された。
- **案内不足：**
キャリブレーション中に画面が見えず次の指示に気づけないため、音声案内が必要という具体的提案があった。

表4より、「最も役に立つ場面」（複数選択）では、プレゼンテーション（スライド送り）5名、動画視聴3名、電子書籍・漫画の閲覧3名が多く、文書作成（Wordなど）2名は少数であった。このことから、本方式は文書編集のような高精度・連続操作を要するタスクよりも、単発トリガー操作が中心の閲覧系タスクにおいて価値を発揮しやすい可能性が示唆される。

表4 提案手法が最も役に立つと感じた場面 (N=8).

項目	人数	割合
プレゼン	5	62.5%
動画視聴	3	37.5%
電子書籍	3	37.5%
文書作成	2	25%

第5章 まとめと今後の展望

5.1 まとめ

本研究では、胸ポケット内のスマートフォン IMU を用いて、キーボードから手を離さずに PC 操作を行うジェスチャ入力システムを提案した。書式変更等をホームポジションを維持したまま実行し、マウスへの手移動低減による操作負荷の低減を狙う。

ユーザテスト（被験者 8 名）では、Word を用いたテキスト作成・編集タスクにおいて提案手法が既存手法を下回り、文書編集用途での優位性は確認できなかった。一方、自由記述と「最も役立つ場面」から、低評価要因（誤反応・多重反応、無反応、装着条件依存、端末重量、案内不足）と、閲覧・発表支援タスクへの適用可能性が示唆された。

5.2 今後の展望

本結果は、提案方式の価値を直ちに否定するというよりも、ボトルネックと適用領域を明確化する探索的評価として位置づけられる。

まず評価設計について、習熟差や順序効果の影響を抑えるため、評価前の練習・チューニング手順の統一とカウンタバランスを導入した上で再評価する。また、文書編集のような高精度・連続操作よりも、閲覧・発表支援（スライド送り、スクロール等）のような単発トリガー中心タスクへ適用を寄せることで、本方式の価値を検証しやすくなると考えられる。

次にシステム改良としては、(1) キャリブレーションおよび操作対応の提示を音声・画面通知等で支援する設計、(2) 装着条件依存と端末重量負担の低減（装着方式・軽量化）と実験条件（装着位置・服装条件）の明示、(3) 誤作動抑制のための安全設計（条件付き発火やゲート強化）と認識の安定化（無反応低減）を重点課題とする。

さらに、将来課題として誤反応・多重反応・無反応を客観指標として定義し、完了時間や再試行回数と併せて分析することで、主観評価低下の要因分解と改善効果の検証を可能にする。本方式は既存入力デバイスの完全置換ではなく、特定状況での補助的インタフェースとして段階的に導入する方針が現実的であり、安全性と信頼性を優先して改善を進める。

謝辞

本研究及び論文の作成にあたり，研究の着想や論文執筆等，多くのご指導，ご助言を頂きました静岡大学工学部の岡部誠准教授に心から感謝申し上げます。また，ご助力頂いた修士課程学生及び学部生の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- [1] M. Weiser, "The Computer for the 21st Century," *Scientific American*, vol. 265, no. 3, pp. 94-104, 1991. doi:10.1038/scientificamerican0991-94.
- [2] R. T. Azuma, "A Survey of Augmented Reality," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 6, no. 4, pp. 355-385, 1997. doi:10.1162/pres.1997.6.4.355.
- [3] M. Billinghurst, A. Clark, and G. Lee, "A Survey of Augmented Reality," *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, 8(2-3), pp. 73-272, 2015. doi:10.1561/11000000049.
- [4] J. Liu, L. Zhong, J. Wickramasuriya, and V. Vasudevan, "uWave: Accelerometer-based personalized gesture recognition and its applications," *Pervasive and Mobile Computing*, 5(6), pp. 657-675, 2009. doi:10.1016/j.pmcj.2009.07.007.
- [5] T. Park, J. Lee, I. Hwang, C. Yoo, L. Nachman, and J. Song, "E-Gesture: A Collaborative Architecture for Energy-Efficient Gesture Recognition with Hand-Worn Sensor and Mobile Devices," *Proc. ACM SenSys*, 2011, pp. 260-273. doi:10.1145/2070942.2070969.
- [6] F. Zhang, V. Bazarevsky, A. Vakunov, et al., "MediaPipe Hands: On-device real-time hand tracking," arXiv:2006.10214, 2020.
- [7] D. Abdulkarim, M. Di Luca, P. Aves, S.-H. Yeo, R. C. Miall, P. Holland, and J. M. Galea, "A methodological framework to assess the accuracy of virtual reality hand-tracking systems: A case study with the Meta Quest 2," *Behavior Research Methods*, 2023. doi:10.3758/s13428-022-02051-8.
- [8] D. Buschek, B. Roppelt, and F. Alt, "Extending Keyboard Shortcuts with Arm and Wrist Rotation Gestures," *Proc. CHI '18*, 2018. doi:10.1145/3173574.3173595.
- [9] GNU Project, "GNU Emacs Manual: Key Bindings," (online), available: https://www.gnu.org/software/emacs/manual/html_node/emacs/Key-Bindings.html , accessed 2026-02-12.
- [10] GNU Project, "GNU Emacs Lisp Reference Manual: Key Binding Conventions," (online), available: https://www.gnu.org/software/emacs/manual/html_node/elisp/Key-Binding-Conventions.html , accessed 2026-02-12.
- [11] J. Rekimoto, "GestureWrist and GesturePad: Unobtrusive Wearable Interaction Devices," *Proc. IEEE ISWC*, 2001. doi:10.1109/ISWC.2001.962092.
- [12] G. Cornella-Barba, E. Sangenis, M. Ousmer, J. Vanderdonckt, S. Villarreal-Narvaez, B. Dumas, and A. Chaffangeon Caillet, "TapStrapGest: Elicitation and Recognition of Ring-based Multi-Finger Gestures," *Proc. ACM on Human-Computer Interaction (PACMHCI)*, 2025. doi:10.1145/3733047.
- [13] Y. Yan, C. Yu, X. Yi, and Y. Shi, "HeadGesture: Hands-Free Input Approach Leveraging

- Head Movements for HMD Devices," PACM IMWUT, 2018. doi:10.1145/3287076.
- [14] Y. Zhang, T. Gu, C. Luo, V. Kostakos, and A. Seneviratne, "FinDroidHR: Smartwatch Gesture Input with Optical HeartRate Monitor," PACM IMWUT, 2018. doi:10.1145/3191788.
- [15] C. Beattie, A. Cockburn, P. Quinn, and C. Gutwin, "Understanding and Improving the Performance of Action Pointing," Proc. CHI, 2025. doi:10.1145/3706598.3713761.
- [16] M. H. Rahmani, R. Berkvens, and M. Weyn, "Chest-Worn Inertial Sensors: A Survey of Applications and Methods," Sensors, 21(8), 2875, 2021. doi:10.3390/s21082875.
- [17] K. Ahuja, S. Mayer, M. Goel, and C. Harrison, "Pose-on-the-Go: Approximating User Pose with Smartphone Sensor Fusion and Inverse Kinematics," Proc. CHI '21, 2021. doi:10.1145/3411764.3445582.
- [18] L. Zhang, X. Yi, and F. Xu, "BaroPoser: Real-time Human Motion Tracking from IMUs and Barometers in Everyday Devices," Proc. UIST '25, 2025. doi:10.1145/3746059.3747731.
- [19] H. Zhou, R. Arakawa, Y. Agarwal, and M. Goel, "IMUCoCo: Enabling Flexible On-Body IMU Placement for Human Pose Estimation and Activity Recognition," arXiv:2508.01894, 2025.
- [20] A. Ilic, J. Jiang, P. Strelci, X. Liu, and C. Holz, "Human Motion Capture from Loose and Sparse Inertial Sensors with Garment-aware Diffusion Models," arXiv:2506.15290, 2025.
- [21] S. Tao, H. Zhang, L. Kong, Y. Sun, and J. Zhao, "Validation of gait analysis using smartphones: Reliability and validity," DIGITAL HEALTH, 2024. doi:10.1177/20552076241257054.
- [22] L. Sun, S. Xia, J. Deng, J. Yang, Z. Lai, Q. Wu, and L. Pei, "Suite-IN: Aggregating Motion Features from Apple Suite for Robust Inertial Navigation," arXiv:2411.07828, 2024.
- [23] J. Wang, Y. Chen, S. Hao, X. Peng, and L. Hu, "Deep learning for sensor-based activity recognition: A survey," Pattern Recognition Letters, 2019. doi:10.1016/j.patrec.2018.02.010.
- [24] T. Ouyang and Y. Li, "Bootstrapping Personal Gesture Shortcuts with the Wisdom of the Crowd and Handwriting Recognition," Proc. CHI, 2012, pp. 2895-2904. doi:10.1145/2207676.2208695.
- [25] J. O. Wobbrock, A. D. Wilson, and Y. Li, "Gestures without Libraries, Toolkits or Training: A \$1 Recognizer for User Interface Prototypes," Proc. UIST, 2007. doi:10.1145/1294211.1294238.
- [26] G. Bailly, I. Avellino, E. Brule, and S. Malacria, "The Role of Social Interactions in the Interaction Discovery of Keyboard Shortcuts," Proceedings of the 36th International Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine (IHM '25),

2025. doi:10.1145/3765712.3765714.

[27] K. Fennedy, S. Malacria, H. Lee, and S. Perrault, "Investigating Performance and Usage of Input Methods for Soft Keyboard Hotkeys," Proc. MobileHCI, 2020.

doi:10.1145/3379503.3403552.

[28] J. Zheng and D. Vogel, "Finger-Aware Shortcuts," Proc. CHI, 2016.

doi:10.1145/2858036.2858355.

[29] S. Staacks, S. Hütz, H. Heinke, and C. Stampfer, "Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox," Physics Education, 53(4), 045009, 2018. doi:10.1088/1361-6552/aac05e.

[30] R. Fielding and J. Reschke, "Hypertext Transfer Protocol (HTTP/1.1): Message Syntax and Routing," RFC 7230, RFC Editor, 2014. doi:10.17487/RFC7230.

[31] R. Likert, "A Technique for the Measurement of Attitudes," Archives of Psychology, no. 140, pp. 1-55, 1932.