

慣性センサを用いた積分による距離推定

An estimation method of walking distance by integrating acceleration of inertial sensor

○橋口 秋彦(高知工大院), 井上 喜雄(高知工大)

芝田 京子(高知工大), 柿森 亮昌(高知工大院)

Akihiko HASHIGUCHI, Kochi Univ. of Tech

Yoshio INOUE, Kochi Univ. of Tech.

Kyoko SHIBATA, Kochi Univ. of Tech.

Ryosuke KAKIMORI, Kochi Univ. of Tech.

Abstract: This paper shows a method of estimating 2-dimensional walking distance using one inertial sensor attached to human trunk. To estimate the walking distance, 3-dimensional acceleration in the global coordinate are calculated by coordinate transformation using four quaternion values. It is integrated twice and a compensation method to suppress the integration errors, and is proposed by using the condition that the initial velocity before walking and final velocity after walking are zero. Walking experiment is carried out on the stairs and the validity of the proposed estimation method is confirmed.

Key Words: Inertial sensor, Quaternion, Estimate of distance

1. 緒言

高齢者が歩行機能を維持することは健康寿命に大きく関連する。そのため高齢者の歩行能力を日常的に診断し適切な運動を選択することで、その能力を維持向上させることはロコモ対策という観点から有効であると考えられる。

歩行機能を診断する技術として古くから用いられている方法として複数の三次元動作解析カメラと床反力計を用いた解析技術があるが、歩数や場所など計測上の制限が非常に大きい。近年著者らの研究グループではウェアラブルな運動解析システム⁽¹⁾を開発し前述の制約を取り除くことができたが、それでも4個の3軸床反力計と10個の慣性センサからなるシステムは、高齢者が個人用として使用するには高価なシステムであると考えられる。

そこで、1個の慣性センサのみで個人用の運動解析システムを構築することを考える。その第一歩として既報⁽²⁾にて1個の慣性センサで平坦な床面を歩いた場合の歩幅を推定する方法について報告したが、本報では、それを拡張し体幹に取り付けた1個の慣性センサで階段などの平面でない床面上での進行方向ならびに上下方向の移動距離を推定する方法について検討する。慣性センサには、3軸の加速度計、ジャイロセンサ、地磁気センサが内蔵されており、加速度センサの出力を静止座標系へ座標変換して得られる進行方向および上下方向の加速度を2度積分して移動距離を推定するが、単純な積分では積分誤差が非常に大きくなるため、静止時には速度ゼロという条件を用いて補正する方法を提案し、実験により提案法の妥当性を確認する。

2. 提案する距離推定方法

2-1 座標変換

センサ座標系で計測した3軸の加速度をグローバルな静止座標系へ座標変換する必要があるが、本研究の座標変換は、クォータニオンによる方法を用いる。クォータニオンは、各軸のベクトルにより任意の軸を作成し直接変換させるため、1回の変換で済み、計算処理が早く、誤差が小さいというメリットがある。

クォータニオンを用いて座標変換をする場合、次に述べる2つの vq_j と q_j' ($j=0\sim3$)から各時刻*i*に対する4つのクォータニオンの値を算出する必要がある。これらは、慣性センサが出力する加速度、ジャイロ、地磁気の情報を用いて求められる。

vq_j は、取り付け誤差を解決するために、静止座標系における計測開始時の停止状態(以下、初期状態)の傾きを表すための値である。まず、初期状態の加速度情報を用い、各軸のベクトルの内積から回転量を、外積から回転軸を求める。式(1),(2)は、慣性センサから得られる各軸の初期加速度を $\{X, Y, Z\}$ として、回転量 θ と回転軸 $\{n_x, n_y, n_z\}$ を求める式である。初期状態では停止していることから地面と鉛直な加速度 $\{0, 0, G\}$ であることを用いる。

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \right) \quad (1)$$

$$\{n_x, n_y, n_z\} = \frac{1}{\sqrt{Y^2 + X^2}} \{-Y, X, 0\} \quad (2)$$

得られた回転量と回転軸から、式(3)により、センサ座標系から静止座標系に変換するためのクォータニオン vq_j が得られる。

$$\begin{pmatrix} vq_0 \\ vq_1 \\ vq_2 \\ vq_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ n_x \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ n_y \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ n_z \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{pmatrix} \quad (3)$$

q_{ij}' は、初期状態におけるクォータニオン q_{0j} を基準とした、移動時の各時刻*i*のクォータニオン q_{ij} との差であり、式(4)により算出する。

$$\begin{pmatrix} q_{i0}' \\ q_{i1}' \\ q_{i2}' \\ q_{i3}' \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} q_{i0} & -q_{i1} & -q_{i2} & -q_{i3} \\ q_{i1} & q_{i0} & -q_{i3} & q_{i2} \\ q_{i2} & q_{i3} & q_{i0} & -q_{i1} \\ q_{i3} & -q_{i2} & q_{i1} & q_{i0} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} q_{00} \\ -q_{01} \\ -q_{02} \\ -q_{03} \end{pmatrix} \quad (4)$$

歩行時のクォータニオンの値 q_{ij} , 初期状態のクォータニオンの値 q_{0j} , センサ座標系を静止座標系に変換する vq_j の順番で掛けることで, クォータニオンの値 q_{ij} が求められる. この q_{ij} を用いて, 座標変換したい加速度やジャイロの値 $\{x, y, z\}$ から式(5)により座標変換後の値 $\{x', y', z'\}$ が得られる.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 - q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 + q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (5)$$

2-2 速度補正法

歩行時の距離推定において, 停止していることが分かれば, その時の速度を 0 とする補正を用いて精度を確保することが本研究のねらいである.

図1で青色の線は進行方向のみに1歩進んだときの加速度を積分して速度を推定した結果である. さらに速度を積分して正解値が 0.7[m]となるまでの歩行距離を推定した結果を図2に青色の線で示している. 図より停止時の速度は 0 にはなっておらず, 歩行距離は 0.7[m]とは大きく異なる.

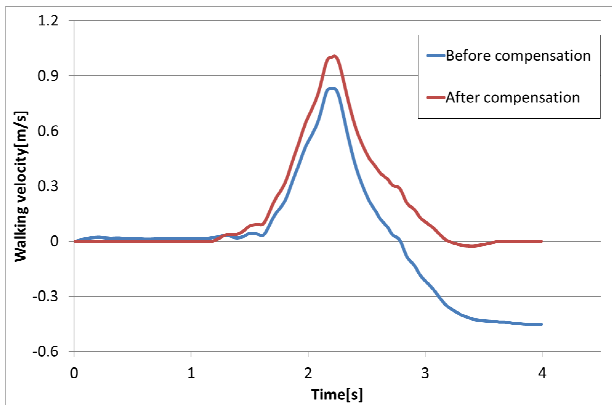


Fig. 1 Compensation velocity

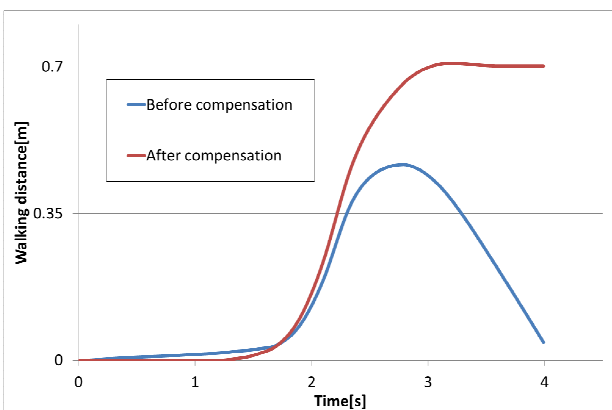


Fig. 2 Compensation distance

そこで, 停止時の速度の推定値 v_i が補正によりゼロとなるように現在の速度から一律に歩行終了速度 v_f と歩行開始速度 v_s の差である $(v_f - v_s)$ に歩行開始からの時間の割合を乗じた値で減じたものを補正後の速度 v_{ci} として求めたものを図1の赤色の曲線で示す. 当然のことながら停止時には速度は 0 となっている. さらに補正後の速度を積分

して得られた変位を図2の赤色の曲線で示す. 図より停止時の移動距離は, ほぼ 0.7[m]となり補正により推定精度が大きく向上したことが分かる.

$$v_{ci} = v_i - v_s - (v_f - v_s) \frac{t_i - t_s}{t_f - t_s} \quad (6)$$

ここで, v_s は歩行開始時の速度, v_f は歩行終了時の速度 t_s は歩行開始時間, t_f は歩行終了時間, t_i は時間の変数とする.

3. 歩行開始・終了の判定法および実験による検討

3-1 判定方法および検証実験方法

歩行は, 静止状態から開始し終了後には静止という条件で行う. 開始前および終了後の静止状態の判定には, 慣性センサの加速度計およびジャイロセンサの出力をそれぞれ合成したものが閾値以下であることを判定条件とした.

判定方法の妥当性を調べるために2個のセンサを用いた簡単な予備実験を行った. 今回の予備実験で使用した慣性センサ(MTx-28A53G25 : Xsens 社製)を図3に示す. 予備実験では大腿部は体幹部よりも歩行開始・終了が明確にわかり, 接地による衝撃⁽³⁾を受けにくいと考え, 体幹部でも大腿部と同様の結果が得られるかどうかを調べるために, 図4のように2つの慣性センサを同期して階段を上ったときのデータを計測する. 実験時は, サンプルング周波数 100[Hz]で計測を行い, 計測開始時と終了時の確認をし易くするために, 約2秒停止してから歩行を開始し, 歩行終了後も約2秒停止してから計測を終了する.



Fig. 3 Inertial sensor

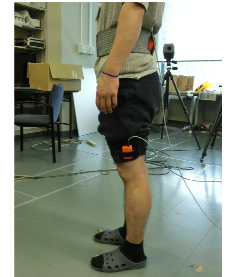


Fig. 4 Fixed sensor points

3-2 実験結果

実験結果から3軸を合成した加速度の波形を図5, ジャイロの波形を図6に示す. 加速度, ジャイロを比較した図より, 歩行開始・終了付近での体幹部と大腿部が同様の変化をしていることが分かる. したがって, 次章の移動距離推定実験では体幹部の加速度, 角速度の合成値により歩行開始, 終了を判定することにする.

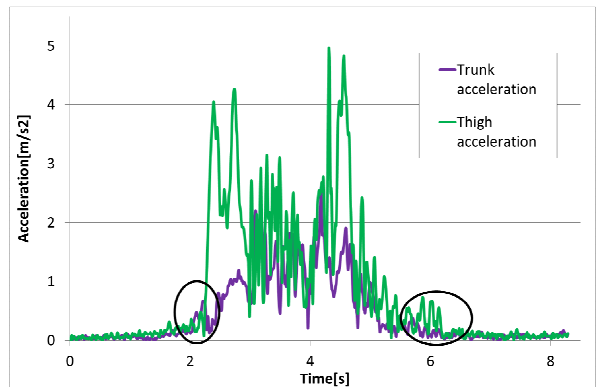


Fig. 5 Composition accelerations

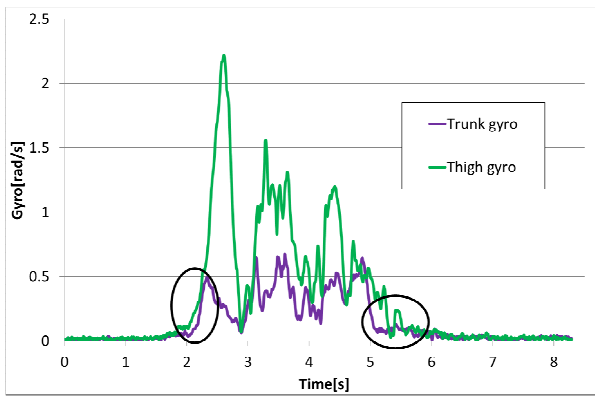


Fig. 6 Composition gyros

4. 歩行距離推定の実験

4-1 実験方法

平地の直進と階段を上った場合での2パターンで歩行実験を行った。慣性センサを体幹部に取り付け、サンプリング周波数 100[Hz]で計測を行い、計測開始時と終了時に速度を0にするため、約2秒停止してから歩行を開始し、歩行終了後も約2秒停止してから計測を終了する。

平面は進行方向のみに歩幅 0.7[m]を3歩、階段は一步あたり進行方向に0.265[m], 上下方向に0.17[m]で4歩上った。

4-2 実験結果

平面での歩行実験の進行方向の結果を図7、階段での歩行実験の結果を図8(進行方向)、図9(上下方向)に示す。これらの結果より、提案法による推定法は正解値との差が小さいため、停止した状態のある歩行であれば、平面、上下距離ともに実際の歩行距離に対しての推定距離との誤差より高い精度が得られることが確認できた。

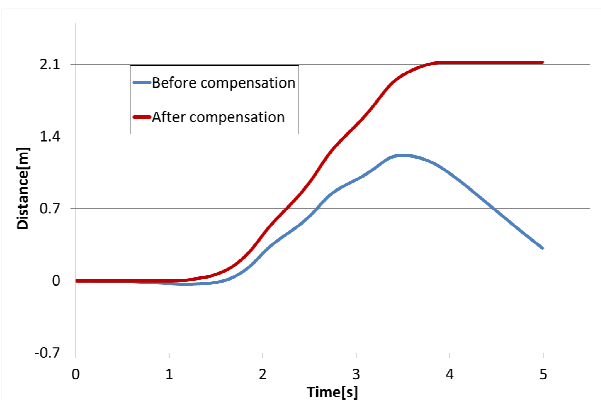


Fig. 7 Plane walking distance

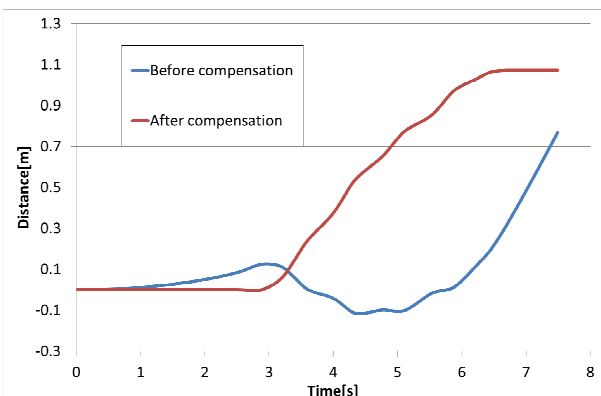


Fig. 8 Anteroposterior walking distance

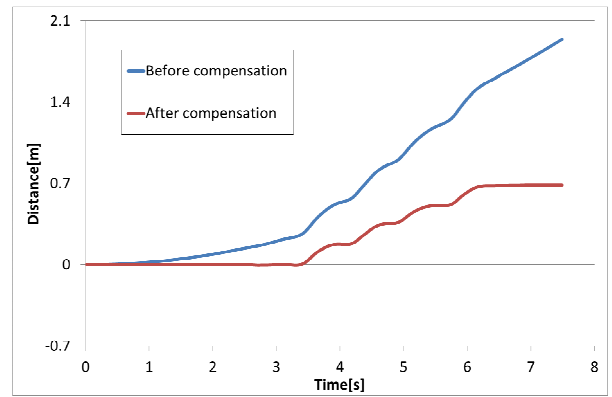


Fig. 9 Vertical walking distance

5. 結言

本研究では、個人用の運動解析の第一歩として、1個の慣性センサを体幹部に装着することで歩行時の進行方向、上下方向の移動距離を推定する方法について検討した。慣性センサの出力にクォータニオンを用いて座標変換を行って導出した静止座標系での加速度を積分し、停止時の速度がゼロであるという条件を用いて積分誤差を低減させて移動距離を推定する方法を提案し、階段での歩行実験を行った結果、提案法を用いれば推定時の誤差が大幅に低減することが分かった。

参考文献

- (1) 井上喜雄, 劉涛, 足立渡, 芝田京子, 塩島康造, 辻内伸好, 移動式フォースプレートの開発—柔軟でウェアラブルな床反力センサー, バイオメカニズム学会誌, 36巻4号(2012), pp.241-243.
- (2) 田村光, 井上喜雄, 芝田京子, 慣性センサを用いた移動物体の位置推定技術の開発, 日本機械学会中国四国支部 第53期総会・講演会(2015), No.613.
- (3) 錦戸良太 他, 踵接地時の衝撃的な加速度のウェアラブル姿勢センサへの影響, 日本機械学会中国四国学生会 第44回学生会卒業研究発表講演会, 講義番号 222, 2014