

Slack Rail を用いた体幹・バランストレーニング支援のための 体動センシングシステムの開発

Body Movement Sensing System for Supporting Trunk and Balance Training using Slack Rail

大山 拓真[†] 岡田 昂也[†] 毛利 心治[†] 牛田 智也[†] 恵谷 高清[†] 池 朔太郎[†]
Takuma Oyama Koya Okada Shinji Mouri Tomoya Ushida Kousei Eya Sakutaro Ike
表具 真衣[†] 林 虎太郎[†] 吉村 太斗[†] 松田 裕貴[†]
Mai Hyogu Kotaro Hayashi Taito Yoshimura Yuki Matsuda

1 はじめに

近年, 世界的な少子高齢化が進み, 健康寿命の延伸が社会的に重要な課題となっている. 高齢者が自立した生活をするためには, 転倒リスクを低減し, 日常生活動作 (ADL) を維持するための身体能力, とりわけ体幹の安定性を高めることが重要である. 特に近年では, 「フレイル (frailty)」の概念が注目されている. フレイルは, 加齢に伴う身体的・精神的・社会的な予備能力の低下により, 健康障害や要介護状態に移行しやすい状態を指す [1]. 身体的フレイルの特徴のひとつが, 筋力低下やバランス能力の低下による転倒リスクの増加である. そのため, フレイル予防の観点からも, 体幹の筋力と安定性を維持・向上させるための運動が推奨されており, 簡便で安全に行える体幹トレーニングの開発と評価が求められている.

本研究では, 体幹トレーニング器具「Slack Rail [2]」に着目し, バランス能力や体幹の安定性を養う運動を実施する際の動作をウェアラブルデバイスで計測し, そのデータをもとに定量的に評価する手法の構築を目指している. 本稿では, その実現に向けた初期実験として, 慣性センサを用いて Slack Rail 上を歩行するユーザの挙動をセンシングするとともに, 落下せずに歩行できたかどうかの分類, および, 落下せずに歩行できた場合の歩行の安定性の推定をそれぞれ行う機械学習モデルを構築し, 評価を行った.

2 関連研究

2.1 フレイル予防のための運動・ICT による支援

身体的フレイルの特徴のひとつである転倒は, 骨折など入院加療を要する重要な外傷を招くこともあり, 要介護状態に至るケースもまれではない. そのため, 日頃から適度な運動を行い転倒予防に努めることが重要である.

自宅などで手軽に取り組みやすい運動として, おもりを手首・足首につけて運動を行うことで筋力とバランス力を高めるいきいき百歳体操 [3] や, 新聞紙などを巻いて棒状にした道具を用いる運動を行う棒体操 [4] などが

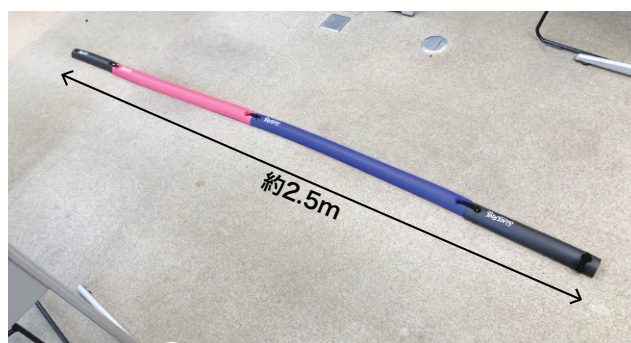


図 1: Slack Rail の外観

様々な地域で実施されている. 棒体操を支援する ICT システムとして, 大井らは棒体操に用いる棒に IMU センサを取り付け, 棒体操における体操種目を推定するシステムを提案している [5].

また, 屋内における運動だけでなく, 外出することによる運動も極めて重要である. しかしながら新型コロナウイルス感染症の影響により, 外出自粛の期間が生じたことでソーシャルコミュニケーションの機会が失われ, 結果として外出頻度が著しく減少している [6]. こうした高齢者の社会からの孤立に伴うフレイルを防止するため, 土橋らは高齢者用集合住宅における自発的な外出・散歩を促し, 住民同士の交流の機会を創出する行動変容システムを提案している [7].

バランス感覚を養うトレーニングとして, 木などの二点間に張り渡した専用リボンを用いる綱渡りに似たスポーツの「Slackline」が広く知られている^{*1}. Donath らの調査では, Slackline を用いたトレーニングがバランス能力にある程度の改善をもたらすことが示唆されている [8]. しかしながら, 高齢者における利用においては Slackline は怪我のリスクが非常に高いという問題点がある. こうした問題に対し, ジリリタ株式会社は一般社団法人スラックライン推進機構と共同で「Slack Rail」という発泡ゴムを素材としたかまぼこ型の体幹トレーニング器具 (図 1) を開発している [2]. Slack Rail は, 床に

[†] 岡山大学, Okayama University

^{*1} <https://jspo.org/>

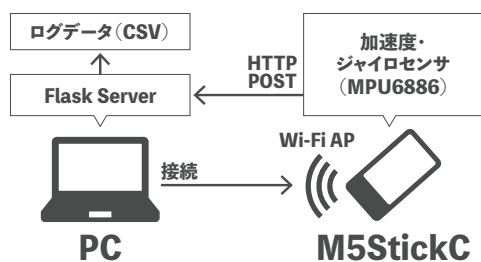


図 2: センシングシステムの概要図

において利用することができ、この上に乗って歩くことにより Slackline と類似する感覚を得ることができるものである。しかしながら、Slack Rail を用いた運動を支援するシステムは今のところ存在せず、また Slack Rail がバランス感覚のトレーニングにどの程度寄与するのかについても調査はなされていないのが現状である。

2.2 本研究の位置づけ

本研究では前述の「Slack Rail」に着目し、Slack Rail を用いた体幹・バランストレーニングの際に生じる、様々な体の動きをウェアラブルセンサを用いて取得・分析するとともに、トレーニングの支援を提供するシステムの実現を目的としている。さらに、構築したシステムによる定量的な計測に基づいて、Slack Rail を用いるアプローチがどのように中・長期的なフレイルの予防に寄与するのかを明らかにすることを目指している。本稿では、その初期段階の実験として、簡易な IMU センサによるデータ収集システムを構築するとともに、Slack Rail 利用時の体動を分析する手法について提案し、評価した結果について報告する。

3 Slack Rail 上での体動センシング実験

Slack Rail を用いたトレーニング中に生じる様々な体動データを収集するシステムを構築し、収集したデータの分析を試みる。

3.1 センシングシステムの概要

トレーニング中の体動をセンシングするため、簡易な IMU センシングシステムを開発した（図 2）。使用するデバイスは、M5Stack Technology Co., Ltd. が開発する小型 IoT 開発ボード「M5StickC^{*2}」を選択した。同デバイスに搭載される加速度・ジャイロセンサー（MPU6886）を用い、トレーニング中のモーションデータを取得する。いずれのセンサも約 100Hz でデータ取得することとした。取得したデータは、同じローカルネットワークに接続されたノート PC 上に構築した Flask サーバに対して逐次送信され、記録される。

^{*2} <https://docs.m5stack.com/ja/core/m5stickc>



図 3: センサ装着位置

3.2 実験設定

Slack Rail 上を歩き、綱渡りするバランストレーニングを行う際の体動データを収集した。被験者としては、岡山大学の大学生 2 名（年齢：19・20 歳、性別：男性）を対象とした。

■ **実験シナリオ** 実験設定は以下の通りとした。4 本の Slack Rail を連結した全長約 2.5m^{*3}の経路を、水平な床に設置し（図 1）、計測開始後に裸足でその上を歩行する。歩行は Slack Rail 上を渡りきった場合、もしくは途中で落下し足が地面についてしまった場合に終了する。被験者は両足を交互に出して歩いていくが、腕を動かす、膝を曲げるなどのバランスをとる行為を行うかは自由とした。ただ、明確に一般的でない歩き方（進行方向に対して後ろを向いて歩く等）は行わないようにした。

■ **センサ装着方法** 被験者はセンサを胸部と腹部にそれぞれ 1 つずつ装着した。図 3 に示すように、センサは体の正面に各部位の中央に密着してベルトを用いて固定した。設置位置の決定にあたっては、体の揺れや傾きをもとに Slack Rail 上での身体の状態、バランス感覚に関するデータを収集することを目的としていることから、上半身と下半身それぞれの傾きや揺れを計測するのに胸部と腹部がセンサの位置として適していると考えた。また、2 つのセンサを体の中心を通るように並べることで、これら 2 つのセンサデータを組み合わせることで詳細な分析（体全体の傾きやねじれ）が可能と考えた。

■ **実験手順** 実験の様子を図 4 に示す。実験は、被験者 1 名、データ記録用 PC 操作者 2 名（センサ 1 つにつき 1 台）、アノテータ 4 名によって行った。なお、アノテータのうち 3 名は共通であり、もう 1 名は被験者が相

^{*3} Slack Rail T（長さ 900 × 幅 60 × 高さ 30mm）および Slack Rail Compact（長さ 360 × 幅 60 × 高さ 30mm）をそれぞれ 2 本ずつ連結した。



図 4: 実験の様子

互に評価をする形とした。実験の各試行の流れは以下の通りである。

1. センサを装着し、センサを起動する。
2. データ記録用 PC でデータの記録を開始する。
3. 被験者は 1 秒待機した後、Slack Rail 上を歩行する。
4. 途中で落下した場合は、その場で記録を停止し「失敗データ (0)」としてラベル付けを行う。
5. 最後まで Slack Rail を渡り切った場合は、アノデータは「成功データ (1)」としてラベル付けを行うとともに、安定性スコアの各項目について評価する。

以上の試行を繰り返し、合計で 143 サンプルのデータを収集した。また、上記の方法で Slack Rail 上でのデータを収集するのとは別に、地上での歩行データも比較用データとして収集した。これらのデータの成否ラベルは「地上データ (2)」としてラベル付けした。

■ アノテーション方法 アノテーション方法は以下の通りとした。なお、以降の分析では、4 名のアノテータがアノテーションを行った結果の平均をスコアとして取り扱う。

成否ラベル 被験者が Slack Rail を歩行した際に、途中で落下した場合は「失敗データ (0)」，最後まで渡りきった場合は「成功データ (1)」とする。比較用として収集した地上を歩いた際のデータについては「地上データ (2)」とする。

安定性スコア 成否ラベルが「成功データ」となっている試行に関してのみ、「スムーズさ」「左右の安定性」「前後の安定性」の 3 つの観点について、それぞれ 0～3 点の 4 段階評価で採点する。それらの合計点を「安定度スコア」とする。

3.3 体動を分析する機械学習モデルの構築

得られたデータを入力とし、体動を分析する機械学習モデルの構築を行った。なお、本実験では胸部・腹部に装着した単体のセンサデータを用いる。

■ **モデル構築** 入力データとして、時系列データの特徴量抽出ライブラリである tsfresh^{*4} を用いて特徴量を抽出した。各試行は長くとも 10 秒程度であることから時間窓による分割は行っていない。なお、特徴量の抽出にあたってのパラメータとしては、全特徴量のうち大きな計算コストが掛かるものを除外した特徴量のみを対象とする EfficientFCParameters を設定し、加えて全サンプルが同じ値 (0 や NaN) となる特徴量をフィルタリングする処理を施した。今回の入力データ (加速度センサ 3 軸・ジャイロセンサ 3 軸の計 6 軸のセンサデータ) に対して特徴量抽出を行った結果、4536 の特徴量 (6 軸 × 756 特徴量) が得られた。この特徴量データを用いて、以下の 2 つの機械学習モデルを構築した。

試行の成否判定モデル SlackRail 上を歩く試行が成功したかどうかを判定する分類モデル。失敗した試行、成功した試行、地上で歩いた場合 (最も安定した歩行のサンプル) の 3 クラスを対象とする。

安定性の推定モデル 試行が成功した際 (歩き切れた場合) に、その歩行がどの程度安定していたかを評価する回帰モデル。各評価項目 (「スムーズさ」「左右の安定性」「前後の安定性」) および、その合計である「安定性スコア」を対象とする。

以下では、層化 5 分割交差検証によって各モデルの評価を行った結果について述べる。

■ **試行の成否判定モデルの評価結果** 試行の成否判定モデルについてセンサ装着位置ごとの評価結果を表 1・図 5 (腹部) および表 2・図 6 (胸部) に示す。

いずれの装着位置においても 80% を超える重み付き平均 f1-score を示しており、また混同行列においてもおおむね良好な分類ができていることが確認できた。また、地上における普通の歩行と SlackRail 上での歩行よりも、失敗・成功の間の方が混同しやすいということがわかった。このことから、SlackRail 上でのバランスを取ろうとする動作に特有な動きが生じていることがわかる。今後、失敗・成功の判定性能を高めるためには、落下前後 (モーションログの終盤) のデータに注目した特徴量抽出を行うなどの工夫が考えられる。また、腹部と胸部では胸部の方が一貫して高い性能を示すことが明らかとなっ

^{*4} <https://tsfresh.com/>

表 1: 成否判定結果（腹部）

	precision	recall	f1-score	support
失敗	0.80	0.60	0.69	40
成功	0.82	0.92	0.86	83
地上	0.85	0.85	0.85	20
重み付き平均	0.82	0.82	0.81	143

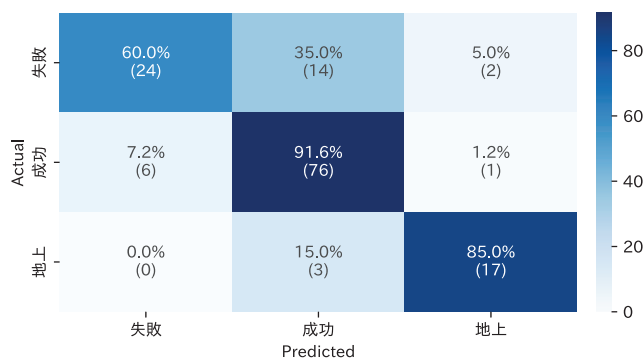


図 5: 成否判定結果の混同行列（腹部）

表 2: 成否判定結果（胸部）

	precision	recall	f1-score	support
失敗	0.80	0.80	0.80	40
成功	0.88	0.89	0.89	83
地上	0.95	0.90	0.92	20
重み付き平均	0.87	0.87	0.87	143

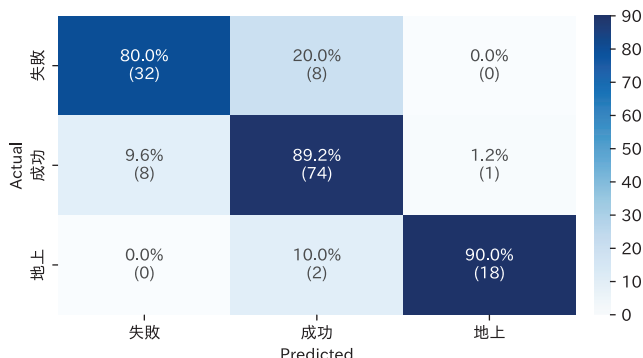


図 6: 成否判定結果の混同行列（胸部）

表 3: 安定性の推定結果（腹部）

対象	RMSE	RMPE(%)	R ²	R
スムーズさ	0.550	74.826	0.354	0.598
左右の安定性	0.457	54.642	0.571	0.759
前後の安定性	0.450	27.752	0.343	0.589
安定性スコア	1.108	24.205	0.604	0.779

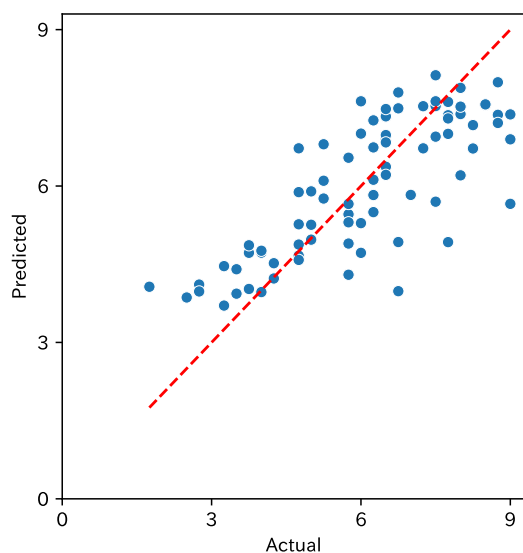


図 7: 安定性スコアの推定結果の散布図（腹部）

表 4: 安定性の推定結果（胸部）

対象	RMSE	RMPE(%)	R ²	R
スムーズさ	0.514	80.729	0.435	0.661
左右の安定性	0.485	66.342	0.517	0.720
前後の安定性	0.387	25.347	0.516	0.721
安定性スコア	1.159	29.459	0.567	0.756

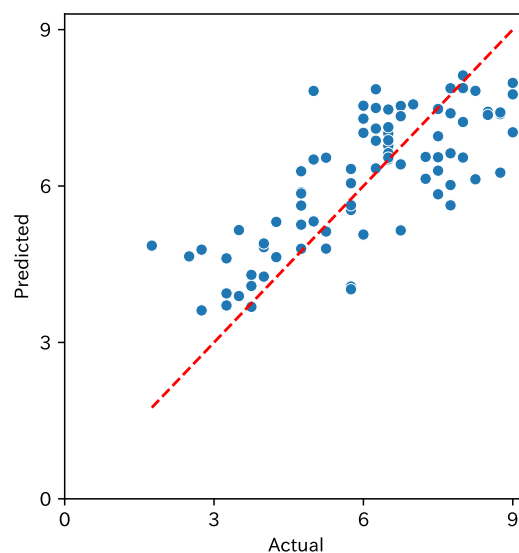


図 8: 安定性スコアの推定結果の散布図（胸部）

た。バランスが崩れた際には上半身の揺れとして現れると想定されることから、より地面から遠い装着位置である胸部がよりその動きを捉えられたものと考えられる。

■ 安定性の推定モデルの評価結果 安定性の推定モデルについてセンサ装着位置ごとの評価結果を示す。

まず、安定性スコア（スコア範囲：0～9）についての評価を表 3・図 7（腹部）および表 4・図 8（胸部）に示す。いずれの装着位置においても、RMSE は約 1.2、相関係数は約 0.75 となり、良好な相関を示すことを確認した。散布図を確認すると、サンプルが比較的に少ない低スコア・高スコアの試行については平均的なスコアに近い

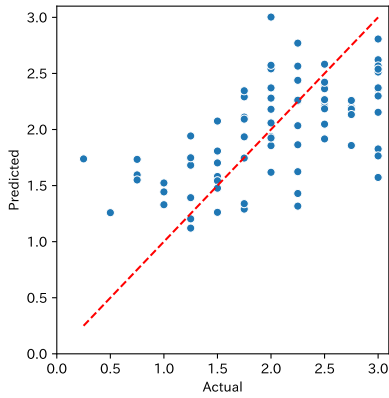


図 9: スムーズさの推定結果（腹部）

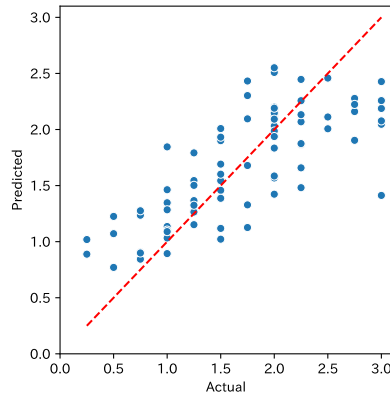


図 10: 左右の安定性の推定結果（腹部）

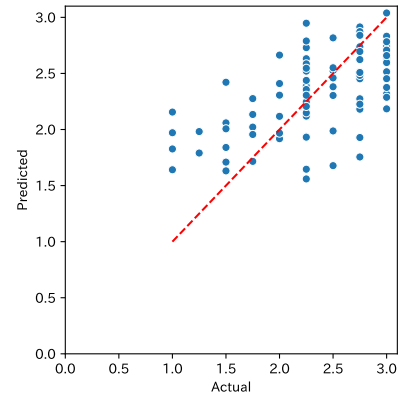


図 11: 前後の安定性の推定結果（腹部）

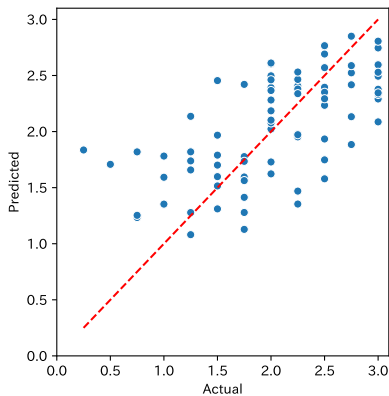


図 12: スムーズさの推定結果（腹部）

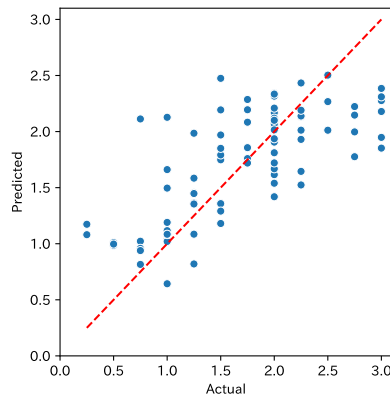


図 13: 左右の安定性の推定結果（腹部）

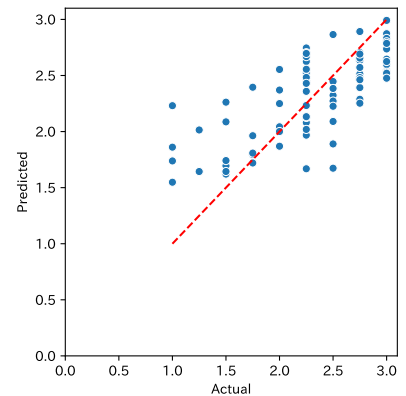


図 14: 前後の安定性の推定結果（腹部）

推定値を示すことがわかるが、傾向は捉えられていることがわかる。

また、安定性スコアを構成する各指標（スコア範囲：0～3）についての評価結果については、前述の表および図 9・10・11（腹部），図 12・13・14（胸部）に示すとおりとなった。いずれの指標においてもある程度の相関が確認できたものの、それらを統合した安定性スコアと比較してばらつきが大きい結果となった。

今回の実験では、ラベルの分布は図 15 となっており、特に低スコア（不安定な歩行）のサンプルが限定的となっている。今後は低スコアのサンプルを追加収集することにより、性能改善を行うことが想定される。また、センサ装着位置については、安定性スコアの相関はいずれも同程度となっているものの、各項目に関しては項目によって優位となる装着位置に違いが生じていることがわかった。このことから、2つのセンサを複合的に分析することで性能の向上が見込める。

4 おわりに

本研究では、高齢者のフレイル予防のためのトレーニング器具の1つである Slack Rail を用いた歩行トレ

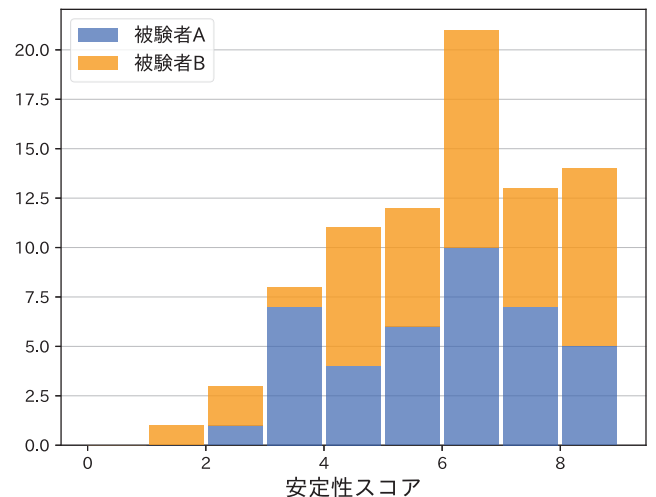


図 15: 安定性スコアの分布

ニングを支援するためのシステムの実現にむけ、歩行中のモーションをセンシング、歩行状態の分析を行う機械学習モデルを構築・評価した。歩行の成否判定、歩行の安定性の推定のそれぞれのモデルを評価した結果、いずれのモデルの一定の性能を示すことが確認できた。実際

に高齢者が利用するシーンを想定し、簡易に取り付け可能で高い性能が得られる装着箇所について模索することや、被験者数を増加させること（高齢者を含めた被験者を対象とした実験を含む）で本人データを含めないモデルを構築することなどが、今後の課題として考えられる。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費（JP24K15227）および JST COI-NEXT（JPMJPF2115）の助成を受けて行われたものです。

参考文献

- [1] Andrew Clegg, John Young, Steve Iliffe, Marcel Olde Rikkert, and Kenneth Rockwood. Frailty in Elderly People. *The Lancet*, Vol. 381, No. 9868, pp. 752–762, 2013.
- [2] ジリリタ株式会社. Slack Rail. <https://slackrail.jp/>. Accessed on 14 July, 2025.
- [3] 川村明範. いきいき百歳体操の取り組み～住民主体の介護予防活動～. <https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-12600000-Seisakutoukatsukan/0000058737.pdf>. Accessed on 14 July, 2025.
- [4] 横井賀津志. 転倒予防のための棒体操 運動機能と認知機能へのアプローチ. 三輪書店, 2018.
- [5] Kazuki Oi, Yugo Nakamura, Yuki Matsuda, Manato Fujimoto, and Keiichi Yasumoto. Inertial Measurement Unit-sensor-based Short Stick Exercise Tracking to Improve Health of Elderly People. *Sensors and Materials*, Vol. 34, No. 8, pp. 2911–2928, 2022.
- [6] ニッセイ研究所. 全国旅行支援の利用状況－「第 11 回新型コロナウイルスによる暮らしの変化に関する調査」. <https://www.nli-research.co.jp/report/detail/id=74324>. Accessed on 14 July, 2025.
- [7] 土橋有理, 秦恭史, 松田裕貴, 諏訪博彦, 安本慶一. ゲーミフィケーションを活用した外出交流促進システムの開発. 第 32 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ（DPSWS '24）, pp. 168–171, 2024.
- [8] Lars Donath, Ralf Roth, Lukas Zahner, and Oliver Faude. Slackline training (balancing over narrow nylon ribbons) and balance performance: A meta-analytical review. *Sports Medicine*, Vol. 47, No. 6, pp. 1075–1086, 2017.