

慣性センサを利用したノルディックウォーキングの動作計測

Motion measurement of nordic walking using inertial sensor

舘山拓也*, 佐川貢一*

Takuya Tateyama*, Koichi Sagawa*

*弘前大学大学院理工学研究科

*Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University

キーワード： 慣性センサ (inertial sensor), 動作計測 (motion measurement), ノルディックウォーキング (nordic walking)

連絡先： 〒 036-8561 弘前市文京町 3 番地 弘前大学大学院 理工学研究科 知能機械工学コース 佐川研究室
舘山拓也, Tel./Fax.: (0172)39-3691, E-mail: h11gs620@stu.hirosaki-u.ac.jp

1. 緒言

日本人の健康維持のための最も手軽な運動として昔からウォーキングやランニングが行われている。そのような中、近年それらの運動に代わる手軽な運動としてノルディックウォーキング (Nordic Walking : NW) が普及し始めている。NW とは 2 本の専用ストックを持って行う歩行運動のことで、もとは 1930 年代初めにフィンランドのクロスカントリースキーツームの夏場のテクニクトレーニングとして、クロスカントリー用のストックを持ちハイキングやランニングを行ったことから生まれた。スポーツとしての歴史は 12 年ほどで、発祥の地であるフィンランドでは成人人口の 20 % にあたる 82 万人もの人が日常的に実施しており、現在では広くヨーロッパで多くの愛好者に親しまれている。日本でも徐々に愛好者が増えつつあるが、まだなじみの薄いスポーツである。NW に関する研究としては、腰部の加速度から歩行速度・歩幅を推定する方法¹⁾ や NW 初心者や高齢者を

対象とした運動効果に関する研究²⁾³⁾ などが行われている。NW には以下のような利点があると報告されている⁴⁾。

- 1) 通常の歩行に比べて心拍数が約 13 % 上昇する。
- 2) 全身運動であるので、エネルギー消費量が通常の歩行に比べて平均 20 % 上昇する。
- 3) 首、肩にかけての痛みやこりを解消する。
- 4) 4 点指示となり姿勢が安定する。
- 5) 膝などの関節にかかる負担が軽減する。

しかしながら、メリットに挙げたような高い運動効果を得るためには、正しいストックの使い方を身につけ⁵⁾、運動を習慣化しなければならない。NW を上達する方法としては日本ノルディックフィットネス協会 (Japan Nordic Fitness Association : JNFA) が全国各地で開催している体験会やイベントに参加して JNFA 公認のインストラクターの指導を受ける必要がある。そこ

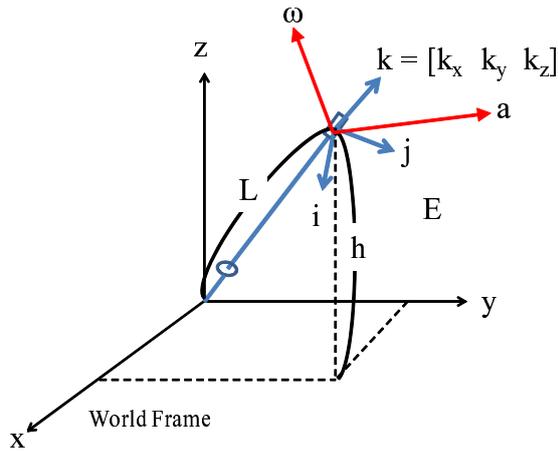


Fig. 1 Stock and stock FM on world frame.

で、慣性センサを用いて自分のNWを測定し上達具合を自宅で評価できれば、運動効率の良いNWを一人で習得でき、なおかつ運動を続けるモチベーションを維持できると考えられる。また、慣性センサを用いた人の運動動作計測は比較的安価で計測する場所を選ばないという利点があり、歩行動作や野球の投球動作など、様々な動作の計測が行えることが報告されている⁶⁾⁷⁾。

そこで本報告では、NWを評価する方法として、右手のストックと右足の爪先に加速度センサ、ジャイロセンサ及び赤外線センサ (Position Sensitive Device : PSD) で構成される計測装置を取り付けてノルディックウォーキングを行い、右手ストックと右足の動きを3次的に表示する方法を検討する。

2. 原理

2.1 センサ移動軌跡および姿勢推定法

遊脚状態の右足爪先の軌跡およびストックに取り付けた慣性センサの軌跡と姿勢は、センサから取得した加速度、角速度を固定座標に変換し、1歩毎に積分して求める⁸⁾。

2.2 スtock姿勢導出法

NW中のストックは静止する期間が無く、常に運動しているため重力加速度以外の加速度が発生し、従来では姿勢を求めることができない。そこで、測定された加速度および角速度を使用してストックの姿勢を求める⁹⁾。ストックが地面と接地しているとき、ストックに取り付けた加速度センサおよびジャイロより測定される加速度 a および角速度 ω の関係は式(1)のようになる (Fig. 1)。

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\omega}_y L \\ -\dot{\omega}_x L \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_x \omega_z L \\ \omega_y \omega_z L \\ (-\omega_x^2 - \omega_y^2) L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} i_z g \\ j_z g \\ k_z g \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし、 L はストック先端からセンサまでの距離、 i, j, k は長さが1で互いに直交している3次元ベクトルであり、センサの座標系を表すフレームマトリクス (FM) E の要素として以下のように表される。

$$E = [i \ j \ k] = \begin{bmatrix} i_x & j_x & k_x \\ i_y & j_y & k_y \\ i_z & j_z & k_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

この式よりさらに、ストックのFM E の成分 i_z, j_z, k_z を導出する。

$$\begin{pmatrix} i_z \\ j_z \\ k_z \end{pmatrix} = \frac{1}{g} \begin{pmatrix} a_x - \dot{\omega}_y L - \omega_x \omega_z L \\ a_y + \dot{\omega}_x L - \omega_y \omega_z L \\ a_z + (\omega_x^2 + \omega_y^2) L \end{pmatrix} \quad (3)$$

ただし、

$$i_z^2 + j_z^2 + k_z^2 = 1 \quad (4)$$

である。さらに、

$$\begin{pmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin^{-1} i_z \\ \sin^{-1} j_z \\ \sin^{-1} k_z \end{pmatrix} \quad (5)$$

である。この式より，ストックのFMは以下のようになる。

$$E = \begin{bmatrix} \cos \theta_x & -\tan \theta_x \sin \theta_y & -\tan \theta_x \sin \theta_z \\ 0 & \frac{\sin \theta_z}{\cos \theta_x} & -\frac{\sin \theta_y}{\cos \theta_x} \\ \sin \theta_x & \sin \theta_y & \sin \theta_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

これにより，ストックの姿勢が求められる。ただし，鉛直軸周りの回転量については不明であるため， i 軸は固定座標系の x 軸方向を向いていると仮定する。

2.3 ストックの高さおよび速度の修正

従来，慣性センサの移動した軌跡を導出する際，歩行の場合は遊脚開始前と遊脚終了後の爪先の速度と高さを0として積分誤差を除去している。しかし，ストックの動作の場合はセンサの取り付け位置が手元付近であるから必ずしも同じ高さにはならず，速度が0になる時刻も不明である。したがって，ストック接地時の高さ h はセンサをストックに取り付ける位置からストック先端までの長さを L ，その時刻のセンサのFMの k 軸の z 成分を k_z とし，センサFMの k 軸がストック長軸方向として以下のように求める (Fig. 1)。

$$h = k_z L \quad (7)$$

また，推定されたストック経路から求められるストック先端の高さが0より小さくなった場合は0に修正した。さらに，ストック接地時のセンサの速度 v は，

$$v = E \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ L \end{pmatrix} E \omega \quad (8)$$

と表されるので，解析対象時間の最終速度が上式と一致するように，積分によって求めたストックの軌跡を修正する。

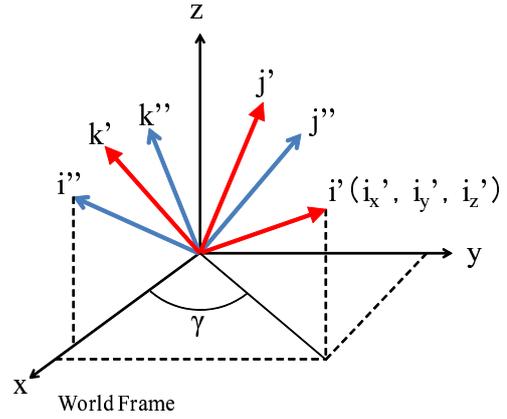


Fig. 2 Stock FM E' and E'' .

2.4 解析区間におけるストック最終姿勢の修正

2.2の方法でストックの初期姿勢を求めたら，測定された角速度の積分値でFMの更新を行い，動作中のFMを求める。しかし，この方法では積分誤差の蓄積により正確な最終姿勢とは異なったFMとなる可能性がある。そこで，Fig.2のように，角速度積分で更新して求めるFM $E' = [i' \ j' \ k']$ と，2.2の方法からFM $E'' = [i'' \ j'' \ k'']$ を求め， i' の水平方向と i'' の水平方向が一致するように E' を修正し，正確な最終姿勢 E とする。すなわち， E' と E'' の i 軸水平成分がなす角度 γ を求める。

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{i'_y}{i'_x} \quad (9)$$

次にワールド座標系の z 軸周りに E'' を γ だけ回転させ， E を求める。

$$E = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} E'' \quad (10)$$

積分処理により更新して求めたFMが，最終的に E となるよう動作中のFMを修正する。

2.5 爪先軌跡とストック軌跡の同期

NW実行中のストックの動作を正しく評価するためには，爪先軌跡とストック軌跡を同期さ

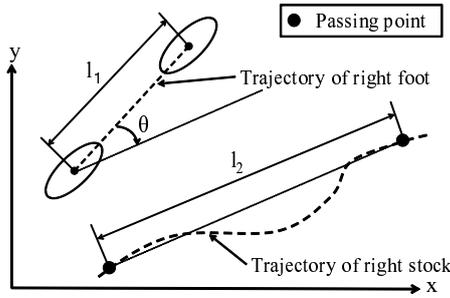


Fig. 3 Estimated trajectory of right foot and right stock.

せて表示させる必要がある。この作業には右足の1歩周期分の軌跡とその前後2動作分のストック軌跡,そしてPSDによって測定されたストックと右足との距離データを用いる。ストックが足を追い越す際,あるいは足がストックを追い越す際に,PSDは10[cm]前後の値を出力する。本報告では,右足が地面に接地し,ストックが右足を追い越す際の時刻を選択し,その時刻を t_1, t_2 とする。そして,右足,およびストックの t_1 から t_2 までの xy 平面上の移動軌跡のベクトルをそれぞれ l_1, l_2 とする(Fig.3)。次に l_1 と l_2 がなす角度 θ を次式のように求め,

$$\theta = \begin{cases} \cos^{-1} \frac{l_1 \cdot l_2}{\|l_1\| \|l_2\|} & (l_{3z} \geq 0) \\ -\cos^{-1} \frac{l_1 \cdot l_2}{\|l_1\| \|l_2\|} & (l_{3z} < 0) \end{cases} \quad (11)$$

$$[l_{3x} \ l_{3y} \ l_{3z}] = l_1 \times l_2 \quad (12)$$

ストックの軌跡 θ だけ回転させて, l_1 と l_2 が平行になるようにする。この際,各時刻のストックのFMも同様にワールド座標系の z 軸周りに θ だけ回転させる。また,一般に $\|l_1\|$ と $\|l_2\|$ は積分誤差の影響により長さが異なる。そこで,すれ違った時刻で右足の位置とストックの位置が一致するように回転後のストック軌跡に $\|l_1\|/\|l_2\|$ をかける。最後に, t_1 の時刻にPSDで測定された距離の分だけストック軌跡を右足から離し,両者の位置関係を決定する。

3. 実験装置

実験では,入力範囲0[V]~3.3[V],16[ch]の12[bit]アナログ入力および,UARTとSPIのデジタル通信機能を持つPICマイコン(Microchip,dsPIC30F6012A)と慣性センサ,XBeeモジュール,マイクロSDカードによって構成される無線計測装置(Fig.4)を右足爪先とストックに取り付ける(Fig.5, Fig.6)。また,PICマイコン(Microchip,dsPIC30F3012)と3つの押しボタンスイッチ,XBeeモジュールによって構成されるホストコントローラ(Fig.7)を使用した。ホストコントローラは,無線計測装置へ周期的なサンプリング信号を送信する。無線計測装置は受信したサンプリング信号に同期してデータ計測を行う。これにより,複数の無線計測装置の同期が確保される。また,ストック用の計測装置にはさらに赤外線センサ(Position Sensitive Device:PSD,SHARP,GP2D120XJ00F)を追加し,右足と右手ストックがすれ違うタイミングを記録する(Fig.8)。計測装置のサンプリング周波数は100[Hz]である。慣性センサは,3軸加速度センサ(Freescale Semiconductor,MMA-7260Q, ± 6 [G]),2軸ジャイロセンサ(InvenSense,IDG-300, ± 500 [deg/s]),1軸ジャイロセンサ(ANALOG DEVICES,ADXRS-610, ± 300 [deg/s])で構成され,3つのセンサ基盤を3層構造に重ねて作成した。XBeeモジュールは各PICマイコンのUARTに接続してあり,ホストコントローラをコーディネータ,各センサシステムをエンドデバイスとして,ポイントツーマルチポイントのブロードキャスト通信を行う。通信速度は115200[bps]とした。ホストコントローラからは,計測準備信号,計測開始信号,サンプリング信号,計測終了信号が送信され,受信した各信号に応じて計測装置が動作する¹⁰⁾。

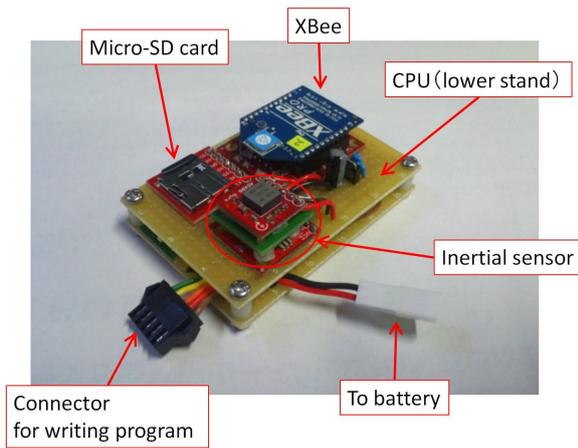


Fig. 4 Wireless sensor system

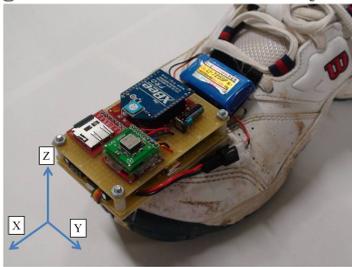


Fig. 5 Inertial sensor mounted on foot.

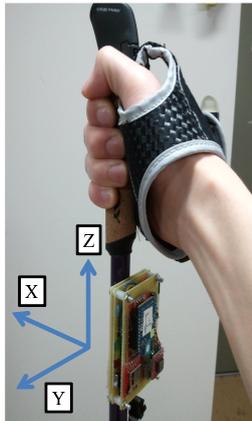


Fig. 6 Inertial sensor mounted on pole.

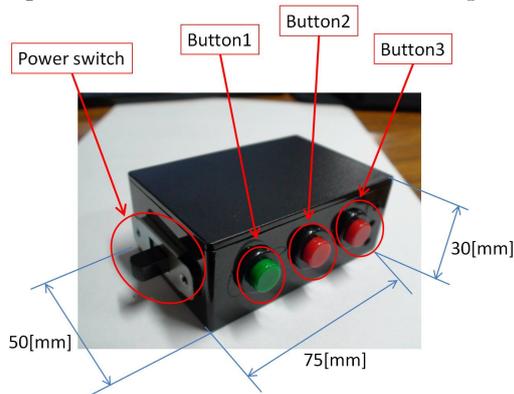


Fig. 7 Host controller.

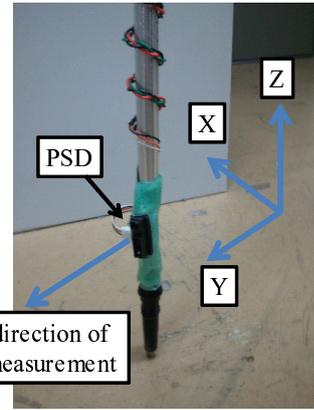


Fig. 8 PSD mounted on pole.



Fig. 9 Nordic walking.

4. 実験方法

本報告では、NW 初心者である健常な成人男性 1 名の右足爪先に Fig. 5 のように計測装置を取り付け、Fig. 6、Fig. 8 のように計測装置とセンサ座標系 Y 軸方向を向けて PSD を取り付けた NW 用ストックを右手に持ち、被験者の好きな歩行速度で NW を行ってもらった (Fig. 9)。この際、計測前に NW に慣れるまで練習をしてもらった。

5. 結果と考察

Fig. 10 および Fig. 11 に無線計測装置によって測定された右手および右ストックの加速度、角速度データを示した。このグラフより各部位が地面に着いたタイミングや空中にいる区間などが推測できる。さらに、Fig. 12 に本報告の方法で推定した右足と右ストックの移動経路を図示した。図中では右足、右ストックの移動経路に加え、3 サンプルごとのストックの状態を図示

し、地面に着いたと思われる時刻のストックの色を変えて表示した。さらにストックと右足がすれ違った時刻には PSD で計測した距離と方向も図示した。このことにより右足とストックの双方の位置関係や動作中のストックの角度が分かりやすくなり、今後、熟練者と初心者との比較を行う上で役に立つと考えられる。しかし、今回表示した図では歩幅が約 2[m] と推定されており、実際の歩幅より長く推定されてしまった。この原因として、推定に使用している歩行時のデータをすれ違った時刻を基準に取りだしているため、遊脚期だけでなく、立脚期のデータが解析に使用されている。その結果、積分誤差の影響が大きくなり、実際の歩幅より広く推定されているのではないかと考えられる。また、ストックの移動軌跡も歩行軌跡に合わせ込んでいるために実際の移動距離よりも長く推定された。これらの問題の解決策としては、歩行データを取り出した後に、遊脚期のデータのみを使用して経路推定を行うことで精度が向上すると考えられる。また、ストックが地面に接地した状態であると考えられる時刻でもストック先端が移動しているように推定されているので、ストックの接地の状態を判別する方法について検討を行う必要がある。

6. 結言

本報告では、慣性センサを利用した NW 時の右足と右ストックの動作計測について調査した。右足と右ストックに取り付けた慣性センサの計測データにより、各部位の移動経路や位置関係、ストックの時刻ごとの角度の図示を行うプログラムを作成し、実際の NW 運動時のデータを用いて検証を行った。その結果、各部位の NW 時の状態を推定することが可能であることを確認した。しかし、推定値と実際の値との誤差が大きかったことや、接地時のストック先端のずれがあるのでさらなる改良が必要である。また、現

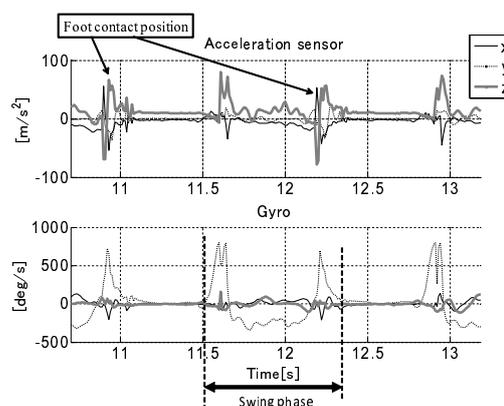


Fig. 10 Acceleration and angular velocity of right foot.

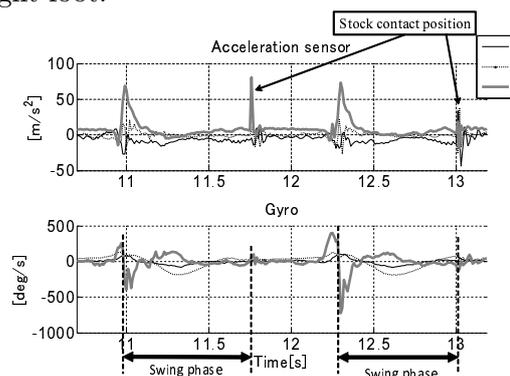


Fig. 11 Acceleration and angular velocity of right stock.

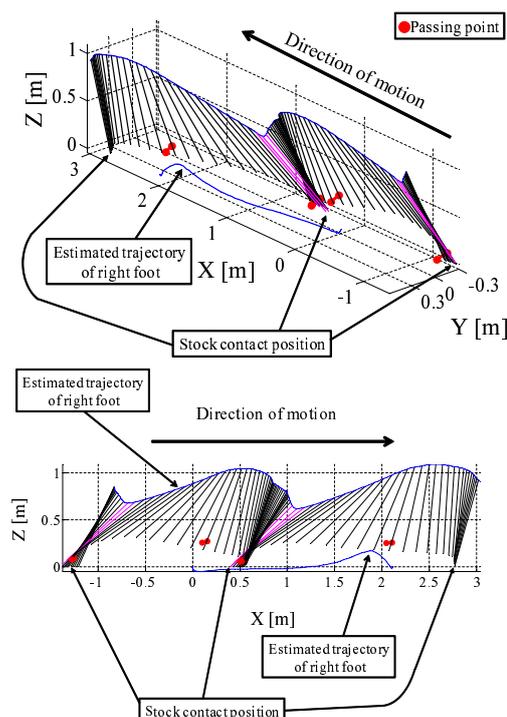


Fig. 12 Estimated trajectory of right foot and right stock.

在のプログラムでは手動でストックの推定区間を選択しているので，一度の解析で歩行動作一歩分とその前後一動作分のストック動作しか扱えない。今後は自動でストック動作の推定を行う区間を判別し，計測データ全体の解析を行えるようなアルゴリズムの開発が必要である。

参考文献

- 1) 鈴木 明宏, 石井 賢治, 永富 良一: 腰部身体加速度を用いた歩行速度・歩幅推定法 ウォーキングおよびノルディックウォーキング, 生体医工学, 49-6, 957/961 (2011)
- 2) 佐藤 久, 竹村 英和, 山野 英伯: ノルディックウォーキング初心者における運動中の心拍数と主観的運動強度, 仙台大学紀要, 38-1, 40/46 (2006)
- 3) 三浦 望慶, 尹 鶴峰, 竹村 英和, 関矢 貴秋, 佐藤 佑: ノルディックウォーキングにおける有酸素運動強度に関する研究 高齢者男性を対象として, 仙台大学紀要, 40-2, 175/183 (2009)
- 4) 日本ノルディックフィットネス協会ホームページ. <<http://jnfa.jp>>
- 5) 山本 敬三: 初心者を対象としたノルディック・ウォーキングの運動効果の分析, 浅井学園大学生涯学習 システム学部研究紀要, 7 (2007)
- 6) Keita Mishima, Koichi Sagawa: Estimation of walking trajectory using ankle-mounted sensor, The International Conference on Mechatronics and Information Technology, 2P2-E2 (2007)
- 7) Koichi Sagawa, Syuko Abo, Toshiaki Tsukamoto, Izumi Kondo: Forearm Trajectory Measurement during Pitching Motion using an Elbow-mounted Sensor, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.3, No.4, 299-311 (2009)
- 8) 佐川 貢一, 煤孫 光俊, 大滝 保明, 猪岡 光: 足爪先加速度積分による歩行経路の3次元無拘束計測, 計測自動制御学会論文集, 40-6, 635/641 (2004)
- 9) 日本機械学会 (編): コンピュータダイナミクスシリーズ3, マルチボディダイナミクス (1) - 基礎理論 -, 74, コロナ社 (2006)
- 10) 松浦 裕樹, 佐川 貢一: 身体動作計測のためのサンプリング同期式無線慣性センサ, 日本機械学会東北支部第47期総会・講演会講演論文集, 47-210, 226/227 (2012)