

ノルディックウォーキングでの上下肢に対するポールの位置計測 Position measurment of pole for upper and lower limbs in Nordic walking

○小笠原 直樹*¹, 川口 峻*², 本井 幸介*¹, 戸塚 学*³, 佐川 貢一*¹

○Naoki Ogasawara, Shun Kawaguchi, Kousuke Motoi, Manabu Totsuka, Koichi Sagawa

*¹ 弘前大学大学院理工学研究科

*¹ Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University

*² 弘前大学理工学部

*² Faculty of Science and Technology, Hirosaki University

*³ 弘前大学教育学部

*³ Graduate School of Faculty of Education, Hirosaki University

キーワード：ノルディックウォーキング(Nordic walking), 慣性センサ(Inertial sensor)
動作解析(Motion analysis)

連絡先：〒036-8561 青森県弘前市文京町 3 番地

弘前大学 大学院 理工学研究科 知能機械工学専攻 佐川研究室

小笠原直樹, Tel: (080)5562-4750, E-mail: h13ms611@stu.hirosaki-u.ac.jp

1. 緒言

近年、手軽で運動効果の高い運動としてヨーロッパを中心に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 は 2 本の専用ポールを持って行う歩行運動のことであり、日本でも徐々に愛好者が増えつつあり、NW 初心者や高齢者を対象とした運動効果に関する研究¹⁾などが行われているが、まだなじみの薄いスポーツである。NW には様々な運動効果があり、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 % 上昇することや、4 点支持となり姿勢が安定するなど、様々な利点があることが報告されている²⁾。

上記に挙げたような高い運動効果を得るためには、正しいポールの使い方を身につけ、正しいフォームで NW を行う必要がある³⁾、運動を習慣化しなければならない。しかし、NW 中の動作やその上達度を定量的に評価する方法は確立されておらず、特に初心者にとって自身の動作を確認し、問題点を改善して正しい NW を行うことは困難である。

従来、比較的安価で計測場所を選ばない利点がある慣性センサを用いて、人の歩幅や歩行速度の測定などの運動動作計測が行われている⁴⁾⁵⁾。舘山はそれらの研究を応用し、慣性センサなどを利用して、NW 中の腕やポール、爪先の動きの測定解析方法を提案した⁶⁾。しかし、ポールと爪先の動作軌跡の同期時

刻の推定精度や、ポールの角度やポールの接地位置の推定精度に問題があった。

そこで本報告では、NW 中の動作を計測および評価する方法として、右手のポール手元、前腕及び上腕と右足の爪先に加速度センサ、ジャイロセンサ、圧力センサ及び赤外線センサ (Distance Measuring Sensor: DMS) で構成される計測装置を取り付けて NW を行い、右手のポール、前腕及び上腕と右足爪先の動作計測精度向上のため、センサ装着法と DMS のデータの処理方法の改善を行った。そして、従来法と提案法で精度比較を行い、提案法の有効性を確認する。

2. ノルディックウォーキング

2.1 ノルディックウォーキングの効果

NW ではポールを用いた上半身の運動も同時に行うことになるので、全身運動に近いウォーキングをすることができる。その結果、様々な効果が期待できると報告されている。例えば、NW 中は腕の筋肉を使うことから、通常のウォーキングに比べ、心拍数や酸素摂取量が約 10-20[%] 高くなる。つまり NW はウォーキングに比べ消費カロリーが多くなる。このことより、NW は呼吸循環系機能を高め、体脂肪や血中脂質を減らすのに有効である。また、進行方向への推進力が加わるためストライドは増え、ピッチが減る。この結果、重心の上下動は大きくなると考えられるが、これは足腰に適度な負荷が掛かり、筋肉や骨を安全に鍛えることができる。この他にも、肩こりの改善やひざへの負担も少ないという利点もある。このように、NW は通常のウォーキングに比べ、運動効果が高く安定感が増すので、高齢者の運動や衰えた筋力を向上させる為のリハビリでの活用、病床から離床される際の安全確保や転倒予防などあらゆる場面での活用が期待される。



Fig. 1 Left figure is aggressive type of NW. Right figure is defensive type of NW.

2.2 歩行スタイルの種類

NW の歩き方は、アグレッシブタイプとディフェンシブタイプの二種類に分けられている (Fig. 1)。アグレッシブタイプは運動強度が強いアスリート向けのウォークであり、NW を行う際にはポールはストライドの中央から前方の足付近の間で突くようにする。また、全体的にストライドが大きく体を前方に押し出すイメージを持って行う。一方、ディフェンシブタイプはアグレッシブタイプに比べると運動強度が弱く、生活習慣病対策や高齢者、関節障害を持つ方、さらにスポーツ障害のリハビリなど活用範囲が広い NW の種類である。ディフェンシブタイプは、足元近くにポールを着くため、アグレッシブタイプに比べてストライドは小さい。本報告では、ディフェンシブタイプに注目して動作計測を行った。

3. 原理

3.1 ポールの動作計測法

始めに、ポール接地時の動作計測について説明する。NW 中のポールは常に運動しているため静止する期間が存在せず、重力加速度以外の加速度も計測されることから、従来のように重力加速度を利用してポールの姿勢を求めることができない。そこで、ポールの

接地時の姿勢は測定された加速度および角速度を使用してを求める (Fig. 2). ポールの先端が接地している時, ポール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 , 角速度 ω の関係を以下の式に示す. L はポール先端からセンサ取り付け位置までの長さ, g は重力加速度である.

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

(1)式より, ポールの姿勢を表す 3 行 3 列の行列 E を求めることが可能となる.

次にポールが地面から離れている時の動作計測法について説明する. このとき, ポールの動作は加速度の 2 回積分から求めるが, ポールの初速度 v と初期位置 0p は(2)式と(3)式より求める. ただし, 接地時のポール先端の初期座標を $(0, 0, 0)^T$ とし, 慣性センサの位置 0p を次式から求める.

$${}^0p = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ L \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$v = E \left\{ \omega \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ L \end{pmatrix} \right\} \quad (3)$$

3.2 つま先の動作計測法⁷⁾

つま先部の加速度を積分して速度を求め, これをさらに積分することで爪先の移動経路を算出する. 立脚相時は, 重力加速度を利用することによって, ほぼ正確な FM を推定することができる. 一方, 遊脚相時での FM の更新は, 角速度の積分値を使用する. そのため, 角度に誤差が蓄積して姿勢が正確に算出されず, 固定座標系から見た加速度推定に悪影響をもたらす. そこで, 遊脚相終了

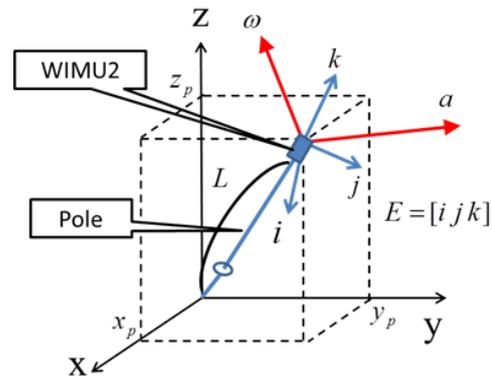


Fig.2 Stock and stock FM on world frame

時の FM を重力加速度から求め, 遊脚相時の FM を修正する.

移動距離推定のためには, 加速度を積分することによって発生する速度の誤差も除去する必要がある. そこで, 立脚相での足の速度がゼロになると仮定し, 加速度積分による速度誤差を除去する.

3.3 腕の動作計測法

腕に取り付けたセンサでは, 上腕と前腕の姿勢推定のみを行う. 腕の姿勢は, 角速度の積分によって求め, 腕の軌跡は先に導出したポールの FM に合わせるようにし, 腕とポールが一体になるように修正している.

4. 実験

4.1 計測装置

本報告では, NW の動作計測装置として, 無線慣性計測装置 (Wireless Inertial Measurement Unit version 2: WIMU2) を使用する (Fig. 3). WIMU2 は, マイコン (dsPIC33FJ128GP802, Technology, Microchip) と, 加速度と角速度を測定する 6 軸センサ (MPU-6050, InvenSense, 計測範囲 16 [g], 2000 [deg/s]), 無線モジュール, マイクロ SD カードソケットによって構成される. サンプル周期は 100 [Hz] であり, 測定データは microSD カードに記録する.

WIMU2 と PC との通信速度は 115200 [bps] である. 測定開始および終了の信号は RF モジュール(XBee, MaxStream 社) を使用して PC から送信する.

ポール用の動作計測装置には, WIMU2 の他に DMS (GP2Y0A41SK0F, SHARP, 測定可能範囲 4~30 [cm]) および圧力センサ (FSR400SHORT, INTERLINK ELECTRONICS, 計測可能最小圧力 0.2 [N]) を追加し, 右足と右ポールがすれ違うタイミングとポールが接地しているタイミングを記録する(Fig. 4, Fig. 5). そして, ポールと右足との位置関係を決定する(Fig. 6). 圧力センサと DMS の出力電圧は, マイコンの 12 [bit] AD 入力チャンネルで取得する. また, 専用のマウンタを作成し, WIMU2 のポールへの装着を強化した. 圧力センサが直に接地にしないことや, ポール接地時でのポールが滑り防止のため, ポールの先端にはゴムシートを取り付けた.

DMS を用いるに際, 出力電圧 V を距離 D に換算する必要がある. 本報告では, データシートを参考にセンサ出力の校正を行い, その出力距離換算は式(3)のようになった.

$$D = 3.803V^6 - 42.706V^5 + 192.988V^4 - 450.027V^3 + 576.872V^2 - 398.693V + 130.907 \quad (3)$$

また, DMS の出力には時間遅れと, ノイズが含まれている. 先行研究では, その解決策として, ノイズ除去のためフィルタを適応し, DMS 出力を加速度や角速度, 圧力センサの出力よりも一定のサンプル数だけ時間的に早めていた. しかし, フィルタによる位相遅れにより, 正確に DMS 出力の遅れを修正することはできず, 結果として右ポールと右つま先のすれ違い時刻の検出に誤差が生じていた. そこで本報告では, DMS 出力の位相遅れとノイズの解消法として, DMS 出力に

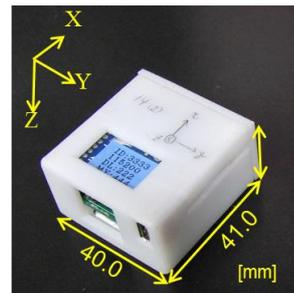


Fig. 3 WIMU2

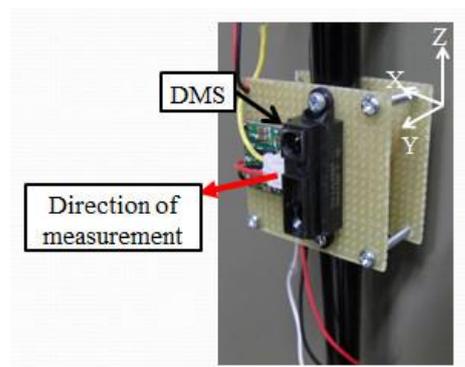


Fig.4 DMS attached to the pole



Fig. 5 Pressure sensor attached

IIR フィルタを適用し, さらに時間的に遡って再度 IIR フィルタを適応するゼロ位相フィルタ処理を行う. IIR フィルタは周期 $T = 0.01$, カットオフ周波数 10[Hz], $\omega_n = 20\pi$ [rad/s], 減衰率 $\zeta = 1$ とする. (4)式は使用した IIR フィルタである⁸⁾.

$$y(k) = a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2). \quad (4)$$

ただし,

$$\begin{aligned} a_1 &= 2e^{-\omega_n T}, & a_2 &= -e^{-2\omega_n T} \\ b_1 &= 1 - e^{-\omega_n T} (1 + \omega_n T) \\ b_2 &= e^{-\omega_n T} (e^{-\omega_n T} + \omega_n T - 1) \end{aligned}$$

である。

従来法では、接地しているポールと脚がすれ違う時刻は、DMS から求めたポールと脚との距離が最小となる時刻としていた。しかしこの方法では、左脚のすれ違い時刻を検出してしまうという問題があった。そこで本報告では、ポール接地時刻から次のポール接地時刻までの間で、右脚とポールの距離が極小値となる時刻を求め、その中からポールの離陸時刻にもっとも近い時刻をすれ違い時刻としている。これによって、従来法では左脚のすれ違い時刻を検出してしまう問題を改善することが可能になる。

4.2 計測方法

本報告では、考案したNW動作の新解析法の精度を検証するために光学式モーションキャプチャシステム (Motion Capture System: MCS) との比較実験を行った。比較内容は、ポールの地面に対する角度 θ と、右足接地位置から右ポール接地位置までの距離 L である (Fig. 7)。この実験では、被験者の右上腕、右前腕、右爪先および右ポールに計測装置を取り付け、計測装置、感圧センサおよび DMS を右足側に向けて取り付けた NW 用ポールを右手に持ち、モーションキャプチャシステム用反射マーカを肩、肘、手首、爪先、ポール上部、ポール下部に取り付け、約 5[m] の直線経路でディフェンシブタイプの NW を行ってもらった (Fig. 8)。被験者は NW 初心者である健常成人男性 1 名 (被験者 A) である。そして、 θ と L について、MCS による測定結果と WIMU2 による推定結果とを比較する。また、従来法で解析した場合と比較し、提案法と従来法での誤差の比較を行って精度の向上を確認する。

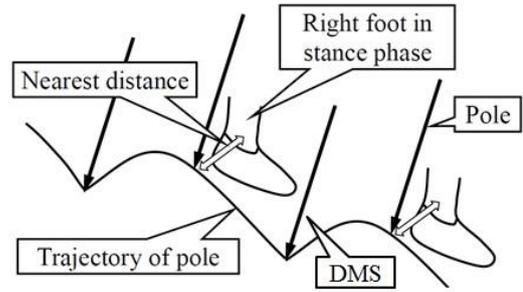


Fig. 6 Relation between DMS and the right leg

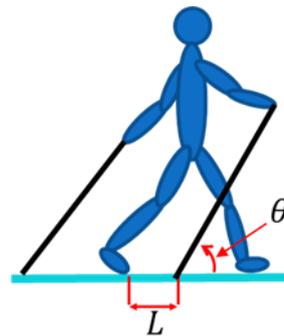


Fig. 7 Angle θ between the pole and ground and distance L between the pole and right tiptoe.



Fig. 8 Installation of 4 WIMU2 and the optical markers.

5. 結果

Fig.9 は、ポールに設置した WIMU2 で計測した加速度、角速度、圧力、DMS の出力波形である。圧力センサは、ポール接地時は 3.3V、ポール離陸時は 0V の電圧が出力される。DMS はゼロ位相フィルタ処理を行った出力波形である。これによって、波形が滑らかになり、位相遅れもないことからより正確に右脚のすれ違い時刻を検出することができることを確認した。

Fig. 10, Fig. 11 は、WIMU2 および MCS から得た 2 歩分の NW の動作軌跡である。これらを比較すると、WIMU2 は MCS と同等の軌跡が得られていることがわかる。

次に、取得データを用いて、ポールの地面に対する角度 θ と、右足接地位置と右ポール接地位置の距離 L を求めた。Fig. 12 は、慣性センサから求めた角度 θ_{WIMU} と、MCS から求めたポールの地面に対する角度 θ_{MCS} の関係である。提案法の近似直線は、相関係数が 0.9975、従来法の近似直線は、相関係数 0.9916 であった。どちらも十分高い値である。一方、両者の傾きおよび切片を比較すると、提案法がより理想に近いことがわかる。このことから、提案法のポールに対する角度精度が向上していることがわかる。これは従来に比べ WIMU のポールへの装着を強化したことや、温度差によるドリフトが大きかった従来のジャイロセンサを変更し、新たな WIMU2 の導入による効果であると考えられる。

また、Fig. 13 は MCS の動作軌跡から得た 1 歩行毎の右足接地位置とポール接地位置の距離 L_{MCS} に対し、WIMU2 から同様に求めた 1 歩行ごとの右足接地位置とポール接地位置の距離 L_{WIMU} の誤差を提案法と従来法と比較した結果である。従来法は誤差 $53.02 \pm 13.46\%$ であったが、提案法は誤差 14.00

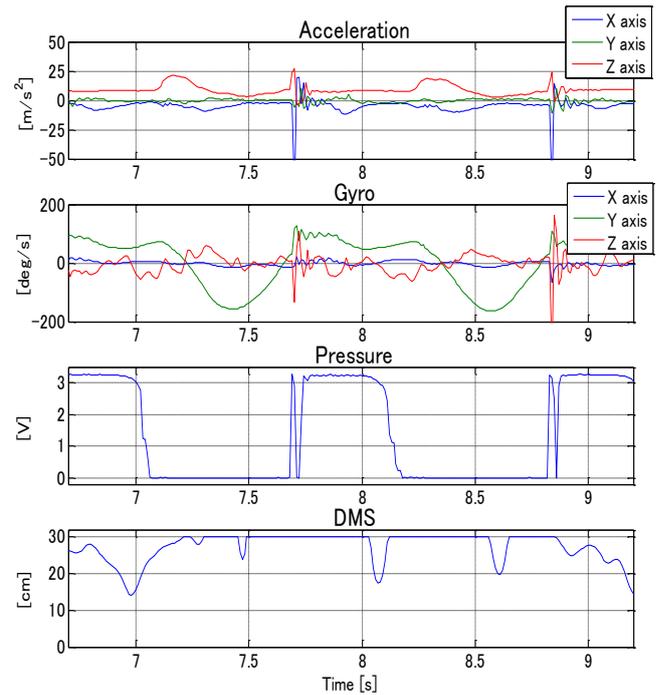


Fig. 9 Output voltage of acceleration, gyro, pressure sensor and DMS.

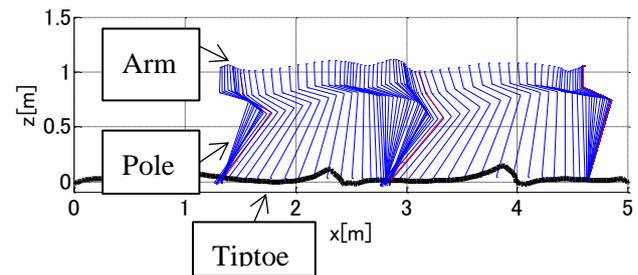


Fig. 10 NW movement estimated by WIMU2

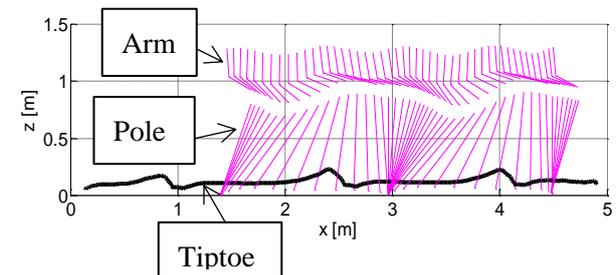


Fig. 11 NW movement estimated by WIMU2 MCS.

$\pm 6.87\%$ に向上している。これは DMS にゼロ位相 IIR フィルタを適応したことと、右足と右ポールのすれ違い時刻の検出方法の改善を行ったことにより、より正確な右足

と右ポールとの位置合わせができた効果であると考えられる。以上の結果より、NWの動作計測に際し、従来法に比べ提案法の解析精度が向上したことが確認された。

6. 結言

本報告では、NW動作推定方法の精度向上を目的として、慣性センサを用いたNWの3次元動作計測・解析システムと赤外線距離センサを用いた爪先軌跡とポール軌跡の位置合わせ法の改善を行った。その結果、ポールの地面に対する角度 θ と、右足接地位置と右ポール接地位置の距離 L の比較において、従来法に比べ提案法のNW動作推定法の精度が向上していることが確認された。今後は、圧力センサを使用しない接地判定や、左右のNW動作計測を行っていく。

参考文献

- 1) 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)
- 2) 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>>
- 3) 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)
- 4) 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)
- 5) K. Tong, M. H. Granat: A Practical Gait Analysis System Using Gyroscopes, Med. Eng. Phys., 21 (1999) p. 87-94.
- 6) 館山拓也, 佐川貢一: 慣性センサを利用

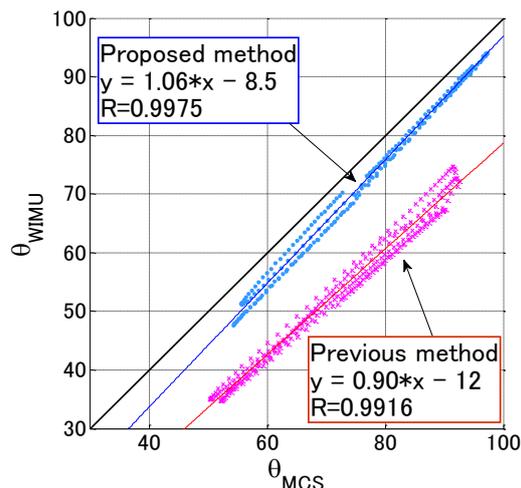


Fig. 11 The relation between θ_{WIMU} and θ_{MCS} .

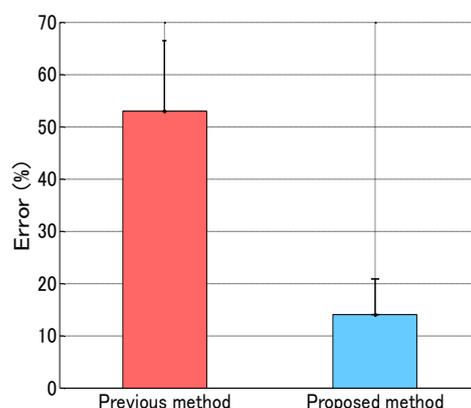


Fig. 12 Error of L_{WIMU} .

したノルディックウォーキングの動作計測, 計測自動制御学会東北支部第273回研究集会, 273-5 (2012)

- 7) 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, 406, 635/641 (2004)
- 8) C. P. NEUMAN, C. S. BARADELLO: Digital Transfer Functions for Microcomputer Control, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-9, No. 12, pp. 856-860, 1979.