

## C-6-2

### キネマティック GNSS 計と IMU のセンサーフュージョンによるランニング動作の走速度・ステップ長・ステップ頻度の計測

#### Measurement of running velocity, step length, and step frequency by fusion of kinematic GNSS and IMU sensors

○正 小野寺 恵介<sup>\*1,3</sup>, 廣瀬 圭<sup>\*4,3</sup>, 宮本 直人<sup>\*5,3</sup>, 近藤 亜希子<sup>\*4,3</sup>,  
中野 紘志<sup>\*1,3</sup>, 宇田 峻也<sup>\*1,3</sup>, 梶原 和子<sup>\*1,3</sup>, 竹田 正樹<sup>\*6,3</sup>

Keisuke ONODERA<sup>\*1,3</sup>, Kiyoshi HIROSE<sup>\*4,3</sup>, Naoto MIYAMOTO<sup>\*5,3</sup>, Akiko KONDO<sup>\*4,3</sup>  
Hiroshi NAKANO<sup>\*1,3</sup>, Shunya UDA<sup>\*1,3</sup>, Wako KAJIWARA<sup>\*1,3</sup> and Masaki TAKEDA<sup>\*6,3</sup>

<sup>\*1</sup> 同志社大学大学院スポーツ科学研究科 Graduate School of Health and Sports Science, Doshisha University

<sup>\*2</sup> びわこ学院大学 Biwakogakuin University

<sup>\*3</sup> 同志社大学スポーツセンシング研究センター Research Center for Sports Sensing Doshisha University

<sup>\*4</sup> 久留米工業大学 Kurume Institute of Technology

<sup>\*5</sup> 大武・ルート工業 Ohtake-root Kogyo Co., Ltd.

<sup>\*6</sup> 同志社大学スポーツ健康科学部 Faculty of Health and Sports Science, Doshisha University

In this study, we aimed to enhance the precision of running analysis in track events of athletics, including curved paths, using wearable sensors. By employing both a GNSS device and an IMU attached to the head, we devised a method to detect initial contact and toe-off timing in feet during running. Data derived from the head-mounted IMU, after eliminating centrifugal and tangential accelerations, allowed us to identify characteristic points of initial contact and toe-off from the analyzed IMU waveform. These points were then compared with timings captured by a camera, demonstrating high congruency. Furthermore, sensor fusion between the GNSS and IMU showcased the potential for high-precision measurement of step length during running. This method not only allows for the analysis of data traditionally presented as average values over specific intervals but also provides detailed insights into each running step. Such detailed data analysis can offer more comprehensive strategic advice for training and competition. We believe that this research opens the door for more intricate analyses in athletics, offering valuable insights for athletes and trainers alike, especially in track events incorporating curved paths.

**Key Words** : Running analysis, Wearable sensors, GNSS device, Inertial measurement unit (IMU), Initial contact, Toe-off, Step length, Sensor fusion

#### 1. 緒 言

陸上競技のトラック種目のパフォーマンス分析において、走行時の接地や離地のタイミング、ステップタイム、ステップ長、支持時間、滞空時間といったパラメーターは基本的な分析項目であり、多くの研究で取り上げられている (グッドウィン・クレザー, 2023)。直線路の分析であれば、レーザーによる 100 Hz 以上の走速度の解析や、パニング撮影により走行試技を捉えることが出来るため、2 次元的に走解析を行うことは比較的容易である。しかし、曲線を含む 200m 以上の種目の測定では、これらのパラメーターの正確な測定は困難である。曲線路を含む 200m 以上の種目の測定では、主にカメラを用い、区間毎の通過タイムから分析する方法が用いられている (持田他, 2007)。これらの分析は、特定の区間平均値で走速度、ステップ頻度・ステップ長を算出しており、詳細な走特性の変化を掴むには課題があった。

上記問題を解決するために、身体にセンサー (Wearable Sensor) を付けることで解析する試みがなされている。例えば、鳥居・高橋 (2013) 及び Davidson, et al. (2019) の研究では GNSS や GPS と慣性計測ユニット (IMU) を用いこれらのパラメーターを算出する試みが行われている。しかし、筆者が知る限り、曲線路を含む走路におけ

る全力疾走について、妥当性の検証が行われていない。測定のゴールデンスタンダードであるカメラによる分析 (Mason, et al., 2023) を妥当基準として検証するとともに、曲線路を含んだ全力疾走について測定する方法が開発されることは、指導現場にとって大変有益である。

本研究室では技術発展が著しい、GNSS (Global Navigation Satellite System) を走解析に用いる方法を検討してきた (杉田他, 2022; 小野寺他, 2023)。GNSS 計では 0.01 秒毎の走速度や 3 次元位置座標を誤差 1 cm 以内で測定できることから、GNSS 計により 0.01 秒毎の走速度の変化を示すとともに、頭部の高低差変化を捉えることによりストライド長 (2 ステップ) とそのストライド時間を正確に捉えられることを明らかにした。しかし、接地や離地を正確に捉えることは未だ出来ておらず、1 ステップ毎の分析 (ステップ長やステップタイム) や支持時間、滞空時間、支持距離、滞空距離などの分析にも課題があった。

そこで、本研究では、GNSS 計に加え頭部に IMU を装着して走行時の接地及び離地を検出する新しい方法を考案することを目的とした。IMU を用いて接地と離地のタイミングを正確に検出できれば、GNSS データとセンサーフュージョンを行うことで、走速度とステップタイムに加えて、ステップ長も正確に測定できると考えられる。また、両機器を頭部に装着し測定することが出来れば、将来的には 1 つの計測機器とすることも可能である。

この新たな測定方法により、競技者や指導者は 1 歩ごとの走行を詳細に分析できるようになり、技術向上やトレーニングの効果検証を行うために有用な資料の提供が可能となる。また、この研究は陸上競技の分野での GNSS と IMU 技術のさらなる応用を促進することにも貢献できる。

## 2. 方 法

### 2・1 測定機器及び被験者

本研究室での先行研究 (杉田他, 2022) に基づき、高精度キネマティック GNSS 計アンテナをラグビー用ヘッドギアの上に取り付け、受信機本体をウエストバックに収納した。受信機には、Septentrio 社の MosaicTM-X5 (100 Hz) を使用した。リアルタイムキネマティックでのパフォーマンスは水平精度  $0.6\text{cm} + 0.5\text{ppm}$ 、垂直精度  $1\text{cm} + 1\text{ppm}$ 、初期化時間 7 秒であり、速度精度は  $3\text{cm}/\text{sec}$  である。高精度キネマティック測位に不可欠な GNSS ベースステーションは、測定場所からは 1 km 以内に設置した。また、IMU をヘッドギアの前部に取り付けた。IMU はテック技販社の IMS-SD (1000Hz) を用いた。搭載センサは 3 軸加速度・3 軸角速度・3 軸地磁気であり、加速度の計測レンジ:  $\pm 4/\pm 8/\pm 16/\pm 30\text{G}$ 、角速度の計測レンジ:  $\pm 4000\text{deg}/\text{sec}$  である。これらを装着した際の構成を Fig. 1 に示す。Y 軸を進行方向とし、X 軸が左右方向、Z 軸が上下方向とした。Y 軸に対する回転角度  $\theta$  をピッチ角、X 軸に対する回転角度  $\phi$  をロール角、Z 軸に対する回転角度  $\psi$  をヨー角とした。ヘッドギアを被験者 (同志社大学体育会陸上競技部に所属する 400 m 走を専門とする者 1 名、パーソナルベスト 50"01) に装着させ、十分なウォーミングアップの後 400 m を全力で走らせた。



Fig. 1 Configuration of GNSS and IMU attachment on rugby headgear

## 2・2 カメラによる接地タイミングの算出と走行パラメーターの算出

接地及び離地のタイミングを検出すると共に、ステップ長の妥当規準を算出するために、400m走の曲線路(286-294 m)と直線路(356-364m)について、Fig.2に示した通り、各2台ずつのカメラで動画を撮影した。曲線路と直線路では走行様式が異なるとされている(例.東・矢内, 2016)。そのため、曲線路・直線路それぞれ8mずつ分析することとした。グッドウィン・クレザー(2023)によれば、これまでの代表的な研究におけるストライド長(2歩分)は $4.5\pm 0.5\text{m}$ である。そのため、8m区間を撮影することができれば、少なくともワンストライド以上を捉えることが出来ると考えた。ビデオカメラはStreamPix 8を用いて200fpsで撮影を行った。接地のタイミングは、先行研究(柴山他, 2011)を参考に、走行中の動画をコマ送り再生しスパイクの一部分が走路に接したフレームを接地と定義し、スパイクの全ての箇所が走路より離れたフレームを離地と定義し、それぞれの時刻情報を読み取った。ステップ長の定義は土江(2018)が示したものを参考にし、接地時の重心から次の接地時の重心と定義した。また、本研究では重心については腰部(ウエストバックの目印)と定義した。カメラの分析にはWINalyzeを用い、ストライド長は3次元動作解析にて算出した。

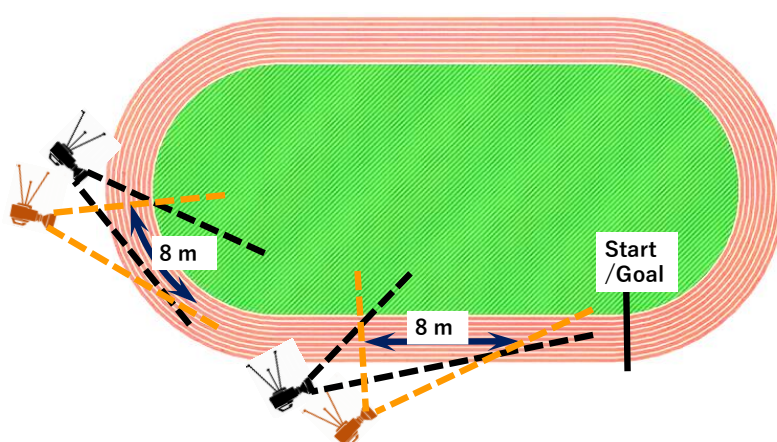


Fig.2 Camera setup for detecting initial contact and toe-off timings and calculating step length in 400 m run on curved(286-294 m) and straight paths (356-364 m)

## 2・3 GNSS・カメラ・IMUの同期方法

GNSSとIMUの時間同期は、廣瀬他(2023)に基づき、ランニング中の垂直方向の加速度を用いた。また、被験者には計測機器を身につけた後、カメラの測定区間内(直線路・曲線路それぞれ)で一度ずつ垂直ジャンプをしてもらい、GNSSで捉えた再頂点と及びカメラでとらえた最頂点を用い、GNSSとカメラを時間同期させた。

## 2・4 IMUによる接地・離地タイミングの検出方法の開発

これまで足部に装着したIMUより接地・離地を捉えることを試みた研究がなされている(例.鳥居・高橋, 2013)。これらのことから、本研究でも、頭部のIMU波形を足部の波形に近いものと出来れば接地及び離地の特徴点を掴むことが出来ると考えた。IMUによる接地及び離地の検出の流れをFig.3に示す。

IMUのデータについては、すべてMATLABR2023aを用いて分析した。IMU(1000Hz)により得られたデータについて、まずButterworthゼロ位相低域通過フィルタを使用してノイズを除去した。その際のフィルタの次数は5、カットオフ周波数は30Hzと設定した。

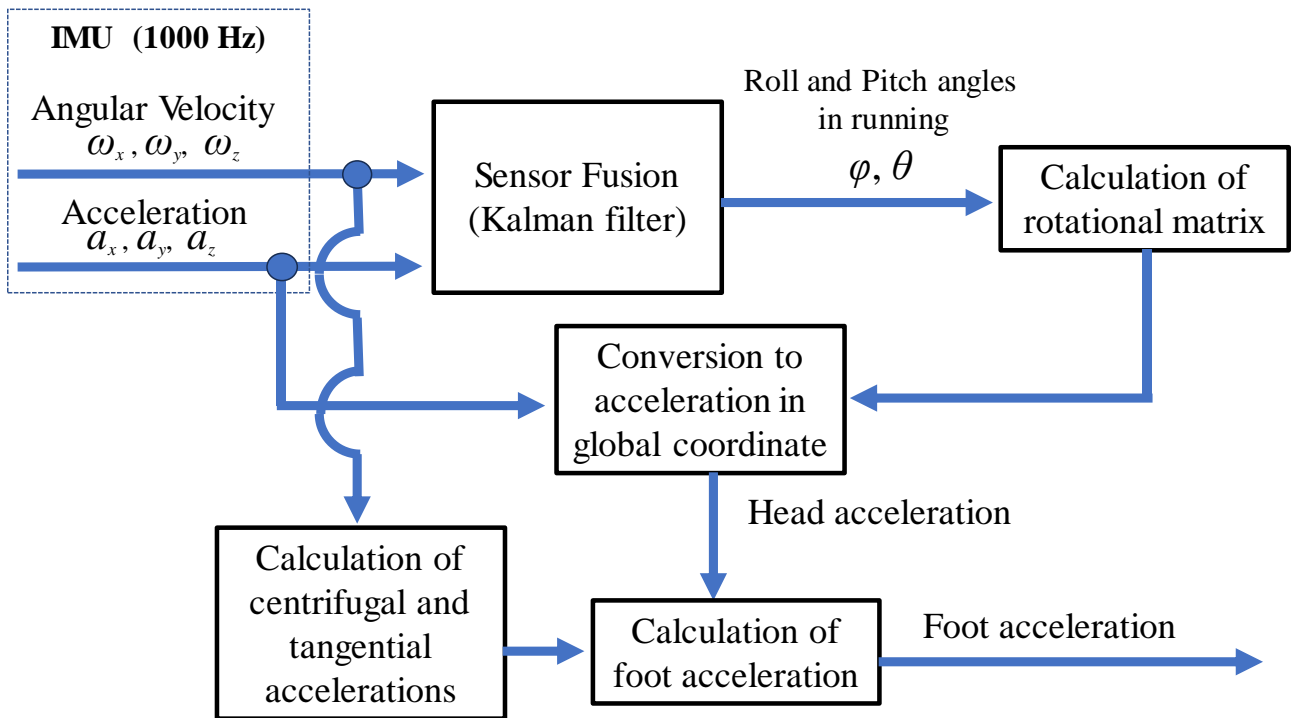


Fig. 3 Flowchart for IMU-based detection of initial contact and toe-off timing in feet

データ処理後，廣瀬他（2011, 2023）の方法に基づき，拡張版カルマンフィルタを用いてランニング中のピッチ角（ $\theta$ ）とロール角（ $\phi$ ）を算出し，これらを用いて回転行列を算出した．IMUより取得した加速度と回転行列を用いて，頭部の絶対座標の加速度を算出した結果を Fig. 4 に示す．本結果では，接地及び離地のタイミングを検出することは困難であった．その理由として，以下の理由が考えられた．走動作では，股関節の屈曲及び進展動作や頭部の揺動が起こる．そのため，頭部加速度には，並進加速度（ $a$ ）と重力加速度（ $g$ ）に加え，遠心加速度，接線加速度が加わっている．頭部加速度より遠心加速度と接線加速度を取り除くことで，足部の IMU からの波形に極めて近い波形となり，接地及び離地を捉えることが出来ると考えた．

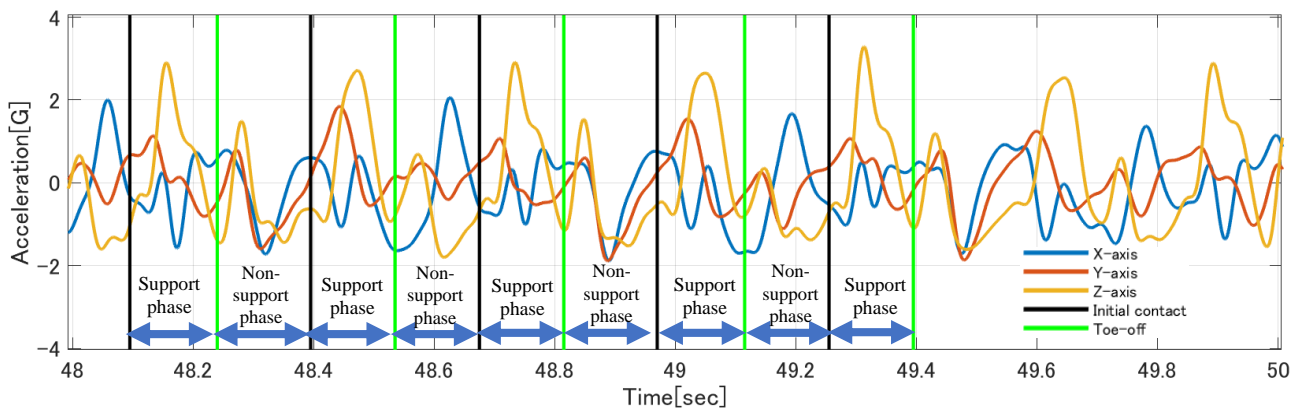


Fig. 4 Acceleration waveforms of a runner's head during a 400 m run. This figure displays the processed acceleration data captured from an IMU mounted on a runner's head during a 400 m run, prior to the removal of centrifugal and tangential accelerations. The horizontal axis represents the elapsed time since the start of the 400 m run. The vertical black and green lines represent the moments of initial contact and toe-off in feet respectively, as captured by the camera. The waveform illustrates the difficulty in discerning the exact moments of initial contact and toe-off in feet, even after some initial data processing.

回転運動の場合の加速度 ( $A_p$ ) は加速度を  $a$ , 角速度を  $\omega$ , 回転半径を  $d$ , 重力加速度を  $g$  としたときに (1) の様に表すことが出来る. そのため, 遠心加速度, 接線加速度を取り除いた加速度  $A$  は以下の式 (2) で求めることが出来る.

$$A_p = a + \omega \times \omega \times d + \dot{\omega} \times d + g \quad (1)$$

$$A = a + g = A_p - (\omega \times \omega \times d + \dot{\omega} \times d) \quad (2)$$

曲線路と直線路では走行様式が異なるとされている (例. 東・矢内, 2016). そのため, 加速度  $A$  についての直線路・曲線路でそれぞれ分析をし, カメラが捉えた接地及び離地のタイミングと比較することで, 接地と離地に関連する特徴点を捉える事を試みた.

まず, カメラでの撮影した直線路及び曲線路の区間の中で, 直線路の最初の 1 ステップ (Straight-step 1: S-step 1) と曲線路の最初の 1 ステップ (Curve-step 1: C-step 1) の接地と離地に着目した (Fig. 5). まず, 接地点と最も関連しそうな特徴点として Y 軸の加速度に着目した. McMahon and Cheng (1990) は接地後速度が減速するとしており, この加速度の変化はその減速の始まりを捉えていると考えられる. この特徴点は直線路及び曲線路共にカメラで捉えた接地の後に表れており, カメラが捉えた接地と比較をして S-step 1 では 0.033 秒後, C-step 1 では 0.015 秒後に迎えていた. これは, 足が地面に接地をしてから, 地面に力が伝わり, 加速度が低下し始めるのに若干の遅れが生じるためであると推察される. 次に, 離地に最も関連しそうな特徴点として Z 軸の加速度に着目した. 走動作では, 重心が上下方向に動くとしてされている (Cavagna and Margaria, 1966) が, これらの変化を捉えたものであり離地のタイミングとほとんど変わらないタイミングで表れている. この特徴点を迎えるタイミングは, カメラが捉えた離地と比較をして S-step 1 では 0.007 秒後, C-step 1 では 0.010 秒前であった.

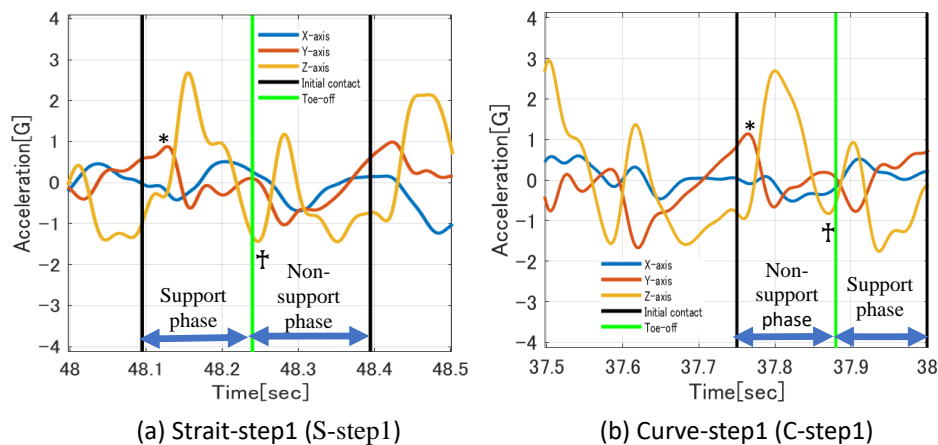


Fig. 5 Acceleration profiles after removing centrifugal and tangential accelerations. (a) represents the first step (Straight-step 1: S-step 1) in the straight path (around 360 m), and (b) represents the first step (Curve-step 1: C-step 1) in the curved path (around 290 m). The vertical black and green lines represent the moments of initial contact and toe-off in feet respectively, as captured by the camera. Asterisks (\*) indicate characteristic points of initial contact, and crosses (†) indicate characteristic points of toe-off. The horizontal axis represents the elapsed time since the start of the 400 m run.

走動作は同じ動きが繰り返される循環運動である (小木曾, 2018) ため, 特徴点と接地を迎えるタイミングは各直線内, 曲線内で大きな差があるとは考えづらい. そのため, ステップ毎に IMU の波形より特徴点を捉える事で, 接地及び離地のタイミングを捉える事が出来ると考えた. 即ち, 直線路では Y 軸方向の加速度が最高に達し減少を迎える点 (特徴点) と比較し, 直線路では 0.033 秒前, 曲線路では 0.015 秒前に接地を迎え, 直線路では Z 軸方向の加速度が最低に達し増加を迎える点より直線路では 0.007 秒前, 曲線路では 0.010 秒後に接地を迎えるると仮定した.

直線路についてカメラで捉える事が出来たステップは5ステップであり、それぞれ S-step 1–S-step 5 と定義した。S-step 2–S-step 5 について、上記仮定に基づいて分析した接地及び離地のタイミングと、カメラで捉えた接地及び離地のタイミングとの誤差時間（絶対値）の平均及び標準偏差を算出した。さらに、S-step 2–S-step 5 について、IMUの特徴点とカメラで捉えた接地タイミングとの誤差時間（絶対値）の平均及び標準偏差を算出した。曲線路では、カメラで捉える事が出来たステップは6ステップであり、それぞれ C-step 1–C-step 6 と定義し直線路と同様に分析した。

## 2・5 ステップ長の算出

ステップ長の算出は Fig. 6 に示した流れで行った。IMU によって捉えた接地の時間情報における GNSS の位置情報（緯度・経度）を読み取り、接地から離地までの2次元座標の距離を算出することでステップ長を算出した。GNSS アンテナを頭部に装着していたことから、頭の動揺により、本研究で定義した重心（腰部）から算出したステップ長との誤差が存在すると考えた。そのため、IMU より算出したピッチ角 ( $\varphi$ ) とロール角 ( $\theta$ ) を用い、頭部の動揺により生まれる誤差を算出し、その値を用いステップ長を補正した。

分析の対象としたステップは、3次元動作解析を行うためにキャリブレーションした 400 m 走の曲線路 (286-294 m) と直線路 (356-364 m) 内のステップとしたが、曲線路では C-step 1–C-step 5、直線路では S-step 1–S-step 4 が該当した。

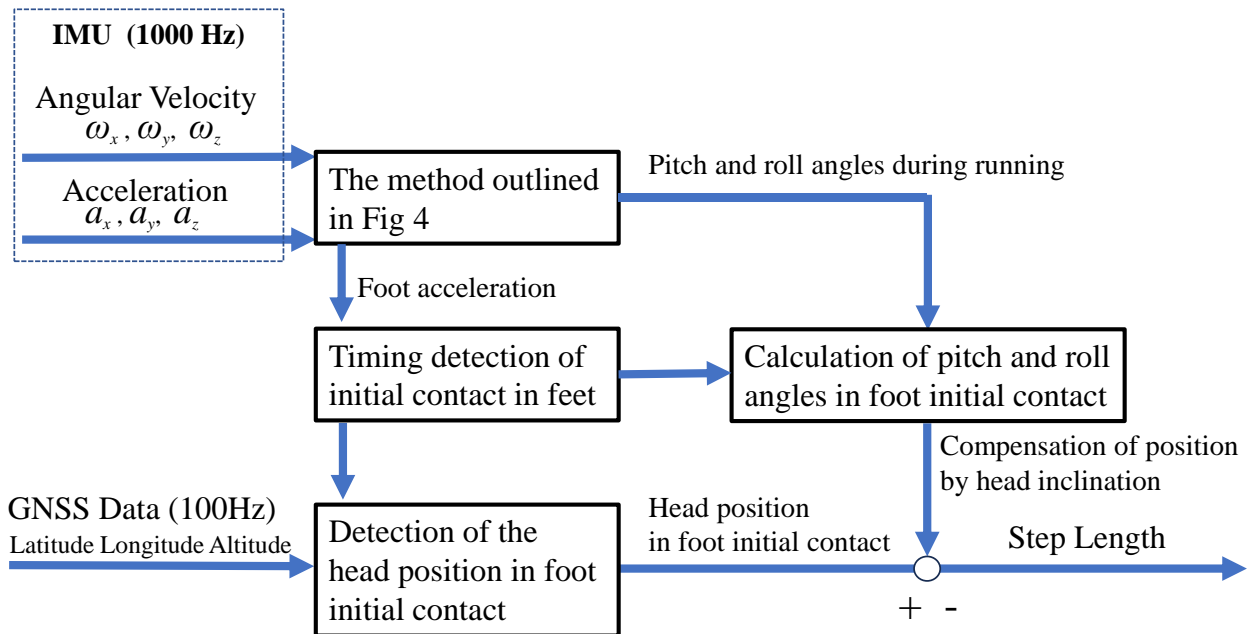


Fig. 6 Flowchart for step length calculation incorporating GNSS and IMU data correction

## 3. 結 果

### 3・1 接地・離地タイミングの検出の妥当性

直線路における IMU 波形を Fig. 7 に示した。Fig. 5 (a) で示した様に、S-step 1 を分析して捉えた特徴点の 0.033 秒前を IMU での接地と仮定し、S-step 2–S-step 5 について、この仮定に基づいて分析した接地タイミングと、カメラで捉えた接地タイミングとの誤差時間（絶対値）の平均及び標準偏差を算出した (Table 1 左)。結果は  $0.002 \pm 0.001$  秒であった。また、特徴点とカメラで捉えた接地との時間差の平均と標準偏差は  $0.031 \pm 0.001$  秒であった。離地については、特徴点の 0.007 秒前を IMU 離地と仮定し、S-step 2–S-step 5 について、この仮定に基づいて分析した離地タイミングと、カメラで捉えた離地タイミングとの誤差時間（絶対値）の平均及び標準偏差を算出した (Table 1 右)。結果は、 $0.007 \pm 0.004$  秒であった。また、全てのステップにおける、特徴点とカメラで捉えた離地との時間差の平均と標準偏差は  $0.01 \pm 0.004$  秒であった。

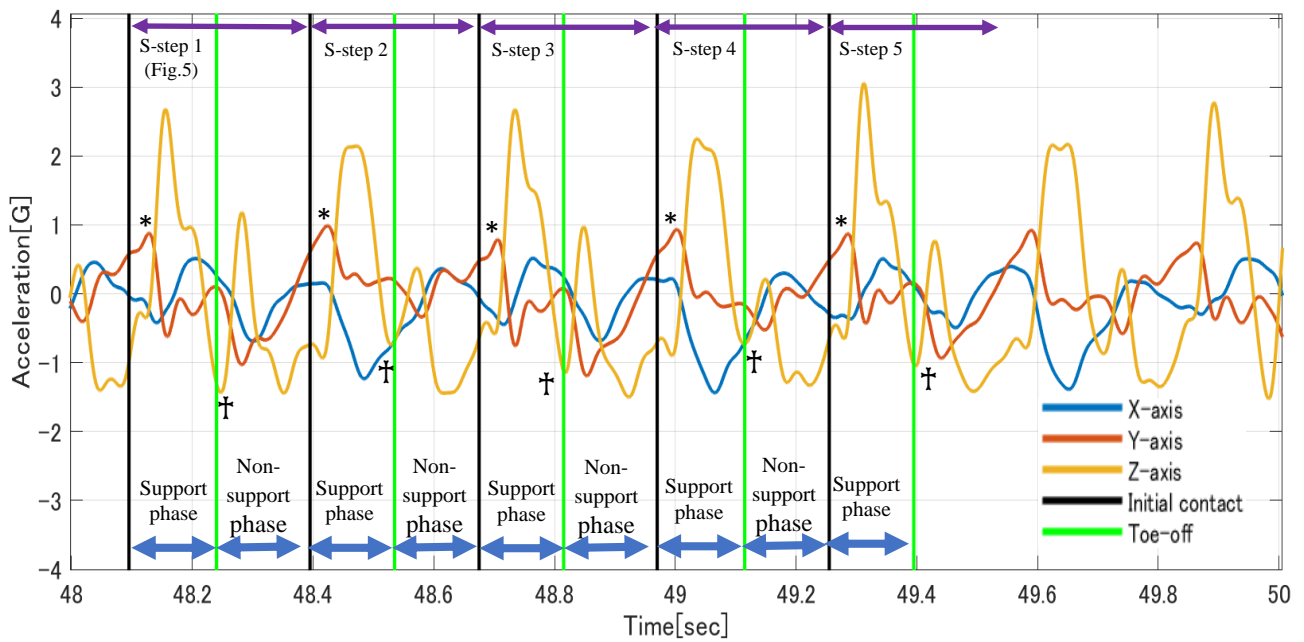


Fig. 7 IMU waveform analysis on the straight path (around 360 m). Asterisks (\*) indicate characteristic points of initial contact and crosses (†) indicate characteristic points of toe-off in the IMU waveform. The vertical black and green lines represent the moments of initial contact and toe-off in feet respectively, as captured by the camera. The horizontal axis represents the elapsed time since the start of the 400 m run.

Table 1 Timing discrepancies between camera and IMU for initial contact and toe-off in feet on the straight path

	Initial Contact (Camera)	Feature Point for Initial Contact (IMU)			Toe-off (Camera)	Feature Point for Toe-off (IMU)			
	Timestamp for 400m	Timestamp for 400m	Time Difference vs. Camera	vs. S-step1	Timestamp for 400m	Timestamp for 400m	Time Difference vs. Camera	vs. S-step1	
S-step1	48.095	48.128	0.033		48.24	48.247	0.007		
S-step2	48.395	48.424	0.029	0.004	48.535	48.529	-0.006	0.013	
S-step3	48.675	48.706	0.031	0.002	48.815	48.818	0.003	0.004	
S-step4	48.970	49.003	0.033	0.000	49.115	49.114	-0.001	0.008	
S-step5	49.255	49.286	0.031	0.002	49.395	49.398	0.003	0.004	
Average			0.031	0.002	Average			0.001	0.007
Standard Deviation			0.001	0.001	Standard Deviation			0.004	0.004

Note: All values are in seconds.

曲線路における IMU 波形を Fig. 8 に示した。Fig. 5 (b) で示した様に、C-step 1 を分析して捉えた特徴点の 0.015 秒前を IMU での接地と仮定し、C-step 2–C-step 5 について、この仮定に基づいて分析した接地タイミングと、カメラで捉えた接地タイミングとの誤差時間（絶対値）の平均及び標準偏差を算出した（Table 2 左）。結果は  $0.004 \pm 0.002$  秒であった。また、特徴点とカメラで捉えた接地との時間差の平均と標準偏差は  $0.012 \pm 0.003$  秒であった。離地については、特徴点の 0.010 秒後を IMU 離地と仮定し、C-step 2–C-step 6 について、この仮定に基づいて分析した離地タイミングと、カメラで捉えた離地タイミングとの誤差時間（絶対値）の平均及び標準偏差を算出した（Table 2 右）。結果は、 $0.004 \pm 0.002$  秒であった。また、全てのステップにおける、特徴点とカメラで捉えた離地との時間差の平均と標準偏差は  $0.011 \pm 0.004$  秒であった。

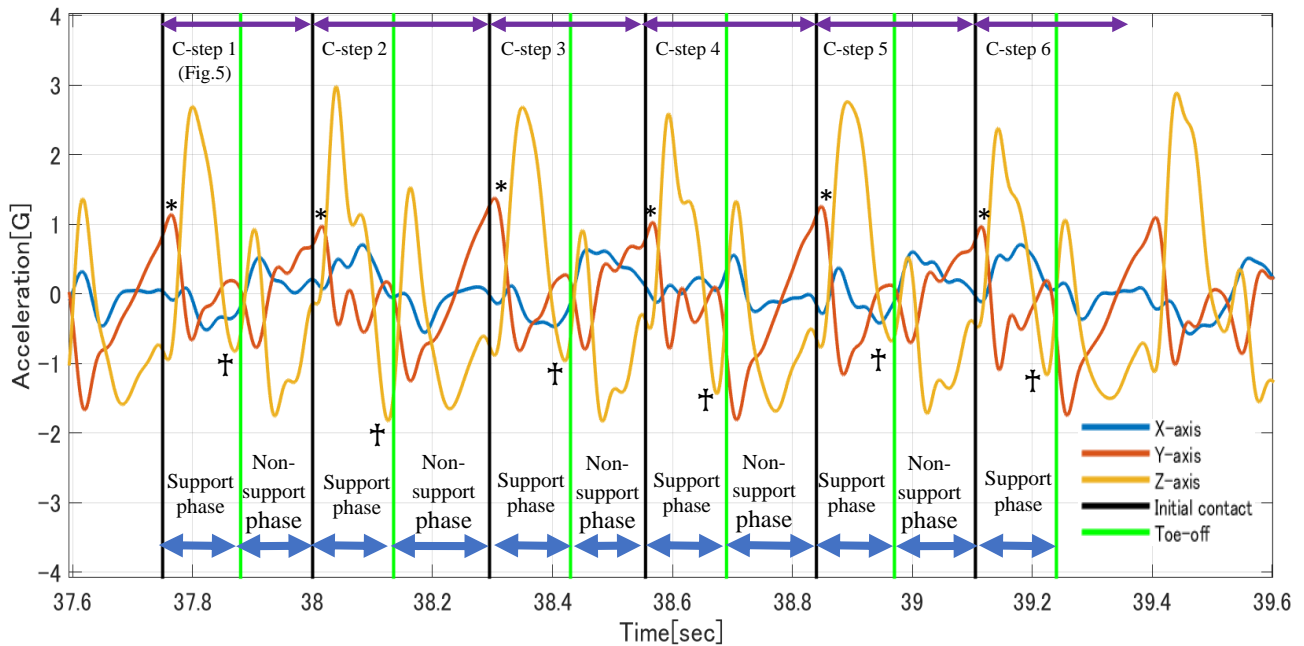


Fig. 8 IMU waveform analysis on the curved path (around 290 m). Asterisks (\*) indicate characteristic points of initial contact and crosses (†) indicate characteristic points of toe-off in the IMU waveform. The vertical black and green lines represent the moments of initial contact and toe-off in feet respectively, as captured by the camera. The horizontal axis represents the elapsed time since the start of the 400 m run.

Table 2 Timing discrepancies between camera and IMU for initial contact and toe-off in feet on the curved path

	Initial Contact (Camera)	Feature Point for Initial Contact (IMU)			Toe-off (Camera)	Feature Point for Toe-off (IMU)		
	Timestamp for 400m	Timestamp for 400m	Time Difference vs. Camera	vs. S-step1	Timestamp for 400m	Timestamp for 400m	Time Difference vs. Camera	vs. S-step1
C-step1	37.750	37.765	0.015		37.880	37.870	-0.010	
C-step2	38.000	38.016	0.016	0.001	38.135	38.126	-0.009	0.001
C-step3	38.295	38.304	0.009	0.006	38.430	38.421	-0.009	0.001
C-step4	38.555	38.567	0.012	0.003	38.690	38.674	-0.016	0.006
C-step5	38.840	38.848	0.008	0.007	38.970	38.965	-0.005	0.005
C-step6	39.105	39.115	0.010	0.005	39.240	39.224	-0.016	0.006
Average			0.012	0.004	Average		-0.011	0.004
Standard Deviation			0.003	0.002	Standard Deviation		0.004	0.002

Note: All values are in seconds.

### 3・2 ステップ長の算出の妥当性

IMU と GNSS のセンサーフュージョンによりステップ長を算出した。それらの値について、カメラより得られた妥当基準と比較した。結果は Table 3 に示した通りである。直線路では、IMU による補正を行わなかった場合、3 ステップの誤差が  $4.5 \pm 0.2 \text{ cm}$  であったが、IMU を用い算出した頭部の傾きより重心との距離を推定し補正した場合の誤差は  $1.5 \pm 0.6 \text{ cm}$  であった。曲線路の結果では IMU による補正を行わなかった場合、4 ステップの誤差が  $1.6 \pm 1.3 \text{ cm}$  であったが、IMU を用い算出した頭部の傾きより重心との距離を推定し補正した場合の誤差は  $1.1 \pm 1.1 \text{ cm}$  であった。



Table 3 Step length discrepancies between camera, GNSS, and IMU-fused data on the straight path

	Camera (cm)	GNSS (cm)		GNSS & IMU (cm)	
		Value	Error (Camera Ref.)	Value	Error (Camera Ref.)
S-step 1 - S-step 2	197.5	192.7	4.8	198.2	0.7
S-step 2 - S-step 3	181.8	186.3	4.5	179.9	2.0
S-step 3 - S-step 4	191.2	186.8	4.4	193.1	1.9
Average	190.2	188.6	4.5	190.4	1.5
Standard Deviation	6.4	2.9	0.2	7.7	0.6

Table 4 Step length discrepancies between camera, GNSS, and IMU-fused data on the curved path

	Camera (cm)	GNSS (cm)		GNSS & IMU (cm)	
		Value	Error (Camera Ref.)	Value	Error (Camera Ref.)
C-step 1 - C-step 2	181.2	181.6	0.4	181.5	0.3
C-step 2 - C-step 3	205.6	206.1	0.5	204.9	0.6
C-step 3 - C-step 4	184.7	186.8	2.1	185.3	0.6
C-step 4 - C-step 5	202.2	198.7	3.5	199.3	2.9
Average	193.4	193.3	1.6	192.8	1.1
Standard Deviation	10.6	9.7	1.3	9.7	1.1

## 4. 考 察

### 4・1 接地・離地・ステップ長の測定精度

本研究では、遠心加速度と接線加速度を除去したうえで絶対座標における加速度を算出することで、頭部 IMU より接地及び離地の特徴点を捉えることを試みた。それらの特徴点を用い算出した接地及び離地を、カメラを用いて特定した接地及び離地のタイミングと比較した。結果として、直線路では接地  $0.002 \pm 0.001$  秒、離地  $0.007 \pm 0.004$  秒以内で一致した。また、曲線路では接地  $0.004 \pm 0.002$  秒、離地  $0.004 \pm 0.002$  秒以内で一致した。本研究で用いたカメラが 200 fps であったことから、少なくとも 0.005 秒以内の誤差は生じることとなる。これらを顧みれば、これまで足部に装着されていた IMU や足圧センサやカメラにより特定されていた接地及び離地のタイミングを、頭部 IMU より高精度で検出することが出来たと言える。今後、それらの特徴点を自動判別し、接地及び離地のタイミングを検出するアルゴリズムを作成することで、接地及び離地の自動判別が可能になると考えられる。これまで、本研究室では、走速度に加え、2 ステップ分に相当するストライドについて、平均のストライド頻度やストライド長 (杉田他, 2022) や 1 ストライドについてのストライド時間やストライド長 (小野寺他, 2023) の精度検証が行われてきたが、1 ステップ毎の測定精度については言及されていなかった。また、測定のゴールドスタンダードであるカメラの解析 (Mason, et al., 2023) を妥当基準とし、Wearable sensor を用いて、全力疾走における一步毎のステップ長を高精度で測定できるかについての精度解析は行われていなかった。そこで本研究では、カメラによる妥当基準と比較し、頭部 IMU によりカメラで検出した接地及び離地とほぼ同様に捉える事ができた。また、頭部 GNSS 計とのセンサーフュージョンを行い、頭部の傾き修正することで、直線路では誤差  $1.5 \pm 0.6$  cm、曲線路では  $1.1 \pm 1.1$  cm とカメラで捉えたステップとほぼ同じ値で算出することが出来た。更に、接地及び離地を正確に捉えることが出来ることから、支持距離 (時間) ・滞空距離等の走行パラメーターの算出も可能になる手法であると考えられる。

## 4・2 本研究の実用性と応用

本研究により、曲線路を含むトラック種目において、これまで平均値で示されていた走速度やステップ長・頻度について1ステップ毎の分析が可能となる手法を提案した。本結果は、競技者や指導者、特に1歩ごとの変化を捉えるのが非常に困難であった200m以上の曲線路を含む種目等での活用が期待される。持田ほか(2007)によれば、走スピードと対比させて「ストライド長・ストライド頻度を検討することは技術的・戦略的課題を推察し、トレーニングへの示唆を得るうえで有益である」としているが、これらの検討を1歩毎の変化を捉えながら行うことが出来る。例えば、競技者が最高速度に達している地点でのステップ長・頻度を算出することができ、速度の低下率とそれに伴うステップ長・頻度の変化についても捉えることができる。さらに、曲線路のみを走る区間が存在するリレー種目での加速区間を決定するための測定にも使用することが期待できる。

## 4・3 本研究の課題と展望

本研究では、400m走を専門としている選手1名を対象とした。測定のカメラを妥当基準として分析した結果、直線路・曲線路ともに高精度の測定について妥当性が確保できた。しかし、被験者が1名であったため、信頼性が確保できたとは言えない。今後、異なる走特性を持つ者、例えば異なる年齢、競技能力、性別の者を対象として、信頼性について検証していく必要がある。

本研究では、将来的にGNSSとIMUを1つに統合したシステムの開発を目指していることから、GNSSとIMU共に頭部に装着し、走行解析における有効性を示した。本研究では、GNSSとIMUの同期を手動で行ったが、今後の課題として、同期が可能なシステムの開発やより簡便な計測システムの開発等が挙げられる。

## 5. 結 語

本研究では、曲線路を含む陸上競技のトラック種目におけるwearable sensorを用いた走行解析を高精度化するための手法を開発するために、GNSSに加え頭部にIMUを装着して走行時の接地及び離地を検出する方法を考案することを目的とした。頭部IMUから得られるデータについて、遠心加速度と接線加速度を用いて足部に相当する加速度を算出し、分析したIMUの結果より、接地と離地の特徴点を特定した。それらの特徴点を基に、カメラで取得した接地及び離地のタイミングと比較し、高い一致性を示す結果を得ることができた。また、GNSSとIMUのセンサーフュージョンにより、走行時のステップ長の高精度の測定が可能であることを示した。本研究の手法により、従来まで特定の区間の平均値で示していたデータの解析だけでなく、1ステップ毎の詳細な走行データの解析が可能となり、トレーニングや競技の戦略的なアドバイスをより詳細に提供することができるようになると考えられる。

## 文 献

- (1) 東洋功, 矢内利政, “陸上競技の短距離走における曲走路疾走中の身体の角運動量”, *バイオメカニクス研究*, Vol. 16, No. 3 (2012), pp.128-137.
- (2) Cavagna, G. A., & Margaria, R., “Mechanics of walking”, *Journal of applied physiology*, Vol. 21, No.1 (1966) pp. 271-278.
- (3) Davidson, P., Virekunna, H., Sharma, D., Piché, R., and Cronin, N. “Continuous analysis of running mechanics by means of an integrated INS/GPS device”, *Sensors*, Vol. 19, No. 6 (2019). pp. 1480-1500.
- (4) 廣瀬圭, 土岐仁, 小田紳介, 永作清, ”拡張カルマンフィルタを用いたスキー・ターンの運動計測と力学解析に関する研究”, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 77, No. 774 (2011), pp470-480.
- (5) 廣瀬圭, 近藤亜希子, 小野寺恵介, 宮本直人, 中野紘志, 宇田峻也, 梶原和子, 竹田正樹. “GNSSとIMUを用いたランニング動作における3次元速度・位置推定に関する研究”, *シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集 2023* (2023).
- (6) ジョングッドウィン, ダンクレザー, 長谷川裕訳, *スプリントのバイオメカニクス FORCE2*, (2023), pp.17-22.
- (7) Mason, R., Pearson, L. T., Barry, G., Young, F., Lennon, O., Godfrey, A., and Stuart, S. “Wearables for running gait analysis: A systematic review”, *Sports Medicine*, Vol. 53, No. 1 (2023) pp. 241-268.

- (8) McMahon, T. A., and Cheng, G. C., "The mechanics of running: how does stiffness couple with speed?", *Journal of biomechanics*, Vol. 23 (1990), pp.65-78.
- (9) 持田尚, 松尾彰文, 柳谷登志雄, 矢野隆照, 杉田正明, 阿江通良, "Overlay 表示技術を用いた陸上競技 400m 走レースの時間分析", 陸上競技研究紀要, Vol. 3 (2007), pp 9-15.
- (10) 小木曾一之"神経筋システムからみたスプリント走" スプリント学ハンドブック全てのスポーツパフォーマンスの基盤. (2018), pp. 12-29.
- (11) 小野寺恵介, 宮本直人, 廣瀬圭, 中野紘志, 宇田峻也, 梶原和子, 清水大智, 竹田正樹, "高精度キネマティック GNSS を用いた走解析の精度検証", 日本体育学会大会予稿集 第 73 回 (2023), p.88.
- (12) 柴山一仁, 藤井範久, 阿江通良, "一流 110m ハードル走選手の 1 サイクル動作に関するキネマティクスの研究: 疾走速度および脚長と動作の関連から", 体育学研究, Vol. 56, No. 1 (2011), pp. 75-88.
- (13) 杉田一陽, 宮本直人, 竹田正樹. "高精度キネマティック GNSS 計を用いた陸上競技 400m 走の走速, ストライド長, サイクルタイムの計測", シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集 2022 (2022), B-4-3.
- (14) 鳥居洋介, 高橋隆行, "GPS を用いた陸上競技者のピッチ・ストライド精密計測装置の開発: 加速度センサの取付位置の再検討と測定精度の向上", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2A2-G02 (2013), pp.1-4.
- (15) 土江寛裕 "スプリント走のバイオメカニクス" スプリント学ハンドブック全てのスポーツパフォーマンスの基盤. (2018), pp. 62-80.