

歩行動作時の身体挙動推定技術の開発

生活科学課 佐々木克浩、浦上 晃、塚本吉俊 生活工学研究所 溝口正人
ものづくり研究開発センター 上野 実 機械電子研究所 金森直希

1. 緒言

超高齢社会における健康維持のために、身体機能の衰えの予測・予防が重要となっている。身体的な衰えの判定として、日本版 CHS 基準の一項目に歩行速度がある。また、高齢女性の転倒等の徴候に対する歩容(歩行速度、歩幅、ストライド等)の関連可能性が研究されている¹⁾。これらの歩行動作を計測する装置例としてはカメラがあるが、試験室等の固定場所での計測であり、緩やかな身体機能の衰えや要介護の必要性を早期に発見するためには、常時計測が望ましい。常時計測の一手段として、慣性センサの利用が研究されている^{2,3)}。本研究では、歩行動作の常時計測の第一歩として、足部に装着した慣性センサを用いて歩行速度等を推定するシステムを構築するとともに、トレッドミルを用いた評価を行った。

2. 推定方法

2.1 基本方法と速度補正

足に装着した慣性センサ(加速度・角速度)を用いて、移動距離を求めるためには、センサ座標系から重力を基準とした絶対座標系への変換が必要である。絶対座標系の XYZ 各軸回りの回転角度をそれぞれロール角 ϕ 、ピッチ角 θ 、ヨー角 ψ とし、これらは次式により求められる。

$$\begin{bmatrix} \psi \\ \theta \\ \phi \end{bmatrix} = \int \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \psi_0 \\ \theta_0 \\ \phi_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$\dot{\phi}$ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\dot{\psi}$ は、センサ座標系における X 軸角速度 ω_x 、Y 軸角速度 ω_y 、Z 軸角速度 ω_z と ϕ 、 θ から計算される。また、 ϕ_0 と θ_0 はそれぞれロール角とピッチ角の初期値であり、動的加速度が小さい場合、重力加速度から求められ、ヨー角の初期値 ψ_0 は相対変化を扱う場合は 0° とすればよい。 ϕ 、 θ 、 ψ を関数とする回転行列と 3 軸加速度との行列の積から、絶対座標系における 3 軸加速度が得られる^{4,5)}。この加速度を積分することで速度が求まる。しかし、積分処理の際に誤差が蓄積していくため、誤差補正を行う必要がある。対策として文献 2) に基づいた以下の方法をとる。図 1 の立脚相において慣性センサの出力が所定の範囲内となった場合を静止と仮定し、図 2 に示すように速度をゼロにする。静止検知の時刻から次の静止検知の直前 T_s まで絶対座標系の加速度 $a(\tau)$ の積分を行う際に、 T_s における速度 V_e を線形誤差と仮定して補正する。補正後の次式⁶⁾の速度 $v_c(t)$ を積分することで移動距離が求まる(図 2)。

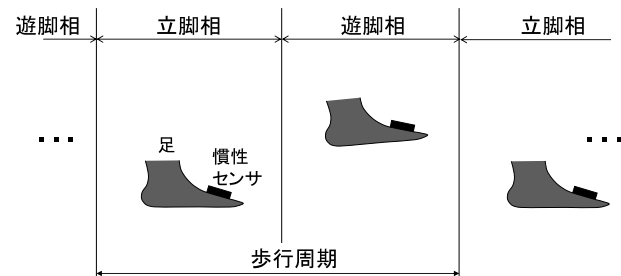


図 1 歩行における各相と歩行周期

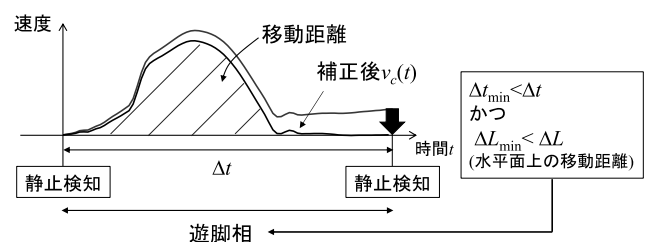


図 2 速度補正と遊脚相の判定の説明図

$$v_c(t) = \int_0^{T_s} a(\tau) d\tau - \frac{V_e}{T_s} t \quad (2)$$

2.2 歩行速度およびストライド長の算出

本研究では図 2 に示す静止検知間の時間 Δt と Δt における水平面上の移動距離 ΔL が、それぞれ閾値 Δt_{\min} と ΔL_{\min} より大きい場合は遊脚相と定義した。また、遊脚相における ΔL をストライド長 L_i とし、遊脚相の終了から次の遊脚相の終了までの時間を歩行周期 T_i と定義した(図 1)。歩行速度 S_i は、 L_i を T_i で除して求めた。なお、(1)式の積分による誤差蓄積も軽減する狙いで、静止検知時に ϕ と θ を再設定し、 ψ_0 は 0° とした。以上のデータ処理を Python により実装し、処理システムを構築した。

3. 歩行実験

2 の処理システムを検証するため、フォースプレート内蔵型のトレッドミル(テック技販社製、FTMH-1244WA)を用いた歩行実験を行った。設定速度 V_s は 2km/h、3.5km/h および 5km/h の 3 条件とした。また、ストライド長の基準値を得るため、動作解析装置(ライブラリー社製、Carrot)のマーカを左足の靴に装着して計測した。各装置を図 3(a)に、装着したマーカ等を図 3(b)に示す。マーカ①に着目し、歩行における進行方向の軸の計測値について、トレッド

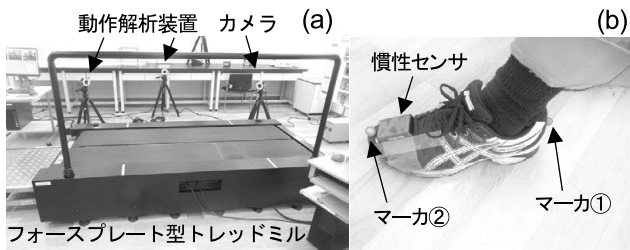


図3 実験の概要 (a) 環境、(b) 慣性センサとマーカ

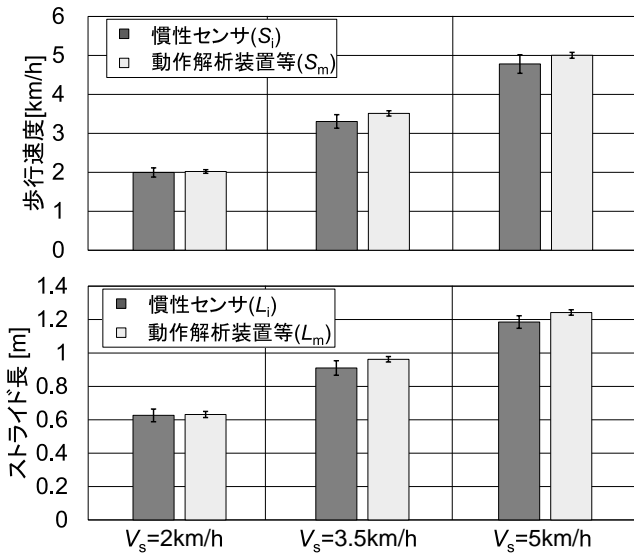


図4 歩行速度とストライド長の算出結果例

ミルの速度を基に平地歩行の距離に置き換えた。フォースプレートの鉛直方向成分の立ち上がり時刻から左足の初期接地時刻を定め、その時刻間から歩行周期 T_m を求めた。 T_m における距離の変化量からストライド長 L_m を算出し、 L_m を T_m で除して歩行速度 S_m を求めた。慣性センサは、スポーツセンシング社製の DSP ワイヤレス 9 軸モーションセンサ SS-MS-HMA16G15 を用い、図 3(b) に示す位置に装着した。サンプリング周波数 100Hz として計測し、保存したデータを解析した。測定加速度の大きさが重力加速度の 0.92~1.08 倍以内でかつ ω_x の大きさが 1.2rad/s

以内の状態が 6 サンプル以上継続した場合²⁾、静止と判定した。遊脚相の判定に関しては、 $\Delta t_{\min}=0.1s$ 、 $\Delta d_{\min}=0.01m$ とした。慣性センサ、動作解析装置とトレッドミルは同期して計測を開始して 15 秒間を計測対象とし、最初の遊脚相終了付近からを評価対象とした。以上により、各値を算出した結果例を図 4 に示す。同図では、評価対象の値(11~15 個)の平均値を棒グラフで、標準偏差をエラーバーにより示している。同図より、慣性センサを用いた場合の平均値は、動作解析装置等の結果と概ね同様の傾向が得られ、慣性センサの方が最大 6%程度小さかった。この対策のひとつとして、(1)式や(2)式に関連する計算の補正方法等、検討の余地があると考えられる。また図 4 の例では、慣性センサを用いた場合、標準偏差は平均値に対して 7%未満であった。ここでは歩行周期ごとに各値を算出したが、実用に応じて複数周期の平均値を用いる等の対応が考えられる。

4. 結言

靴のつま先付近に装着した慣性センサを用いて、歩行速度とストライド長を推定するシステムの動作を確認した。これにより、慣性センサを用いて、歩行動作を常時計測する基盤が構築された。今後は、本研究をもとに、さらに歩行の他のパラメータの推定を検討する予定である。また、複数の被験者による実証実験を行うとともに、補正のパラメータ等の最適化を行うことも課題である。

参考文献

- 1) 金 他, 日老医誌, Vol.50, No.4, (2013) 528.
- 2) 佐川 他, 計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.6, (2004) 635.
- 3) 澤留 他, 日本機械学会論文集, Vol.84, No.864, (2018) 1.
- 4) 廣瀬 他, スポーツ産業学研究, Vol.22, No.2, (2012) 255.
- 5) 廣瀬 他, 人間工学, Vol.50, No.4, (2014) 182.

キーワード：慣性センサ、歩行速度、ストライド長、トレッドミル、動作解析装置

An Estimation Technique for Walking Motion

Human Engineering Section; Katsuhiko SASAKI, Akira URAKAMI and Yoshitoshi TSUKAMOTO,
 Human Life Technology Research Institute; Masato MIZOGUCHI
 Product and Function Evaluation Section; Minoru UENO,
 Mechanics and Digital Engineering Section; Naoki KANAMORI

A system for estimating walking speed and stride length was constructed using an inertial sensor attached to near the toe of a shoe. In the system, the data processing algorithm to compensate calculated velocities and determine the swing phase was implemented. The fundamental performance of the system was confirmed with a treadmill and a motion analysis system.