

## 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

### A Study on estimation of 3D velocity and position in running motion using GNSS and IMU

○正 廣瀬 圭<sup>\*1\*3</sup>, 近藤 亜希子<sup>\*1\*3</sup>, 小野寺 恵介<sup>\*2\*3</sup>, 宮本 直人<sup>\*3</sup>

中野 紘志<sup>\*3</sup>, 宇田 峻也<sup>\*3</sup>, 梶原 和子<sup>\*3</sup>, 竹田 正樹<sup>\*3</sup>

Kiyoshi HIROSE<sup>\*1\*3</sup>, Akiko KONDO<sup>\*1\*3</sup>, Keisuke ONODERA<sup>\*2\*3</sup>, Naoto MIYAMOTO<sup>\*3</sup>

Hiroshi NAKANO<sup>\*3</sup>, Shunya UDA<sup>\*3</sup>, Wako KAJIWARA<sup>\*3</sup> and Masaki TAKEDA<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup> 久留米工業大学 Kurume Institute of Technology

<sup>\*2</sup> びわこ学院大学 Biwako - Gakuin 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

This paper proposes the estimation method of 3D position and velocity using GNSS and IMU, and the acceleration in global coordinate for foot contact detection. The acceleration in global coordinate is estimated by using inertial sensor output and the Extended Kalman filter, and the 3D position and velocity are estimated by the sensor fusion using GNSS output and the second time integration of acceleration in global coordinate. These methods were applied the 400m sprint running. The GNSS and IMU for estimation of 3D position and velocity was attached on the head of runner, and the IMUs for foot contact detection were attached on the head and foot of runner. The estimation values of the 3D position and velocity indicated the error reduction values, and the acceleration in global coordinate indicated the characteristics for foot contact detection.

**Key Words** : GNSS, IMU, 3D position, 3D velocity, Foot contact detection

## 1. 緒 言

慣性センサと GPS レシーバはスマートフォン等に搭載されていることから、専用のアプリケーションを介して日常的に利用されている。また、近年では GPS だけではなく、GLONASS 等の衛星情報を用いた位置測位が行われており、これらを総称して GNSS (Global Navigation Satellite System) と呼ばれている。GNSS を用いた位置測位では複数の衛星の時刻情報を用いる単独測位と、特定の基地局からの差分によって位置測位精度を向上させる相対測位がある。さらに、搬送波情報まで使用することによる干渉測位があり、リアルタイムに高精度な位置精度を得るための方法であることから、RTK (Real Time Kinematic) 方式と呼ばれる。RTK を用いることにより高精度な位置測位が可能となるが、スマートフォン等に搭載することは現状では難しいこと、搬送波情報を十分取得する必要がある等から、慣性センサと GPS レシーバを用いた運動解析のような利用方法はほとんど検討されていないのが現状である。

慣性センサと GPS レシーバを用いた解析として、慣性センサ・地磁気センサを用いた 3次元姿勢推定<sup>(1)</sup>と加速度積分と GPS レシーバから得られる位置情報を得るためのセンサ・フュージョン<sup>(2)</sup>を提案しており、スキーターンの運動解析における滑走速度の推定、解析<sup>(3)</sup>を行っている。本方法では、計測範囲が広大な運動に対する特徴を示すことができおり、異なるターンにおける違いを捉えることができている。しかし、GPS レシーバが示す方位と磁北が異なることや地磁気センサに外乱による誤差が生じた場合の影響については事前に行う初期値補正以外は対策を行うことができないのが現状である。そこで、GNSS の高精度位置測位と慣性センサを用いて 3次元の速度を得るための方法の構築を行い、実際の運動計測の例としてカヌーの船体に GNSS と慣性センサを取り

付けた際の速度<sup>(4)</sup><sup>(5)</sup>を推定している。本研究では、サンプリング周波数が向上した GNSS と慣性センサを用いた速度・位置推定についてランニング動作を対象として行い、GNSS の結果と比較することによって有効性を示すことを目的とする。

## 2. 計測システム

本研究では、RTK 方式の測位に対応した GNSS を用いる (図 1)。得られた計測情報は、RTKLIB を用いて位置情報に変換される。サンプリング周波数は、先行研究よりも高周波数 (100Hz) である。慣性センサシステムとして、IMS-SD (テック技販) を用いる (図 2)。本システムの計測レンジは、角速度 : 4000deg/sec, 加速度 : 30G であり、サンプリング周波数は 1000Hz である。



Fig. 1 GNSS system



Fig. 2 Inertial sensor system

## 3. 地面接地判定, 位置・速度推定のための加速度推定

地面接地判定を行うために、足部に取り付ける慣性センサシステムを用いた地面接地判定と頭部に取り付けた慣性センサシステムの姿勢を推定するために、拡張カルマンフィルタを用いる。角速度からの変換・積分について、重力加速度を用いて補正する方法を用いる。式(1), 式(2)に示す非線形状態方程式, 非線形観測方程式を構築し、拡張カルマンフィルタアルゴリズムに適用することによって推定する。しかし、運動中は動的な加速度が生じていることから、合成加速度に重力加速度を引いた情報を用いて動的加速度が大きい場合は角速度からの変換・積分の要素を使用する、動的加速度が小さい場合は重力加速度を用いて補正を行うことができるように、共分散行列の調整を行っている。

$$x_{t+1} = F(x_t) + w_t \quad (1)$$

$$y_t = H(x_t) + v_t \quad (2)$$

$$F_t = \begin{bmatrix} \theta_t + (\cos \varphi_t \cdot \omega_{y,t} - \sin \varphi_t \cdot \omega_{z,t}) \cdot Ts \\ \varphi_t + (\omega_{x,t} + \sin \varphi_t \tan \theta_t \cdot \omega_{y,t} + \cos \varphi_t \tan \theta_t \cdot \omega_{z,t}) \cdot Ts \end{bmatrix}$$

$$x_t = \begin{bmatrix} \theta_t \\ \varphi_t \end{bmatrix}, \quad y_t = \begin{bmatrix} a_{x,t} \\ a_{y,t} \\ a_{z,t} \end{bmatrix}, \quad H_t = {}^0R_t \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}$$

#### 4 3次元位置・速度推定法

慣性センサから得られる角速度・加速度と RTK 方式の GNSS によって得られる緯度、経度、高度を用いて 3次元速度の推定を行う。推定には拡張カルマンフィルタを用い、推定する状態量には、速度  ${}^0V_{(t)}$  と位置  ${}^0P_{(t)}$  に加え方位情報であるヨー角  $\psi_{(t)}$  を設定する。拡張カルマンフィルタを適用するための非線形状態方程式には、方位情報以外の変換を行った絶対座標系の加速度の方位角補正と積分計算を構成し、非線形観測方程式には、推定する位置情報を、観測値には GNSS から得られる位置情報を設定している。方位情報以外の変換を行った絶対座標系の加速度  ${}^0A_{(t)}$  については、角速度  $\omega_{(t)}$ 、加速度  $A_{(t)}$  から姿勢情報であるロール角  $\varphi_{(t)}$ ・ピッチ角  $\theta_{(t)}$  を先行研究における拡張カルマンフィルタ<sup>(4)</sup>を用いて別途推定し、構成した回転行列を用いて加速度センサ出力を変換している。非線形状態方程式を式(3)に、非線形観測方程式を式(4)に示す。ここで、Ts はサンプリング周期である。

$$x_{(t+1)} = F(x_{(t)}) + w_{(t)} \quad (3)$$

$$y_{(t)} = H(x_{(t)}) + v_{(t)} \quad (4)$$

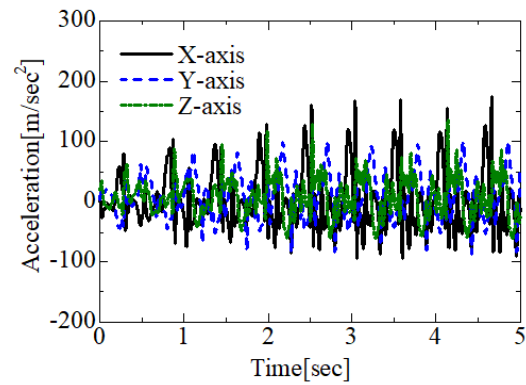
$$x_t = \begin{bmatrix} \psi_{(t)} \\ {}^0V_{X(t)} \\ {}^0P_{X(t)} \\ {}^0V_{Y(t)} \\ {}^0P_{Y(t)} \\ {}^0V_{Z(t)} \\ {}^0P_Z \end{bmatrix}, \quad y_t = \begin{bmatrix} {}^0P_{X\text{GNSS}} \\ {}^0P_{Y\text{GNSS}} \\ {}^0P_{Z\text{GNSS}} \end{bmatrix}$$

$$F(x_{(t)}) = \begin{bmatrix} \psi_{(t)} + \sin \theta_{(t)} \sec \varphi_{(t)} \cdot \omega_{Y(t)} \cdot Ts + \cos \theta_{(t)} \sec \varphi_{(t)} \cdot \omega_{Z(t)} \cdot Ts \\ {}^0V_{X(t)} + \cos \psi_{(t)} \cdot {}^0A_{X(t)} \cdot Ts - \sin \psi_{(t)} \cdot {}^0A_{Y(t)} \cdot Ts \\ {}^0P_{X(t)} + {}^0V_{X(t)} \cdot Ts \\ {}^0V_{Y(t)} + \sin \psi_{(t)} \cdot {}^0A_{X(t)} \cdot Ts + \cos \psi_{(t)} \cdot {}^0A_{Y(t)} \cdot Ts \\ {}^0P_{Y(t)} + {}^0V_{Y(t)} \cdot Ts \\ {}^0V_{Z(t)} + {}^0A_{Z(t)} \cdot Ts \\ {}^0P_{Z(t)} + {}^0V_{Z(t)} \cdot Ts \end{bmatrix}$$

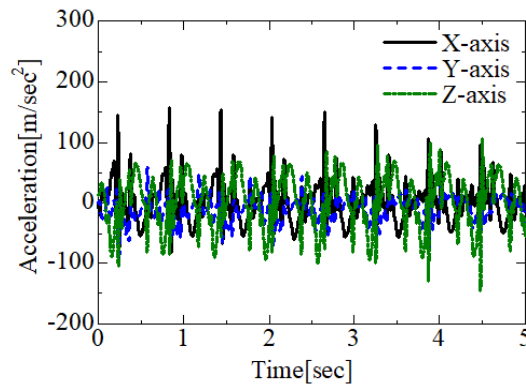
$$H(x_{(t)}) = \begin{bmatrix} {}^0P_{X(t)} \\ {}^0P_{Y(t)} \\ {}^0P_{Z(t)} \end{bmatrix}$$

## 5. 推定結果

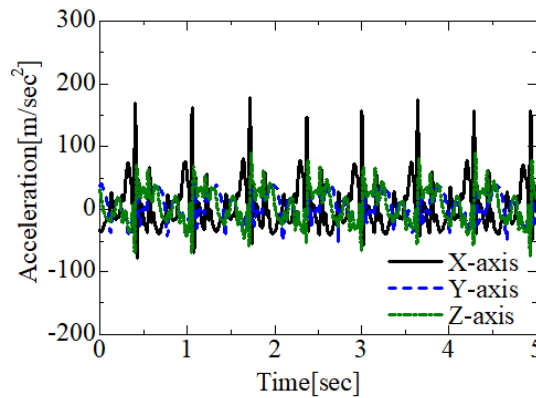
本方法を用いてランニングにおける地面接地判定に必要な要素である絶対座標系における加速度, 3次元位置・速度を得るための検証として, 400m スプリント走の計測実験を行った. 頭部に GNSS と IMU (慣性センサシステム) を, 両足部に IMU (慣性センサシステム) を取り付け, 実際に走動作を計測した. 座標系は進行方向を Y 軸, ランナー左方向を X 軸, 重力方向を Z 軸としている. X 軸右足部加速度の推定結果を図 3 に示す. 本結果は, 計測初期, 中期, 終期の 3 カ所についての絶対座標系における加速度を示しており, 座標変換を行うことによって進行方向の加速度, 左右方向の加速度, 重力方向の加速度が得られており, 姿勢推定において問題となるドリフトによる誤差の影響も受けていないことがわかる. 本結果より, それぞれの局面において波形の特徴については同様であることから, 本結果の特徴に着目することができれば, 着地および離地の判定を行うことができると考えられる. また, 波形周期に着目することにより, ペース配分についても把握することが可能である.



(a) Initial phase



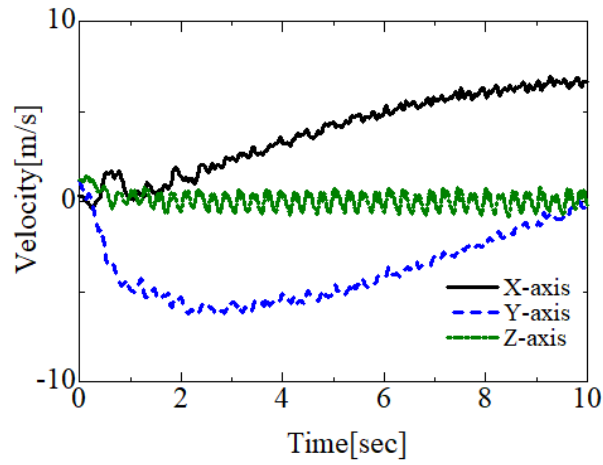
(b) Intermediate phase



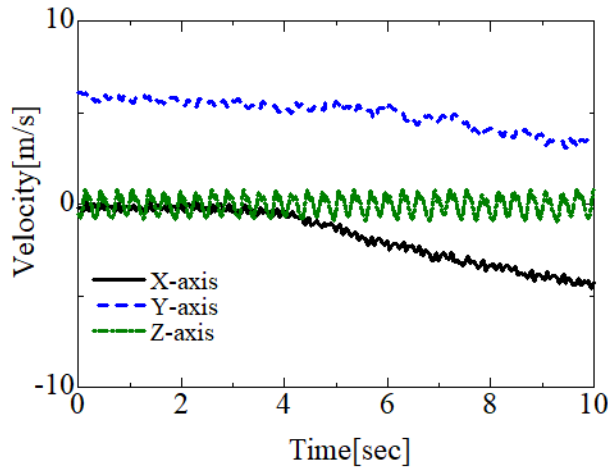
(c) Final phase

Fig.3 Results for foot acceleration in global coordinate for 400m sprint run

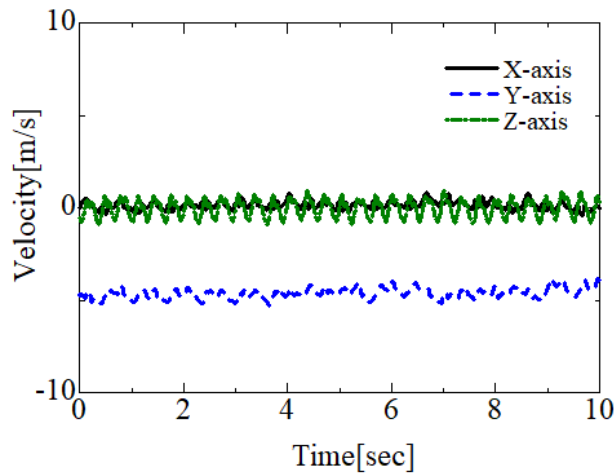
推定した3次元位置の結果および本方法を用いて推定した速度情報の結果を図4に、GNSSの微分によって得た速度情報の結果を図5に示す。なお、GNSSの微分によって得られた速度については、カットオフ10Hzのローパスフィルタを使用している。本結果においても、計測初期、中期、終期の3カ所についての結果を示している。



(a) Initial phase



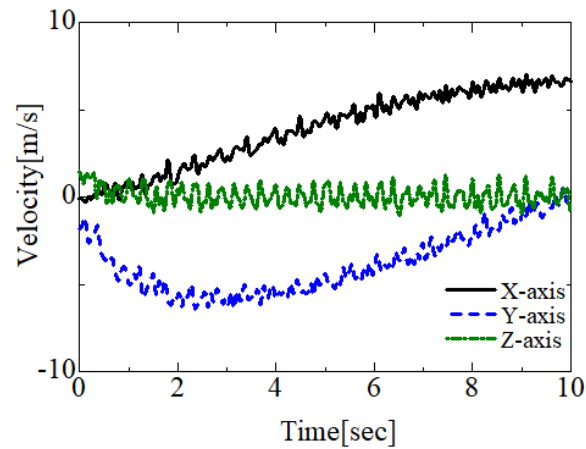
(b) Intermediate phase



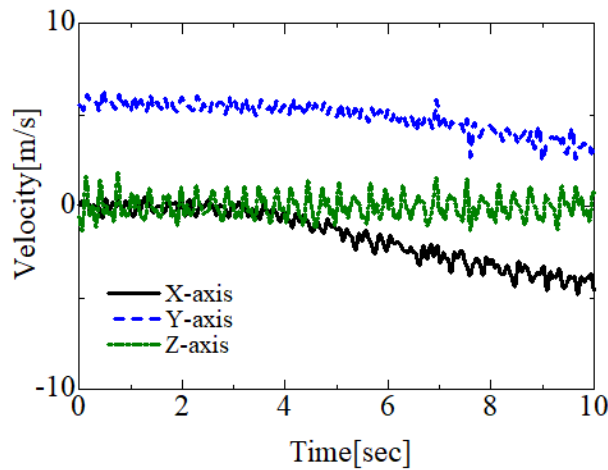
(c) Final phase

Fig.4 Results for head velocity by the sensor fusion in global coordinate for 400m sprint run

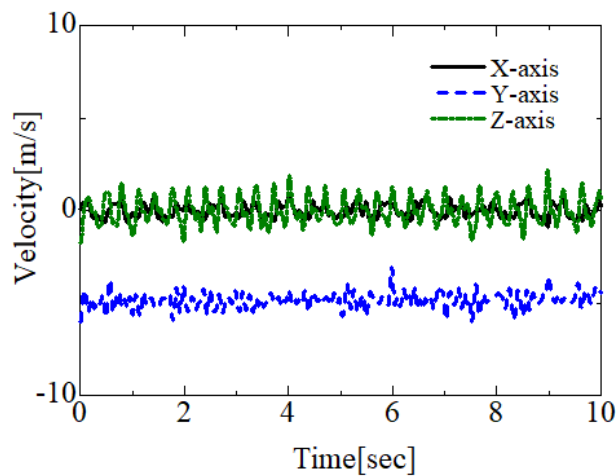
本結果より、GNSSの微分によって得られた速度と比べて、本方法を用いた結果すべてにおいてノイズ等が低減されている結果が得られており、Z軸方向の速度に着目すると、詳細な周期的変化が表れている。カットオフ周波数を低くしたローパスフィルタを用いることによって本方法の結果に近づけることはできるが、規則性のない誤差を除去することはできないため、本方法が有用であることが示されている。



(a) Initial phase



(b) Intermediate phase



(c) Final phase

Fig.5 Results for head velocity by the time differential of GNSS output in global coordinate for 400m sprint run

## 6. 結 言

本研究では、GNSS を用いた位置測位と IMU を用いた角速度、加速度計測を組み合わせることによって、地面接地判定に利用できる絶対座標系における加速度の推定法と、GNSS+IMU によるセンサ・フュージョンを行い、3次元位置・速度情報推定法の提案を行った。絶対座標系の加速度については計測時間の経過に伴う誤差が生じない周期的な波形が得られていること、GNSS+IMU によって推定された速度は GNSS の位置情報微分することによって得た速度情報よりも明確に特徴をしめすことができることを示した。

## 文 献

- (1) 廣瀬圭, 土岐仁, 近藤亜希子, “慣性センサ・地磁気センサを用いたスポーツにおける姿勢計測に関する研究”, スポーツ産業学研究, 第 22 巻 2 号(2012), pp. 255-262.
- (2) 廣瀬圭, 土岐仁, 佐藤伸幸, 村田浩. “スキヤーの姿勢・滑走軌跡計測を用いたスキー・ターンの運動解析に関する研究”. スキー研究, 第 8 巻 1 号 (2011), pp. 21-27.
- (3) 廣瀬圭, 土岐仁, 近藤亜希子, “スキヤーの関節角度・滑走速度計測によるスキー・ターンの運動解析に関する研究”, スポーツ産業学研究, 第 22 巻 1 号(2012) pp. 1-8.
- (4) 明平昂也, 近藤亜希子, 廣瀬圭, 宮本直人, 竹田正樹, ”GNSS と慣性センサを用いた 3 次元速度推定に関する研究”, 日本機械学会 2023 年度年次大会予稿集, (2023), S236p-01.
- (5) 近藤亜希子, 廣瀬圭, 宮本直人, 竹田正樹, ”慣性センサ・GNSS を用いたカヌーにおける姿勢・速度推定と解析に関する研究”, 日本機械学会 2023 年度年次大会予稿集, (2023), S236-01.