

競歩フォーム評価のための靴装着型センサデバイスの設計と検討

Design of a Shoe-Mounted Sensor Device for Racewalking Form Assessment

表具 真衣[†]松田 裕貴[†]

Mai Hyogu

Yuki Matsuda

1 はじめに

陸上競技の種目の一つである「競歩」は、オリンピックの種目にも含まれており、日本人の選手が世界記録を更新するなど、注目が高まっているが、その一方で、そのルール・判定の難しさから、審判の公平性が疑問視されていることや、審判・指導を担える競歩関係者の不足などが課題となっている。

競歩に特有かつ重要なルールは、1) 競技者のいずれかの足が地面についていること、2) 前脚が接地の瞬間から垂直の位置になるまでの間に膝が伸びていること、の2つである。競技者はこれらのルールを常時守りつつ、所定の距離を歩く必要がある。このルールが守られているかの判断は、基本的に審判の目視によるものであるが、少ない場合だと 2km 間に 8 人程度しかいないこともある（つまり、250m を一人で審判することになる）[1]。さらに、20km を歩く競歩競技では試合時間が 1 時間を超えることもあるため、審判が常時集中し続けることは至難の業である。また、競技人口が少ないことに起因し、新しく競歩を始めようとする競歩初心者に対して、これらのルールを適切に指導できる指導者が非常に限られているということも、競歩が抱える課題といえる。

そこで、本研究では、競歩初心者が指導者不在の環境で競歩技術を習得することが困難であるという課題を解決するために、競歩初心者の単独練習支援システムの実現を目指している（図 1）。本稿では、競技時の歩行状態をセンシングし、ルールを守れているかどうかの判定やパフォーマンス改善のための指導を行うための、測距センサと加速度センサからなる靴装着型のセンシングデバイスを提案する。プロトタイプとして簡易なデータ収集システム、靴への装着治具（センサケース）の設計・実装し、歩行データを CSV ファイルで記録・分析した結果について報告する。

2 競歩の基礎知識

競歩は陸上競技の種目の一つであり、“歩く速さ”を競う競技である。ここでは、競歩のルールに関しての基礎知識について述べる [2]。

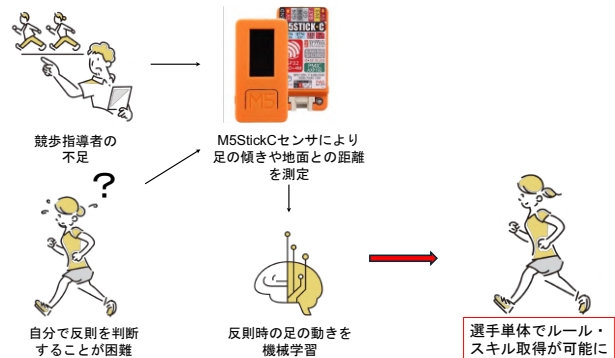


図 1: 研究の全体像

2.1 競歩における主要違反

競歩は「歩く」という運動を対象とするため、以下に示すように他の陸上競技にはない 2 つの特有なルールが存在する。

- **ルール 1：** 競技者は両足が同時に地面から離れてはならない。競技中は、常時必ずどちらかの足が地面に接している必要がある。両方の足が地面から離れた場合には、ロスオブコンタクト（Loss of Contact, 通称：LC）という違反となる。
- **ルール 2：** 踏み出した足が地面と垂直になるまで膝を曲げてはならない。地面に足がついた瞬間から脚が地面と垂直になる前に膝が曲がった場合には、ベントニー（Knee Bent, 通称：KB）という違反となる。

2.2 競歩における審判

競歩における審判は、コース脇に立ち、自身の前を通過する競技者が前述のルールを違反していないかどうかを判定する。審判員は、黄色のイエローパドル（LC, KB はそれぞれ「～」と「<」で表される。）と赤色のレッドカード、無地の赤色のパドルであるレッドパドルを持ち審判を行う（図 2）。イエローパドルは反則が疑わしい場合に競技者に提示する。レッドカードは反則が目視で判断された場合に競歩審判主任に渡す。レッドカードを 3 枚以上出されたとき、競技者は失格となり、レッドパドルが提示される。また、ペナルティゾーンが設置されている競技会では、4 枚目のレッドカードが出た場合に競技者は失格となる。

[†] 岡山大学, Okayama University

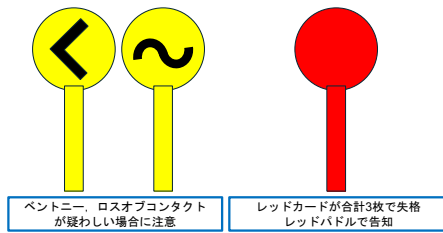


図 2: 審判が持つパドル

2.3 競歩の指導方法

競歩の指導方法には明確な統一基準は存在せず、指導者ごとに異なるアプローチが採用されている。一般的には、競技者が歩行を実演し、フォームに誤りがある場合はその場で修正を加えるという手法が用いられる。また、「○○のように」など、日常的な動作に例えて感覚的に理解させる表現を用いることも多い。実践とフィードバックを繰り返す指導法においては、まず低速での歩行を通して正しいフォームの習得を目指し、習熟度に応じて徐々に速度を上げていくという段階的なトレーニングが行われる。いずれの指導方法においても、初心者が短期間で競歩のルールを理解し、正しいフォームを習得することは容易ではなく、指導者にとっても大きな負担となる。

また、特に指導者がいない場合においては、歩行を行う様子をカメラで録画し、練習直後に映像を確認する方法も存在する。しかしながら、カメラによる記録（練習）と再生（確認）を交互に行う必要があるため、リアルタイム性に欠けるという課題がある。

3 関連研究

3.1 競歩の反則判定に関する研究

競歩における反則判定に関する研究は多く取り組まれており、慣性センサや靴型センサ、カメラを用いた方法が提案されている。

まず、慣性センサを用いる方法としては、Taborri らは、慣性センサを利用して KB・LC 双方の反則の検出を試みている [3, 4]。2019 年の研究はセンサを腰・左右太もも・すね・足に装着した場合、2023 年の研究はセンサを両方の足の脛の 2 箇所に弾性ストラップで固定した場合における反則検出、およびタブレットへの結果表示について提案されている。構築した機械学習モデルにより、KB, LC, KB & LC の分類について 90% を超える精度を実現している。また、Caporaso らは、腰部に装着されたウェアラブルセンサの加速度データを用いて、競技者の動作を解析し、競歩違反の自動検知手法を提案している [5]。このシステムでは単一の加速度センサを用いてフォームをリアルタイムに評価し、適切な歩行ができているかどうかを自動的に判断することが可能である。通

信範囲内で安定したデータ取得を実現するため、ウェアラブルセンサのデータは競技者と並走する自転車に搭載されたモバイルデバイスで受信する必要がある。

次に、カメラや他のセンサと組み合わせる方法としては、Lee らは、慣性センサとカメラを使用し、競歩中の反則検出を試みた。腰付近の皮膚に直接貼り付けることで慣性センサ（取得周期 100Hz）を設置するとともに、カメラ（フレームレート 125Hz）を併用した反則検出手法を実現している [6]。長友らは、両足の付け根、膝、足首、靴底にマーカーを付けた状態でトレッドミル（ランニングマシン）上を歩き、被験者の右側面から撮影した映像によってマーカーを検出することで競歩の反則を検出する手法を提案している [7]。この手法では、靴底のマーカーを用いて LC を判断し、それぞれのマーカーの中心座標の検出で KB を判断している。

最後に、競技用の「靴」に着目した研究も行われている。セテアントらは、中敷き型のセンサを用いて、走り幅跳び、競歩、ランニングにおいて足裏のどの部分に負荷がかかっているのか計測している [8]。

3.2 競歩の熟練度に関する研究

Harrison らは、競歩の初心者と経験者に歩く速さや反則発生の頻度に違いがあるのか調べるために、競歩初心者 16 人・競歩経験者 18 人の計 34 人を実験対象として、データ収集を行った [9]。骨盤の高さにタイミングゲート（陸上競技で使用する、選手が通過した正確な時間を自動で計測する装置）を設置し参加者の歩行速度を測定した。脚の長さが最大歩行速度に大いに影響すると考え、地面から参加者の腸骨稜（骨盤まで）の長さを計測し、歩行速度、ステップ周波数、ステップ長、接地時間、および FT（飛行時間）を測定し比較したが、年齢、身長、体重が結果に大きく影響することは無かったと報告されている。しかし、実験の参加者の男女比や年齢、身長、体重は初心者と経験者で異なっているため、結果の差が経験の有無に起因するものかは明らかとなっていない。

3.3 本研究の立ち位置

先行研究では、慣性センサを用いる方法 [3, 4, 5]、カメラを用いる方法 [6, 7] や、靴中敷き型センサを用いる方法 [8] が提案されているが、以下のような課題がある。

- 慣性センサを用いる方法では、大腿部や腰など地に直接取り付けるセンサが多く用いられている。センサを安定して取り付けるためと考えられるが、手軽さが低くなることや、競技のパフォーマンスへの影響の観点において課題が残る。
- カメラを用いたセンシング手法には、いくつかの制約がある。まず、撮影範囲が限定されるため、広範囲で継続的にデータを収集し続けることが難し

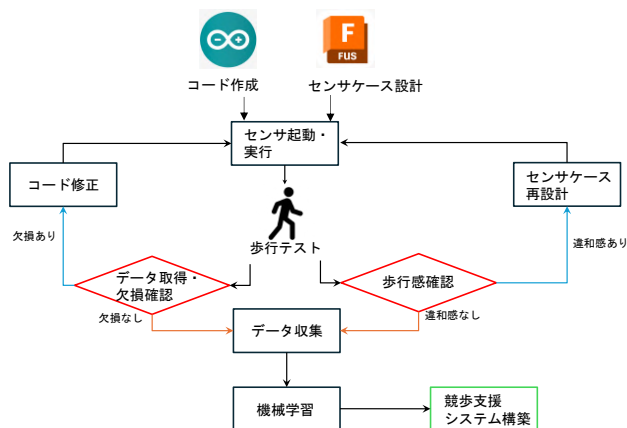


図 3: 研究の流れ

い。また、競技者同士が重なった場合には正確な動作解析が困難となるため、背景に動く対象が映り込まないように配慮する必要がある。さらに、画像処理には時間を要するため、リアルタイムでのデータ収集や反則検知には不向きであると考えられる。

- 靴中敷き型センサを使用した場合、底圧や歩行周期を高精度に計測可能な一方で、中敷きは競技者にとって衝撃吸収や足部の安定性に関わる重要な要素であり、実際に競技用インソールは個々の競技者がカスタマイズすることも多い。そのため、中敷き型センサの使用が競技者の感覚やパフォーマンスに影響を及ぼす可能性があり、慎重な検討が必要である。

これらを踏まえ本研究では、競技時の身体動作や感覚への影響を最小限に抑えつつ、歩行中のセンシングを安定的に行うことを重視し、靴装着型のデバイスを提案する。

4 提案手法

本研究では、指導者不在でも競歩初心者が競歩技術を習得できるようにするための「競歩練習支援システム」の実現を目指している（図 1）。この実現に向け、本稿では特別な技術や知識を要することなく簡単に取り付けることができ、かつ競技の動作の邪魔にならないような靴装着型デバイスを提案する。

4.1 靴装着型デバイスのプロトタイプ

靴の履き口に簡易に付けられるセンサを用いて、競歩時の歩行状態（特に LC）をセンシングするデバイスを設計・開発する。研究の流れを図 3 に示す。本稿ではこのうち、初期段階のコードとセンサケースの構築、および歩行テストを行い改善を行うプロセスを実施した。

システム構成を図 4 に示す。慣性センサにより足部の

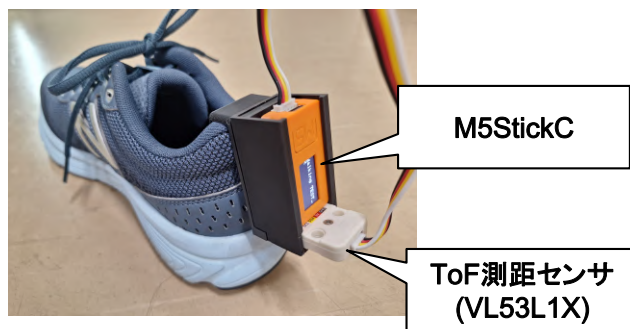


図 4: 靴装着型デバイスの外観の図

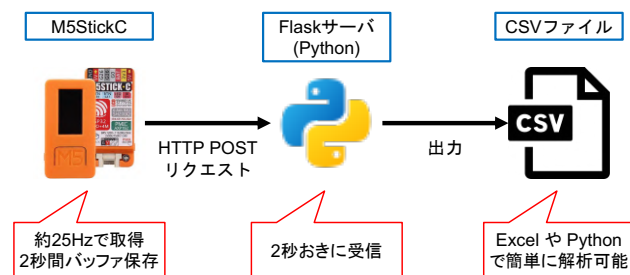


図 5: システムイメージ図

加速度およびジャイロデータを収集し、測距センサにより地面から踵までの距離を計測・記録する。データの収集および送信は、慣性センサデバイスにより行われる。慣性センサには M5StickC^{*1} を、測距センサには M5Stack 用 ToF 測距センサユニット (VL53L1X)^{*2} を使用した。ToF 測距センサは M5StickC の Grove インタフェースを介して接続され、距離の計測が可能である。図 4 に示すように、センサケースはセンサ部が下向きになるよう設計しており、これにより踵と地面との距離を安定して計測することができる。なお、センサケースは Autodesk Fusion を用いて設計した。2つのデバイスが一体化するようになっており、靴の履き口の縁に引っ掛けることができるようになっている。

4.2 データ収集方法とシステム構成

データの収集に関しては、慣性センサからセンサデータをリアルタイムに収集し、Flask ベースのサーバーに送信して CSV 形式で保存する仕組みを採用した（図 5）。用いたデバイス（M5StickC）の性能上、センサデータは約 25Hz で取得される。収集したデータは一時的に慣性センサのバッファに保存され、2 秒おきに HTTP POST リクエストで Flask サーバに送信される。サーバは Python で書かれており、POST された JSON データをログとして CSV 形式で記録される。

^{*1} <https://docs.m5stack.com/en/core/m5stickc>

^{*2} <https://docs.m5stack.com/en/unit/Unit-ToF4M>



図 6: 履き口外側装着時 図 7: 履き口内側装着時

5 プロトタイプを用いたデータ収集

プロトタイプデバイスを用いたデータ収集と、デバイスを装着して歩行した際のデバイスの使用感について調査を行った。なお、センサ設置位置は「踵（図 4）」に加え「履き口外側（図 6）」「履き口内側（図 7）」の 3 か所とし、それぞれの違いについて比較する。なお、以降の分析では右足に装着したデバイスから得られたデータを用いる。

5.1 記録したデータに関する考察

開発したデバイスで記録した競歩時データを可視化したものを図 8～図 19 に示す。以降では、データ取得間隔に関する考察、および、取得されたデータに関する考察について述べる。

5.1.1 データ取得間隔に関する考察

デバイス装着位置ごとのデータについて、それぞれのデータ取得間隔を図 8～図 10 に示す。データ取得間隔にはばらつきが見られるが、装着位置による大きな違いはないため、センサ位置が要因である遅延は発生していないと考えられる。今回は、平均して 40ms 間隔でのデータ取得を行うようにしているが、周期的に大きな遅延が発生する傾向が見られた。そのため、安定したデータ取得を実現するには、通信処理やセンサ制御に関するコードの改善が必要と考えられる。

5.1.2 データに関する考察

デバイス装着位置ごとの加速度センサ、ジャイロセンサ、測距センサ（地面との距離）のデータは図 11～図 19 に示す通りとなった。これらのデータは、今後競歩における反則動作（特に LC）の判別を目的とした機械学習の入力データとして利用することを想定している。そのため、足部が地面に接触している状態、非接触の状態とで動作の差異が明瞭に表れるデータを選定する必要がある。この観点から以下で取得データについて考察する。

■ 加速度センサ・ジャイロセンサ まず、加速度センサデータ（図 11・12・13）およびジャイロセンサデータ（図 14・15・16）について考察する。加速度センサ・ジャイロセンサについてはいずれの装着位置においても、軸

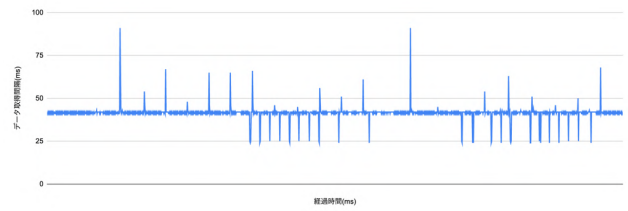


図 8: データ取得間隔（踵装着時）

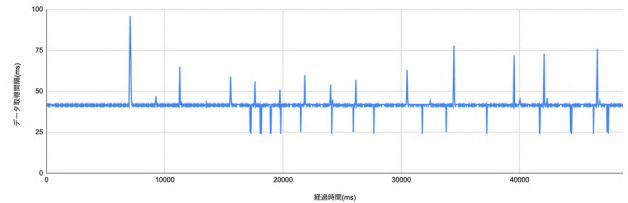


図 9: データ取得間隔（履き口外側装着時）

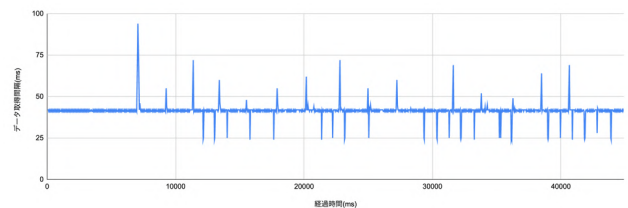


図 10: データ取得間隔（履き口内側装着時）

の違いはあるが同様のデータが取れていることがわかった。装着位置による特有の問題は確認されなかった。

踵でのデータに着目し変化を観察すると、加速度については、足を地面についている間は z 軸加速度 (az) が横ばいになり、足が地面に離れる瞬間と着地する瞬間に逆方向の極大値を取ることがわかる。また、角速度についても x 軸角速度 (gx) のデータは一步の間に 2 つの孤を描く動きを周期的に繰り返されていることがわかる。これらの動きを左右の足で同時に取得し分析することで、地面に対する接地状況の分析が可能であると考えられる。

■ 測距センサ 次に、測距センサの計測データ（図 17・18・19）について考察する。なお、本研究で用いた測距センサには計測可能な距離に上限があり、その上限を超えた場合には -1 を出力することから、数値を一律で 10,000mm とするよう設定した上で、グラフ化を行った。

測距センサによる計測値が最も小さくなるのは、足が着地動作に移行し、踵から地面に接触する瞬間である。こちらは急激に下降する部分は接地する瞬間を示しており、競歩は必ず踵から着地動作に入ることを合わせると、最小になる瞬間が接地タイミングであると断定可能である。

反対に、もっとも計測値が大きくなるのは、センサが

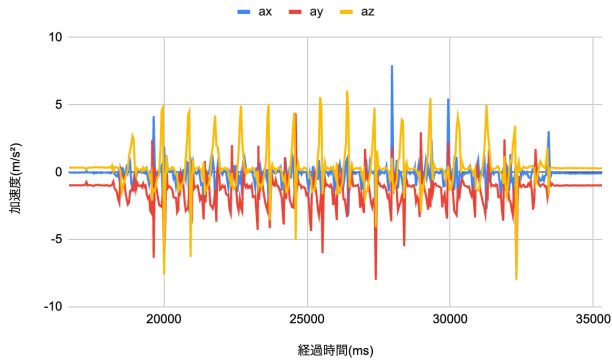


図 11: 加速度センサデータ（踵装着時）

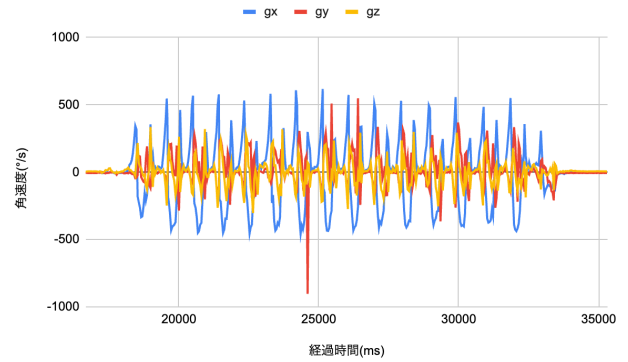


図 14: ジャイロセンサデータ（踵装着時）

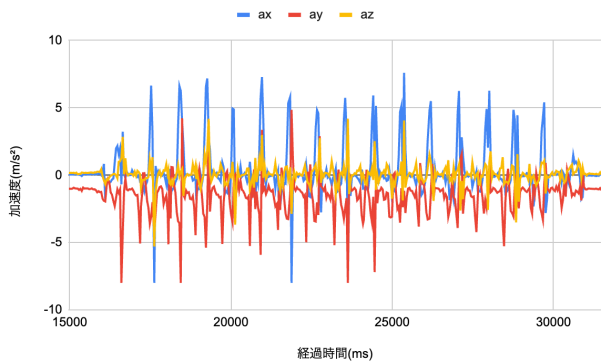


図 12: 加速度センサデータ（履き口外側装着時）

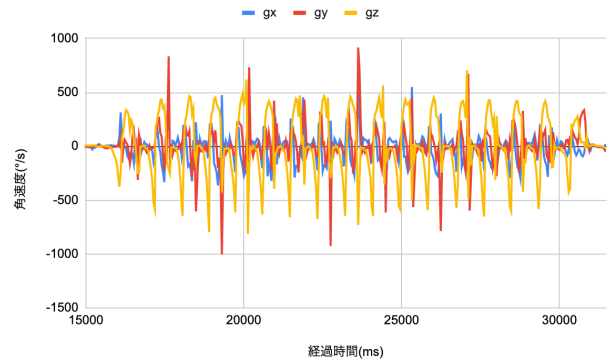


図 15: ジャイロセンサデータ（履き口外側装着時）

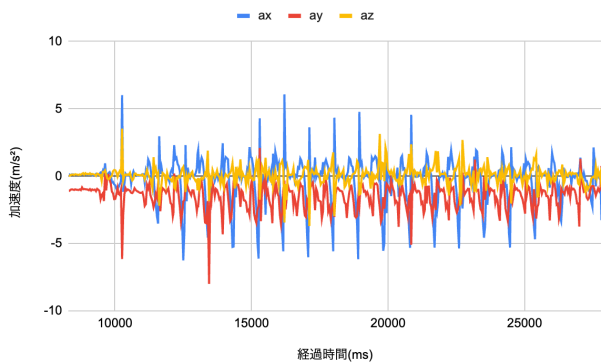


図 13: 加速度センサデータ（履き口内側装着時）

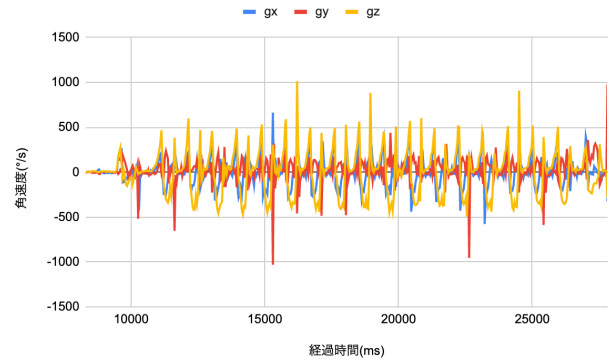


図 16: ジャイロセンサデータ（履き口内側装着時）

地面と並行となり、測定対象となる地面を検知できない状態にある瞬間である。これはすなわち、競歩動作において足が最も高く上がっており、地面から離れている状態といえる。なお、数値が急激に上昇する部分は地面から踵が離れる瞬間であるものの、つま先が地面に接地している可能性があるため、足が接地しているかどうかの判断はこの情報だけでは下せないということに注意が必要である。

グラフを確認すると、いずれの装着位置においても足の上下動に伴う周期的な距離変動は確認でき、センサとして一定の機能を果たしていることがわかった。しかし、履き口外側・内側に装着した場合は、何回かのステップにおいて最大距離まで到達しない、あるいはピークが取

得できない場合が確認できた。これに対して、踵に装着した場合は、最大値より近い出力がより安定して観測されており、装着位置としての信頼性が比較的高いと考えられる。以上のことから、本研究においては、測距センサの装着位置として踵が最も適していると判断できる。

5.2 身体動作や歩行感への影響

次に、センサを装着することによる身体動作や歩行感への影響を調査した。

まず、踵に装着する場合は、3D プリントケースのみの固定では、数歩歩行した時点でセンサが靴から脱落し、歩行データをほとんど収集することができなかった。これは、歩行動作がくるぶしを軸とした回転運動で構成さ

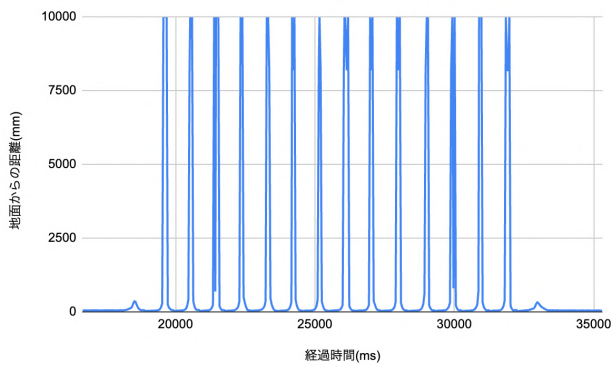


図 17: 測距センサデータ（踵装着時）

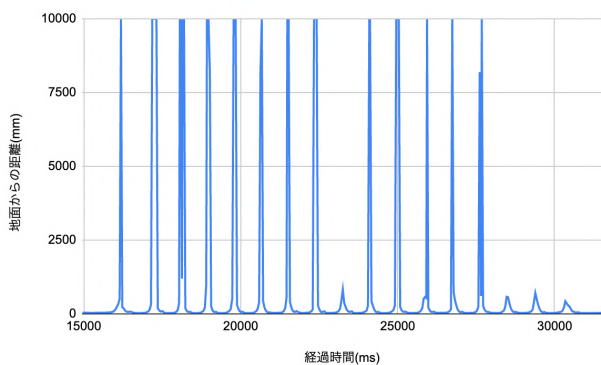


図 18: 測距センサデータ（履き口外側装着時）

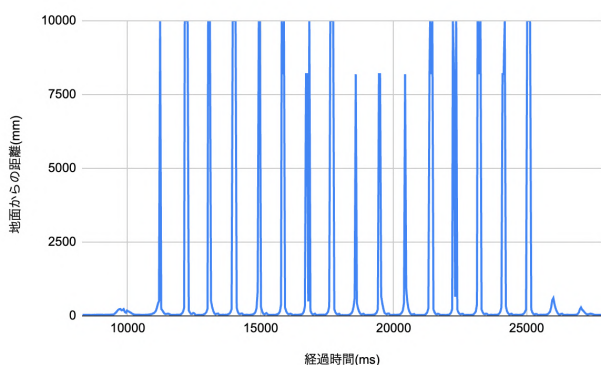


図 19: 測距センサデータ（履き口内側装着時）

れており、歩行のたびに踵部が上方へ移動するため、センサケースの固定部がその動きにより蹴り上げられたことが原因だと考えられる。今回は、代替案として粘着テープを用いてセンサを一時的に靴へ固定していたが、この方法は装着位置に個人差が生じやすく、再現性に乏しい上、粘着力に対する信頼性も十分とは言えない。したがって、今後の運用を見据えると、例えば爪部を延長するなど、脱落を防止するためのセンサケースの再設計が不可欠であると考えられる。

次に、履き口外側に装着する場合は、センサが脱落または大きくずれることはなく、歩行データの取得は可能であった。しかし、数歩歩行した時点で、くるぶし周辺に痛みを感じた。この原因は、センサケースの爪部分お

よび足部との接触面が硬質であり、歩行時の衝撃が直接足部に伝わったためであると考えられる。これに対し、接触面に軟質素材や弾性材を用いることで、痛みの軽減が期待されるが、その一方で、装着の安定性が損なわれる可能性や、素材の厚みによる歩行時の違和感が新たな課題となる。今後は、快適性と固定性を両立できる構造・素材の検討が必要である。

最後に、履き口内側に装着する場合も、センサの脱落や位置のずれは見られず、装着による痛みも確認されなかった。しかし、歩行中に対側の足部とセンサが接触しそうな場面があり、センサの存在を意識するあまり、十分なパフォーマンスを発揮できないと感じられた。特に初心者に対して本装着方法を適用することは、競歩本来の動作とは異なる癖の形成を助長する可能性があり、実用的とは言いがたい。

以上の結果から、それぞれのセンサ位置に異なる課題が見られたため、センサケース改良の必要性が確認された。今回の評価は、著者自身による主観的判断に基づくため、今後はより多くの被験者による試用を通じて、客観的かつ定量的な評価を行う必要がある。

6 おわりに

本研究では、競歩に関する知識や技術を持たない初心者が、指導者不在の環境においても、自律的にルールや技術を習得可能とするシステムの構築を目指し、靴装着型デバイスによるセンシング手法を提案した。

実験の結果、センサデータに数ミリ秒の遅延が断続的に発生する場面が確認され、データ取得の安定性に課題があることが明らかとなった。安定したデータ取得を実現するためには、通信処理およびコードの最適化が今後の課題であると考えられる。加速度センサおよびジャイロセンサによって取得されたデータについては、機械学習による動作分類を見据えた際に、有効な特徴量となり得るデータが取得できることを確認した。また、測距センサ（地面との距離）による計測においては、踵への装着時に他の装着位置と比較して最大値に近い出力が安定して観測され、装着位置としての信頼性が相対的に高いことが示唆された。一方、センサケースの設計に関しては、現時点では初心者の練習支援システムとして十分とは言えず、装着性や耐久性の観点からさらなる改良が必要である。

さらに、センサから PC への無線通信距離には制約があり、現状では約 30m 程度にとどまっている。これは競歩の実践的な練習環境においては不十分であり、今後はより長距離かつ安定したデータ通信を実現するとともに、リアルタイム性と信頼性を両立したセンシングデバイスの実装が求められる。

謝辞 本研究の一部は, JSPS 科研費 (24K15227) の助成を受けて行われたものです.

参考文献

- [1] 日刊ゲンダイ DIGITAL. 長距離なのに審判 10 人程度「競歩」は違反をどう見つける? <https://www.nikkan-gendai.com/articles/view/sports/159452>, 2015.
- [2] 日本陸上競技連盟. Race walking navi ～競歩ナビ～. https://www.jaaf.or.jp/files/upload/202202/07_183011.pdf, 2022.
- [3] Juri Taborri, Eduardo Palermo, and Stefano Rossi. Automatic Detection of Faults in Race Walking: A Comparative Analysis of Machine-Learning Algorithms Fed with Inertial Sensor Data. *Sensors*, Vol. 19, No. 6, 2019.
- [4] Juri Taborri, Eduardo Palermo, and Stefano Rossi. Warning: A wearable inertial-based sensor integrated with a support vector machine algorithm for the identification of faults during race walking. *Sensors*, Vol. 23, No. 11, 2023.
- [5] Teodorico Caporaso and Stanislao Grazioso. Iart: Inertial assistant referee and trainer for race walking. *Sensors*, Vol. 20, No. 3, 2020.
- [6] James B. Lee, Rebecca B. Mellifont, Brendan J. Burkett, and Daniel A. James. Detection of illegal race walking: A tool to assist coaching and judging. *Sensors*, Vol. 13, No. 12, pp. 16065–16074, 2013.
- [7] 長友希巳, 鹿嶋雅之, 佐藤公則, 渡邊睦. 競歩フォームの自動解析に関する研究. 電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, Vol. 2012, pp. 145–145, 2012.
- [8] セテアントタフィック, 藤本由紀夫. 529 圧電フィルムを用いた靴中敷き型センサ (g02-1 生体計測, g02 バイオエンジニアリング). 年次大会講演論文集, Vol. 2006.5, pp. 113–114, 2006.
- [9] Andrew J. Harrison, Patrick G. Molloy, and Laura-Anne M. Furlong. Does the mcneill alexander model accurately predict maximum walking speed in novice and experienced race walkers? *Journal of Sport and Health Science*, Vol. 7, No. 3, pp. 372–377, 2018.