

加速度情報を用いた階段昇降移動量の推定法

Estimation of vertical displacement by accelerometer while moving up/down by the stairs

○伊奈淳, 佐川貢一, 猪岡光

○Atsushi Ina, Kouichi Sagawa,
Hikaru Inooka

東北大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

キーワード: 加速度波形 (acceleration waveform), 歩行形態 (walking state), ハイパスフィルタ (highpass filter), 積分開始点 (integral initiation), 上下方向移動量 (vertical displacement)

連絡先: 〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉 東北大学大学院 情報科学研究科 猪岡研究室
伊奈淳, Tel.: (022)217-7021, Fax.: (022)217-7019, E-mail: ina@control.is.tohoku.ac.jp

1. 緒言

近年, 高齢者や心臓病を有する患者の日常生活での運動量を, 無拘束で把握するための研究が多く行われている。特に, 歩数計やカロリーカウンタは, 歩行による消費エネルギーを簡単に求めることができることから, 従来から多く使用されてきた。しかし, これらの装置では, 階段昇降による消費エネルギーの違いを正確に求めることは不可能である。これは, 階段昇降時の歩行形態判別を行っていないためである。高橋らは, 腰部加速度波形を用い, いくつかの歩行形態に対してクラスタ分析法により得られた基準波形群とのパターンマッチングを行うことで, 屋内歩行における歩行形態の判別を高い精度で行うことに成功している¹⁾。そこで本報告では, さらに進んで, 歩行形態に応じて, その上下方向移動量を上下方向加速度の2階積分により計算することで, 階段昇降移動量の推

定を行う方法について考察する。

2. 実験装置

実験装置の概略を Fig.1に示す。Fig.1中の (Pre) は予備実験でのみ用いたものを表す。加速度の検出には, 互いに直行した3方向 (X=前後, Y=上下, Z=左右) の加速度を検出する3軸加速度センサ (共和電業社製 AS-5TG, 縦44[mm], 横44[mm], 厚さ20[mm]) を用い, これを専用のベルトに固定して被験者の右腰に装着した。本実験では, X,Y,Zの3方向の信号をそれぞれアンプで増幅し, 分解能12bitのA/D変換ボードを通してサンプリング周期10[ms]でコンピュータに取り込む。また歩行中のつま先と踵の離着地の情報を得るため, マイクロスイッチを取り付けたサンダルを用いた。また, 歩行時の身体各部の動きを把握するため, 歩

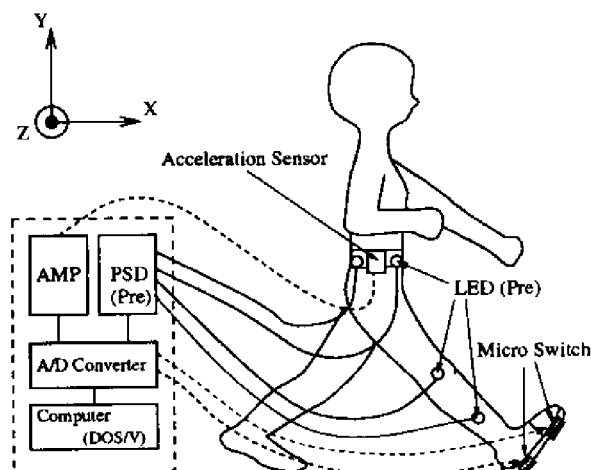


Fig. 1 実験装置の概略図

行の様子をビデオカメラで撮影した。

3. 実験方法

3.1 予備実験

予備実験では、平地歩行中の加速度と共に、足の各部（右腰のセンサの両脇、右膝および右足首の計4点）の位置を PSD を用いて測定した。これは、歩行中の加速度センサの水平面からの傾き角を詳細に把握するためである²⁾。なお、広角範囲の制限から、階段昇降時の測定は行っていない。

Fig.1に示す PSD(Position Sensor Detector)（浜松ホトニクス社製）は、カメラの広角範囲の制限から、1回の計測で2歩分のデータしか測定することができない。したがって、同時に計測される加速度情報も2歩分の短いデータとなってしまふ。そこで、PSDを伴う実験を予備実験とし、1回当たりの計測時間の長い本実験を改めて行った。

3.2 本実験

本実験では、平地、階段昇りおよび降りの3種類の歩行形態に対し、歩行中の加速度を計測した。実験場所は、大学の体育館内のロビー（平地歩行距離約6[m]）と体育館入口前の階段（1段の高さは約13[cm]で7段）である。被験者は、20代の男

性1名である。歩行中の足の各部の動きを把握するため、ここではPSDに代えてビデオカメラを用いた。

4. データ処理における問題点およびその解決法

4.1 加速度センサの装着時の傾き角による計測誤差

加速度センサを腰部に装着するとき、センサは水平面に対してある傾き角を持つ状態で取り付けられる。この傾き角 θ を PSD を用いて調べた結果を Fig.2の上のグラフに示す。このグラフより、加速度センサが歩行中に水平面から平均して約7度傾いていることが確認できる。センサの傾きによって生じる重力加速度の感度方向成分は、階段昇降移動量の推定を行う上で無視できない計測誤差を生み出す。ここでは、このような問題を解決することを考える。センサの装着時の傾き角がそのまま歩行中にも保存されるとすると、これによる計測誤差は、ごく低い周波数成分を持つ。そこで、0[Hz]近傍の低周波数成分をカットすることで、センサの傾きによる計測誤差を除去することを考える。本報告では、IIR(Infinite Impulse Response)デジタルフィルタの設計を行い、加速度波形に適用した。設計したフィルタはバターワースフィルタで、

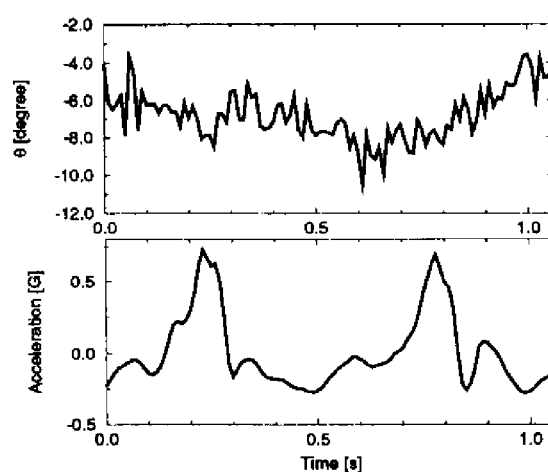


Fig. 2 加速度センサの傾き角

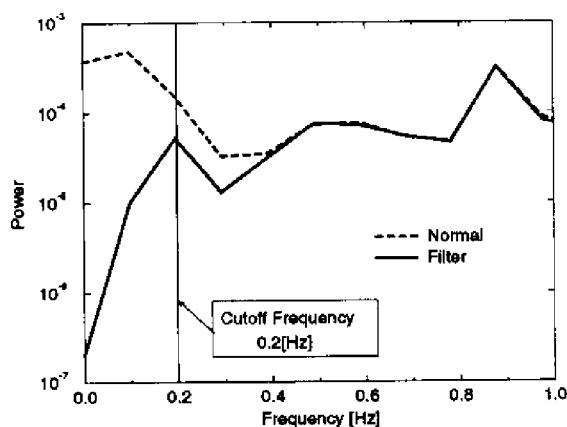


Fig. 3 加速度波形の周波数特性

その仕様は、カットオフ周波数0.2[Hz],2次のハイパスフィルタである^{3,4)}。式(1)に設計した2次のバターースフィルタの伝達関数 $H(z)$ を示す。

$$H(z) = 0.989284 \times \frac{z^0 - 2z^{-1} + z^{-2}}{1 - 1.97845z^{-1} + 0.9786z^{-2}} \quad (1)$$

ここで、カットオフ周波数の設定に関して、以下のことを考慮した。Fig.2の下のグラフに示すように、20代の健康な男性の歩行ペースは、およそ1秒あたり2歩であり、歩行によって生じる加速度は、約2[Hz]の周波数成分をもつといえる。しかし、高齢者や患者の場合、歩行ペースはより遅くなり、歩行により生じる加速度は、より低い周波数成分をもつことが予想される。本報告で設計したハイパスフィルタでは、カットオフ周波数を0.2[Hz]に設定したため、歩行ペースがより遅い場合でも、計測誤差成分のみを除去することができると考えられる。

Fig.3(実線)は、フィルタ処理後の上下方向の加速度波形の周波数成分である。フィルタ処理前の周波数成分Fig.3(破線)と比較すると、周波数0.2[Hz]以下の成分がカットされたことが確認できる。今後のデータ処理には、上記のハイパスフィルタを適用していくことにする。

4.2 積分開始点による影響

加速度波形から移動距離を求める際に積分を行うが、このとき積分開始点を適当に選ぶと、誤った計算が行われてしまう。実際に、階段昇り時の上下方向の加速度波形(フィルタ処理したもの)を適当な場所から2階積分し、上下方向移動量を求めた結果をFig.4に表す。階段昇りの場合、上下方向移動量は増加することが予想されるが、Fig.4の積分結果より、移動量は逆に減少している。このような誤った計算結果は、階段昇りに限らずどの歩行形態にも生じているが、この原因は、積分開始点の選択を誤ったことによると思われる。積分開始点の選択には、以下のことを考慮する必要があると考えられる。まず積分の計算過程では、積分定数を0としている。つまり、上下方向の加速度波形を積分する場合、波形の切り出し点の速度(上下方向の初速度)は、必ず0として計算される。したがって、もし任意の速度 v_0 をもつ時点から積分を開始すると、その後の積分結果全てに初期値における誤差 v_0 が影響し、誤った計算が行われることになる。このことより積分開始点として、加速度センサの上下方向の速度成分が0となる時点を選択する必要があると考えられる。

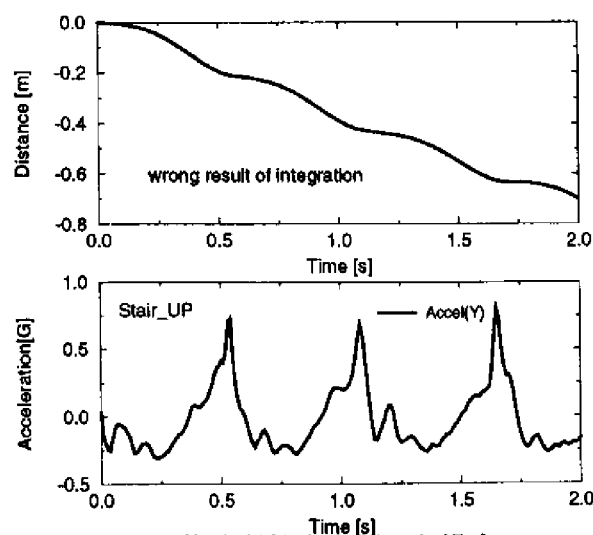


Fig. 4 積分開始点を誤った場合

5. 解析結果および考察

5.1 ビデオ映像からの積分開始点の選択

撮影したビデオをスロー再生で観察することにより、平地、階段の昇り降りの各歩行形態において、腰部（センサ）の上下方向速度が0になるタイミングを調べた。この観察によって得られたタイミングと、それをもとに選択した加速度波形上の積分開始点を、各歩行形態ごとに表1にまとめた。表中の記号については、右足の踵が着地した瞬間を t_r 、選択した積分開始点を t_i としている。表1より、平地と階段昇りについては、積分開始点は、右踵着地の瞬間であるという共通した情報が得られたが、階段降りの場合は踵が着いてから67[ms]（ビデオ映像の2フレーム分）の遅れがある。これは、踵を着いてから腰部（センサ）の上下動が止まるまでに、膝のクッションによる時間差があるためであると考えられる。なお、加速度データのサンプリング周波数が100[Hz]であるのに対して、ビデオのサンプリング周波数が30[Hz]であるため、約20[ms]以内の時間差については微調整を行った。

表1 積分開始点の選択

歩行形態	センサ上下動の静止点	積分開始点 t_i
平地歩行	右踵着地の瞬間	$t_r + 0.02[s]$
階段昇り	右踵着地の瞬間	t_r
階段降り	右踵着地後約67[ms]	$t_r + 0.07[s]$

Fig.5,6,7は、それぞれ平地、階段の昇りおよび降りの各歩行形態での、上下方向の加速度波形（フィルタ処理したもの）と右踵の離着地の情報である。また、積分開始点 t_i を一点鎖線で示した。ここで、右踵（Right Heel）の情報に関しては、接地している時には“0”、離れている時には“1”が出力されている。

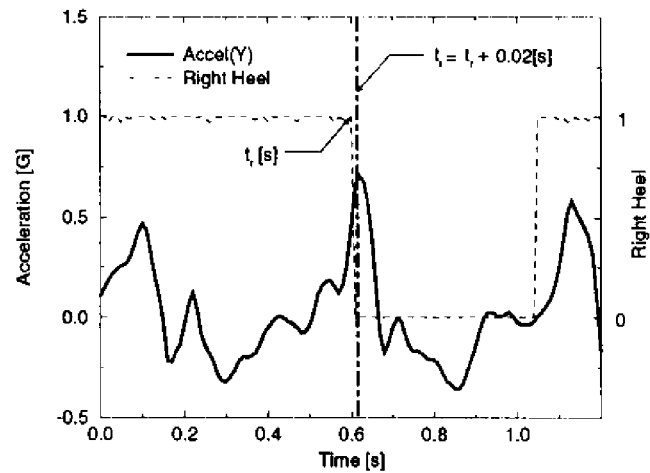


Fig. 5 積分開始点（平地）

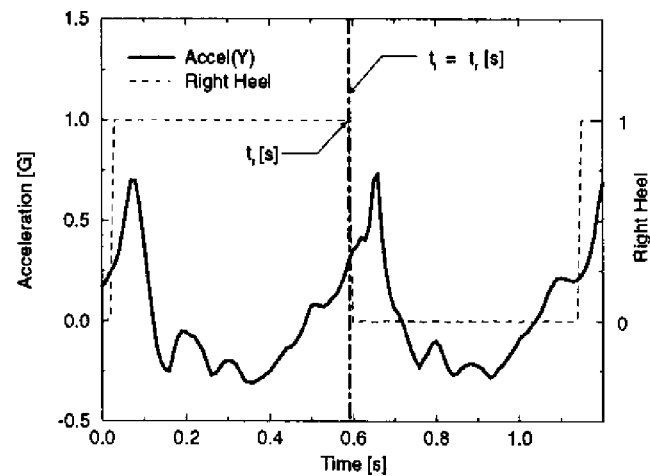


Fig. 6 積分開始点（階段昇り）

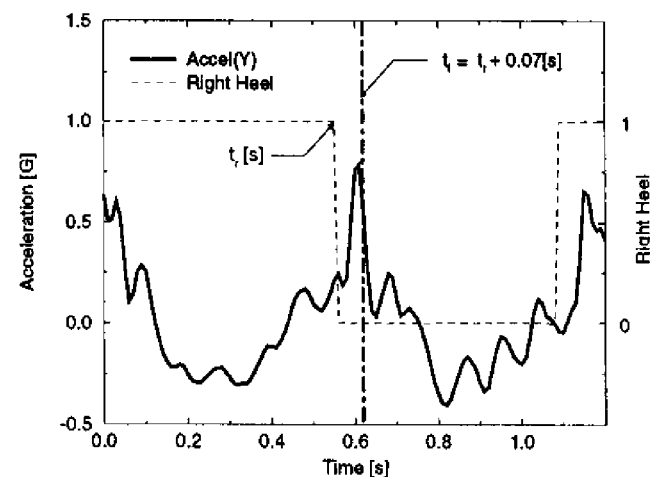


Fig. 7 積分開始点（階段降り）

5.2 積分結果

次に、Fig.5からFig.7に示した積分開始点 t_i (一点鎖線)から、平地、階段昇りおよび降りの各歩行形態の加速度波形(フィルタ処理したものではないもの)を2階積分して移動距離を求めた結果を、それぞれFig.8,9,10に示す。なお、Fig.9, Fig.10には、階段の段差を点線で示した。これらの図より、1歩あたり数cmの誤差はあるものの、平地、階段の昇りおよび降りを区別する程度には十分な結果が得られているといえる。

6. 結言

本報告では、人間の歩行時の上下方向の加速度を2階積分し、上下方向の移動距離を推定する方法を考察した。その結果、加速度情報に対して、ハイパスフィルタ処理を行い、且つ積分開始点をセンサの上下方向の速度成分が0となる時点に選択することにより、加速度データを積分して、階段昇降移動量の推定を行えることがわかった。しかし、現段階では、マイクロスイッチやビデオ映像をもとに積分開始点を選択している。今後は、加速度情報のみを用いる方法で、腰部(センサ)の上下動が止まっている瞬間を検出する方法を解明する必要がある。

参考文献

- 1) 高橋隆行, 山中信幸, 大沢博文, 猪岡光, “歩行運動の無拘束計測のための歩行形態分析アルゴリズム”, 医用電子と生体工学, Vol.33, No.2, 別刷(1995).
- 2) 高木幹雄, 下田陽久, “画像解析ハンドブック”, pp259-261.
- 3) 中村尚五, “ビギナーズデジタルフィルタ”, (1989), pp45-76.
- 4) 尾知博, “デジタルフィルタの設計入門”, (1990).

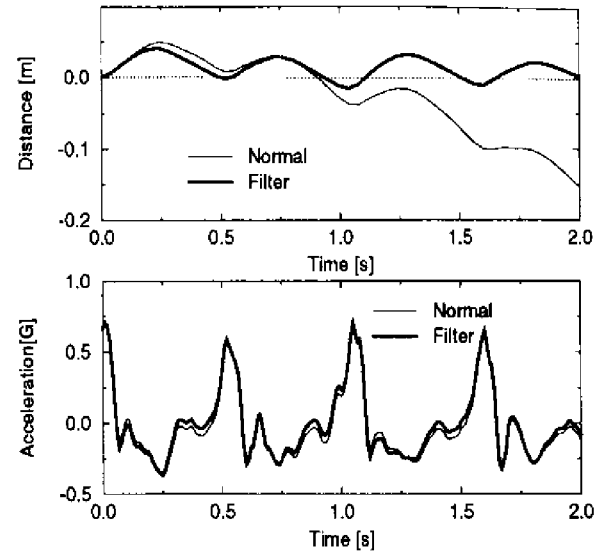


Fig. 8 積分結果(平地)

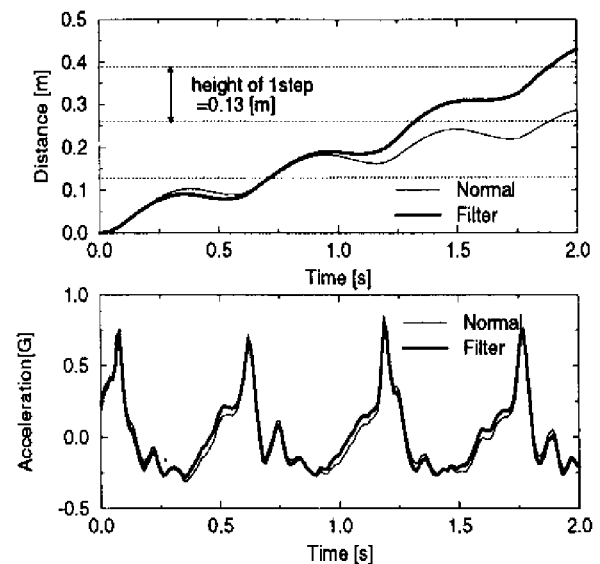


Fig. 9 積分結果(階段昇り)

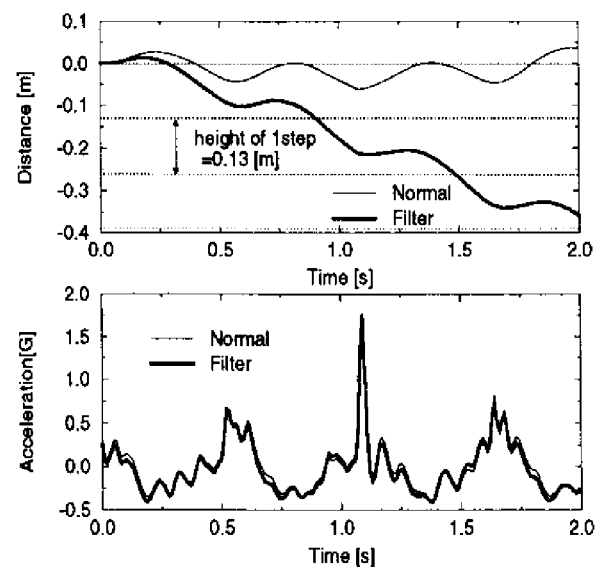


Fig. 10 積分結果(階段降り)