

歩行計測を目的とした簡易 IMU を複数台用いた計測システムにおける 時間同期精度評価の基礎的研究

A Fundamental Study on Time Synchronization Accuracy in a Gait Measurement System Using Multiple Simple IMUs

岡本 佳大^{*1}, 永井 孝^{*1,2}, 舘 伸幸^{*1}, 脇谷 大志^{*3}, 和田 愛未^{*3}, 香山 瑞恵^{*1}

Yoshihiro OKAMOTO^{*1}, Takashi NAGAI^{*1,2}, Nobuyuki TACHI^{*1}, Taishi WAKITANI^{*3}, Manami WADA^{*3}, Mizue KAYAMA^{*1}

^{*1} 信州大学

^{*1}Shinshu University

^{*2} ものつくり大学

^{*2}Institute of Technologists

^{*3} 信州大学大学院総合理工学研究科

^{*3}Graduate School of Science & Technology, Shinshu University

Email: 22t2033e@shinshu-u.ac.jp

あらまし : 本研究では、教育・学習支援における人間状態理解を目的とした歩行計測に着目し、簡易 IMU を複数台用いた計測システムにおける時間同期精度を基礎的に評価する。内部タイマの時間誤差、連続信号の相互相関、および離散イベントの検出時刻差の3種の観点から同期精度を検証した。その結果、簡易 IMU を複数台用いた場合においても、一定水準の時間整合性が確保可能であることが示唆された。

キーワード : 歩行計測, 簡易 IMU, 時間同期精度, 計測システム

1. はじめに

近年、教育・学習の過程において、人間の成長や衰えを客観的に捉えるための計測手法の重要性が高まっている。特に歩行は、発達や加齢の影響が現れやすい基本的な運動であり、身体機能の変化を継続的に把握する指標として、教育システムや学習支援の文脈においても有用である。

著者らはこれまでに、フォースプレートデータを基準とした Heel Strike 検出アルゴリズムの基礎的検討を行い、歩行周期解析における時間的事件検出の妥当性を検証してきた^(1,2)。さらに、高時間分解能慣性センサを用いた計測や、高齢者の歩行時系列データ解析を通じて、正しく分割された時系列が歩行特徴の抽出に有効であることを示している⁽³⁾。これらの一連の研究により、歩行解析における時間情報の正確性が重要なことが明らかになっている。

一方、教育・学習支援への応用を想定した実践的な歩行計測では、可搬性や低コスト性の観点から、簡易 IMU を複数台用いた計測システムが有望である。しかし、複数のセンサを同時に用いる場合、センサ間の時間同期誤差が解析結果に影響を及ぼす可能性があり、その精度評価が不可欠である。

そこで本研究では、歩行計測を目的とした簡易 IMU を複数台用いた計測システムに着目し、センサ間の時間同期精度を基礎的に評価することを目的とする。本研究は、これまでに取り組んできた歩行解析に関する研究を、教育システムとして実運用可能な計測基盤へと発展させるための基礎的検討として位置づけられる。

2. 歩行計測システム概要

本研究では、歩行計測を目的として、簡易 IMU を複数台用いた計測システムを構成した。可搬性および低コスト性を考慮し、教育・学習支援への応用を想定した構成としている。計測システムの概要を図1に示す。本システムでは、各 IMU に対して共通の基準信号を与えることで時間同期を行い、それぞれのセンサで取得される時系列データにタイムスタンプを付与する方式を採用した。これにより、複数センサ間で取得されるデータの時間整合性を確保する。本研究における評価対象は、簡易 IMU を複数台用いた際に生じるセンサ間の時間同期誤差である。姿勢推定や歩行解析の精度そのものは評価対象とせず、時間同期方式に起因する誤差の特性を基礎的に検討することに焦点を当てる。

3. 時間同期精度の評価方法

本研究では、簡易 IMU を複数台用いた歩行計測システムにおける時間同期精度を多角的に評価するため、内部タイマの時間誤差、連続信号間の整合性、および離散イベントの検出時刻の差という3つの観点から評価した。これにより、同期方式の特性を異なる側面から確認することを目的とする。

まず、内部タイマに基づく時間誤差の評価では、各 IMU でのタイムスタンプのずれを計測し、センサ間で生じる時間誤差の代表値を算出した。これは、センサ内部の時間管理に起因する基本的な同期誤差を把握するための評価である。結果を表1に示す。

次に、連続信号の整合性を評価するため、複数 IMU で同時に取得された時系列波形を対象に、相互

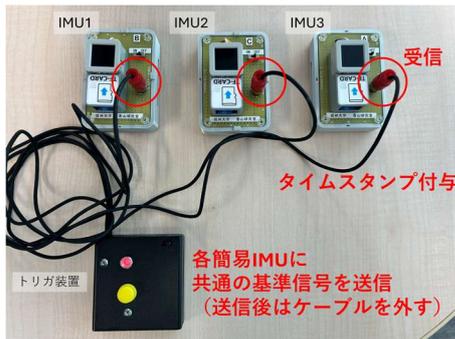


図1 複数の簡易 IMU を用いた歩行計測システムにおける時間同期方式の概要

表1 内部タイマの時間誤差評価結果

	シグナル受信時	5分後
平均	0.926 [us]	333.6 [us]
標準偏差	0.729 [us]	43.0 [us]
95%信頼区間	0.665 : 1.187	318.3 : 349.0

表2 波形の最大相互相関値

	中央と右	中央と左
平均	0.898	0.885
標準偏差	0.015	0.027
95%信頼区間	0.895 : 0.902	0.878 : 0.891

表3 ピーク検出時刻の時間差

	中央と右	中央と左
平均	2.686 [ms]	2.981 [ms]
標準偏差	2.370 [ms]	2.545 [ms]
95%信頼区間	2.544 : 2.828	2.828 : 3.134

相関を用いた評価を行った。同期後の波形間で算出される最大相互相関値は、時間軸のずれが波形の一致度を与える影響を反映する指標であり、連続的な信号レベルでの同期精度を確認することができる。これらの結果を表2に示す。

さらに、歩行計測において重要な離散的イベントとして、波形のピーク検出時刻と谷部検出時刻の差に基づく評価を行った。複数 IMU で検出されたピークと谷の時刻差を算出することで、イベントレベルでの時間同期精度を確認した。これは、Heel Strikeなどの時間的事件検出への影響を想定した評価である。ピーク検出時刻の差の結果を表3に示す。

以上の評価を通じて、提案システムにおける時間同期精度を、内部時間管理、連続信号、離散イベントという異なる観点から整理した。

4. 評価結果と教育応用への示唆

表1に示す内部タイマの時間誤差評価の結果から、等価性マージンを「誤差が500us以内」とした場合、簡易IMUを複数台用いた場合においても、センサ間の時間誤差は一定範囲内に収まることが確認された。この結果は、本研究の同期方式により、基本的な時間整合性が確保されていることを示唆している。

また、表2に示す最大相互相関値の結果から、等

価性マージンを「相互相関係数が0.85以上かつラグが10ms以内」とした場合、複数IMUで取得された連続的な時系列波形は、高い一致度を保っている。これは、時間軸のずれが波形レベルの解析に与える影響が限定的であることを示しており、歩行時系列データの比較や特徴量抽出において、本システムが一定の有効性を持つ可能性を示している。

表3に示すピーク検出時刻の時間差は、等価性マージンを「誤差が20ms以内」とした場合、離散的イベントの検出においても、大きなずれがないことを示している。Heel Strikeなどの時間的事件に基づく歩行解析時にも、複数IMU間の時間同期が解析結果に与える影響は限定的であると考えられる。

これらの結果から、簡易IMUを複数台用いた計測システムにおいて、歩行計測を通じて人間の成長や衰えを捉えるための基盤として、時間同期精度は一定の水準で確保可能であることが示唆された。教育・学習支援の文脈において、歩行データを用いた人間状態理解を行う際の基礎的知見として、本研究の結果は有用であると考えられる。

5. おわりに

本研究では、教育・学習支援における人間状態理解を目的とした歩行計測に着目し、簡易IMUを複数台用いた計測システムにおける時間同期精度を基礎的に評価した。内部タイマの時間誤差、連続信号の相互相関、および離散イベントの検出時刻差という3つの観点から同期精度を検証し、簡易IMUを複数台用いた場合においても、一定水準の時間整合性が確保可能であることを示した。本研究の結果は、歩行データを用いた教育・学習支援に向けた計測基盤構築のための基礎的知見を提供するものである。

なお、本研究で得られた時間同期精度は、歩行周期分割や左右の協調性といった比較的粗い時間単位での解析を想定したものであり、高精度な力学解析や医療診断への直接的適用を意図したものではない。一方で、教育・学習支援において人間の成長や衰えの傾向を継続的に把握する目的においては、本研究で確認された時間整合性は実用上有効な水準であると考えられる。この点を踏まえ、今後は対象や利用目的に応じた同期精度要件の整理が重要となる。

参考文献

- (1) 立花 柁樹 他：フォースプレートデータを基準とした歩行動作における Heel Strike 検出アルゴリズムの基礎的検討, JSiSE2022 年度学生研究発表会, 北信越10, 2023.
- (2) 脇谷大志 他：フォースプレートデータを基準とした歩行動作におけるかかと接地検出アルゴリズムの基礎的検討, JSiSE2024 年度第1回研究会, pp.54-61, 2024.
- (3) 和田愛未 他：平均歩行速度が異なる高齢者2群における歩行周期の時系列データの特徴, JSiSE2025 年度第1回研究会, pp.44-49, 2025.