

ウォーキングとジョギングの相伴に

白水重憲*, 白水陽久**

1 はじめに

体に小さな装置を貼り付けておけば、その間の歩行・走行の歩数、距離、速度の時々刻々の変化をグラフにし、歩行と走行にわけ、それぞれの総歩数、時間、移動距離、平均速度、消費エネルギーを求める事ができる装置ができました。

運動を始めたばかりの方には、毎日の努力或いは努力の不足が数値化でき、次への励みになる新装置です。また、日常生活の中での活動量を振り返る際にも、日常的にジョギングやランニングをされる方からアスリートまでの走行管理にも最適です。

私自身、この研究を始めた頃は、脚が弱っていて足底腱膜炎に苦しんでおり、動き出す最初はびっこを引く様な有様でしたが、測定の為に歩いているうちに徐々に脚の状態が良くなり、走れるようになり、走れる距離も300m、800mと次第に増えていきました。今では、多摩川辺の1周9kmのコースに挑み、まだ全部を走る事はできませんが、“今日は6km走れた”とか“今日は4.5kmしか走れなかった”という様になりました。この喜びを、皆さまにもお裾分けしたいと思う訳です。

体に装着するのは、重さ10g程度の小さな装置です。胸部中央に両面テープで貼り付けます。元来、この装置は人々の日常生活行動の測定や、スポーツ科学への応用の為に開発した装置です。活動終了後、この装置からパソコンにデータを回収して解析します。加速度を128Hzの周波数でサンプリングします。

図1に、結果の例を示します。加速度波形（上段

図）を解析し、時々刻々の速度（中段図）と積算した距離（下段図）を示します。歩行と走行に分けて、歩数、総移動距離、平均速度、消費エネルギーを表示します。

発端は、ある体育学部で、スポーツ動作学の講義をするようになった事です。これまでも加速度を利用して歩行を研究した論文を読んだ事はありましたが、自分自身での研究は、姿勢評価、日常生活の行動量評価、睡眠・覚醒が主でした。最初の年は、週に4コマの講義を“させられました”。正木健雄先生のご指導の下、日本体育大学の図書館で大急ぎで身体動作学の知見と加速度センサーに関する研究例を整理して講義資料を準備しながら、加速度センサーを上手く講義に使用する方法を考えていました。

2 歩行挙動

まず時間の流れに沿って、両足で立っている状態から右の一步、左の一步、そしてその次の右の一步の始まりまでを右脚の視点で説明します。（高木、身体運動学）

立っている時は身体を2つの足で支持しています（二脚支持期）。

右脚で地面を後に押せば、反作用で体は前方におされます。右脚が動き出し、身体の平衡がくずれます。（一脚支持期。左脚が支持脚、右脚は振動脚。）身体は左脚だけで支持されていますが、容易に前に動き出します。地面を押した右脚は振動脚として股関節を中心に前に振り出され、身体が前に倒れないうちに、一歩前の地面に踵から着きます。

体重が右脚の踵に落ちます。体重の支持点は足の外縁を伝わって小趾球から母趾球に移動します。体重は

*NPO 法人セルフケア総合研究所

**麻布高等学校一年

受付日：2010年12月30日

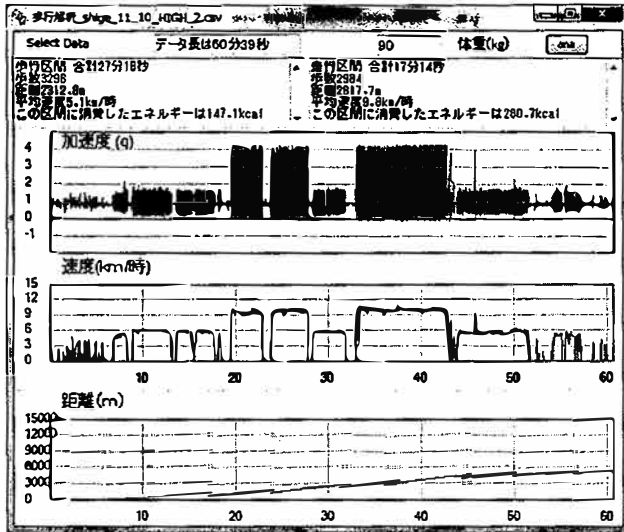


図1 最新のソフトウェアの解析結果

次第に右脚に移ります。(二脚支持期)

今まで支持脚であった左脚が地面を押して振動脚になります。(一脚支持期。右脚が支持脚。左脚が振動脚。)体が前に推されるにつれて、右脚は支持点を中心に円運動を行います。

左脚が一步前に踵から接地する頃には、身体は右脚の支持点のかなり前に来ており(二脚支持期)、支持点は母趾球の内側であり、母趾球を曲げて地面を蹴ります。

加速度センサーが人の歩行に使用されるようになった当初は、波形をこのような歩行の時間的な動きで説明した試みも結構多く、“あの論文のあの波形の説明は間違っている。”と熱く主張する研究者もいました。

我々も加速度データの時間的な変動を解析して、加速度のピークをカウントして歩数を求めるアルゴリズムを検討した事もあります。しかし、人の歩行の加速度波形は様々であり、1歩の間に複数の鋭いピークを示すものもあれば、そうでないものもいて、万人に対してシンプルなアルゴリズムにより、ピークを検出して歩数を求める事は断念しました。

一方、先に述べた歩行挙動を、骨盤の周期運動としてとらえると、以下の様にシンプルに表現する事ができます。

1歩(ステップ)の間に骨盤は、前にも後ろにも動き、体重が一方の脚から他方の脚に移動される時には上にも動きます。また、体重のこのような移動は、骨盤の左右運動ももたらします。従って、連続した左右での1歩(1ストライド)中に、骨盤は垂直方向に2

回の振動、前後方向に2回の振動、左右方向に一回の振動を示します。そして、骨盤に支えられた体幹と頭は骨盤の運動に追従します。(Zijlstra W. Hof AL, Gait and Posture, Vol.6 249-262 (1997))

この表現はシンプルばかりでなく、これから進めて行く周波数解析の強力な指導原理でもあります。骨盤付近は、歩行研究には重要なポイントで、多くの加速度活動量計が腰付近に装着されている訳です。我々の場合は装置を体幹の中央へ装着しますが、骨盤の動きはここでも反映されます。

3. 加速度波形のハーモニクス解析

歩行時の加速度の波形が、いくつかの正弦波の組の重ね合わせで得られる事が判っています。

歩行の場合の基本周波数(一番低い周波数)は、左右の一步で一回の振動を行う1ストライドに対応するものです。この周波数の正弦波を“1次のハーモニクス”といいます。一步に対応する周波数は基本周波数の2倍であり、この正弦波を“2次のハーモニクス”といいます。

理想的な歩行の場合、前後方向と垂直方向の加速度波形は、2次とその整数倍、つまり偶数次のハーモニクスのみが存在するといわれます。左右のバランスが良く、左脚と右脚の一步が全く同じ場合です。

ところが、片方の脚を痛めたりすると、左右の一步が完全に同じではなくなり、左右の一步の対に対応した周波数の1次とその整数倍、つまり奇数次のハーモニクスが大きくなります。

従って、“ハーモニクス比”というものを、偶数次のハーモニクスの振幅の総和を奇数次のハーモニクスの総和で割ったものとして定義すると、歩行の対称性や滑らかさを示す指標になる事が知られています。Menz等は20次(20倍周波数)までのハーモニクスを使用しています。(Menz HB, Lord SR, Fitzpatrick RC., Gait Posture. 2003 Aug; 18(1): 35-46.)

4. ハーモニクス解析からフーリエ変換へ

このMenz等の研究に触発されて、この研究の内容を再現し、学生達に体感させる事を目的として、歩行解析のソフトウェアを作り始めました。

さてMenz等は、波形から踵接地点を求め、「連続する左足踵接地点間」を“1ストライドの周期”として20次までのハーモニクスを求めています。実験室

内に設定された環境での少ない歩数のデータならば、視察で接地点を求めて行く事も可能です。或いは、より正確性を期する為に“かかとの接地のタイミング”にマーカーを入れる事も可能です。

しかしながら、フィールドで多くのデータを処理しようとする場合は、加速度データだけで、かつ、自動的に処理する必要があります。人の歩行時の加速度波形は千差万別であり、それら全てに対して自動的に踵着地点を求める事が困難である事は、すでに我々も経験した通りです。

我々は、そこで、ハーモニクス解析ではなくフーリエ変換を使用して解析を進める事にしました。すなわち、加速度波形を視察して、基本周期を求め、基本周波数を決定するのではなく、解析をする時間範囲として定めた時間の長さに対応する一番低い周波数から周波数を大きくしていき、その周波数の成分が含まれているか否かを解析して行きます。波形データ中にその周波数成分が多く含まれれば、振幅が大きくなるし、含まれていなければ振幅は0に近くなります。

解析方法として、最初はポピュラーな高速フーリエ変換 (FFT) を使用しました。この方法では自動的にデータのサンプリング周波数 (128 Hz) の 1/2、つまり 64 Hz までの解析結果が得られますが、歩行の基本周波数は高々 1 Hz なので、20 Hz までを表示・解析の対象としました。

図 2 に解析した結果の例を示します。データの長さは 8 秒間、データ点数は 1024 点です。上から順に垂直方向、前後方向、左右方向の加速度波形と、その

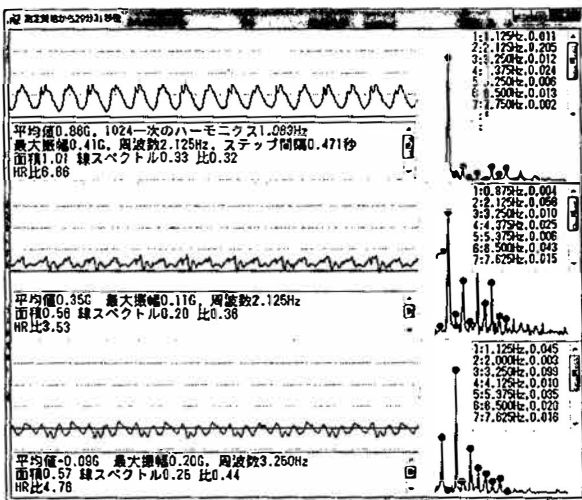


図 2 垂直、前後、左右方向の加速度波形と周波数スペクトラム

周波数スペクトルです。周波数スペクトルとは横軸に周波数を、縦軸にその周波数の成分の大きさをプロットしたグラフです。図 2 に示したスペクトルは 3 つとも非常に明瞭な構造を持っている事が判ります。垂直方向のスペクトルの最大ピークの周波数 (2.125 Hz) が歩行のピッチで、この逆数としてステップ時間間隔 0.471 秒が得られます。

この周波数は 2 次のハーモニクスに対応する周波数ですから、1/2 にして 1 次のハーモニクスの周波数 1.063 Hz を求め、その 10 倍までの周波数の位置付近のピークを探して丸印を描き、成分の大きさを求めました。一番左側の丸印が 1 次のハーモニクスです。この成分の大きさが小さい事が判ります。左から 2 つ目が 2 次のハーモニクスでこの成分が最大です。3 つ目はまた小さく、4 つ目は少し大きくと、奇数次のハーモニクスの成分は小さく、偶数次のハーモニクスの成分が大きい事が判ります。スペクトル中に記されている値は成分の大きさです。最大振幅、つまり 2 次のハーモニクスの振幅は 0.41 g (g は加速度の単位です。重力加速度が 1 g となります。)、ハーモニクス比 (HR 比) は 6.86 となります。(フーリエ変換の特性上、スペクトルの成分の大きさはハーモニクスの振幅の 1/2 になります。)

前後方向、左右方向の加速度にも同様の事を行いました。垂直・前後方向のスペクトルは偶数次のハーモニクスのピークが大きいこと、左右方向のスペクトルは奇数次のハーモニクスのピークが大きい事が判ります。

このように FFT を使用した解析で、ハーモニクス解析と同様の事ができます。(図中のここで説明しなかった項目は、現在使用していないので省きました。)

この歩行データは最近の私のものです。もっと理想に近いものかと思って、探しましたがなかなかありません。この時は筋肉痛の為と考えていましたが、悪い歩き方をする癖がついているのかも知れません。

この方法には、個人の識別・体調管理・歩行訓練等へのいろいろな応用展開が考えられます。

5. 点の解析から全体の解析へ

学生達に装置を渡して、部屋の中での静かな歩行、屋外でのゆっくりした歩行、普通の歩行、少し速めの歩行、速めの歩行を 1 分間以上連続して行ったデータを測定する事を宿題にしました。また、各歩行の前後

1分間は識別の為に動かない事を指示しました。それから、「良かったら、最後に軽い走行を行って欲しい」とお願いしました。

これまでは、波形全体を表示し、その中からマウスで指定したピンポイント付近の8秒間に対して図2を求め解析を行っていましたが、データの全貌を一度に把握する為に、垂直方向の加速度データ全域に渡り8秒毎に解析を行い、横軸に時間、縦軸に周波数をとってピーク強度の変化を色を変化させてプロットさせてという表示方法にしました。このように時間の情報と周波数の情報を同時に示そうとするデータの表現方法を時間周波数マップと呼びます。

図3と図4に学生の測定結果のまじめな例と面白い例を示します。

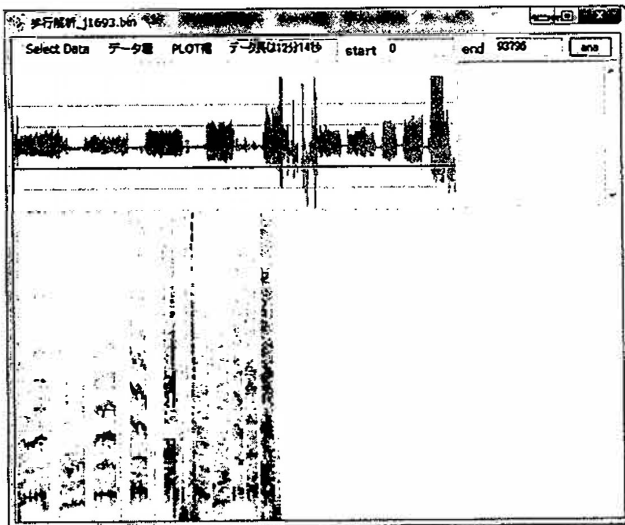


図3 学生の測定結果 (まじめな例)

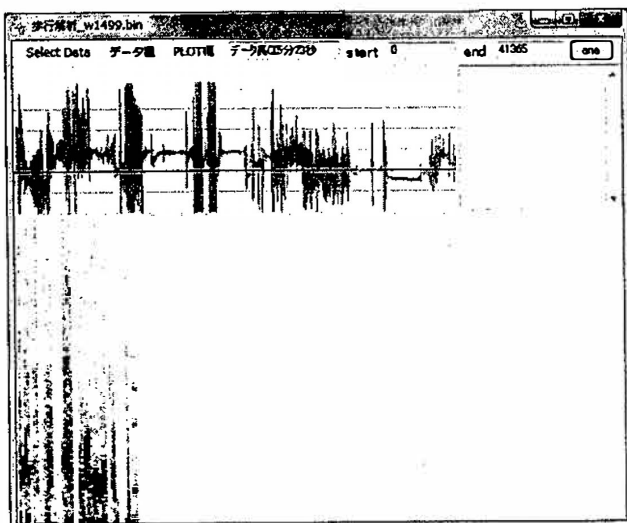


図4 学生の測定結果 (面白い例)

図3は、まじめな例です。指示を守った後、走行もやってくれました。上段の図も下段の図も、横軸は時間で、左端がスタートです。

図3の上段は垂直方向の加速度です。塊がある所が歩行・走行で、この塊の振幅がその強度を表します。塊の前後は区切りの為の動かない領域です。

図3の下段は、上で説明した時間周波数マップです。歩行を行った場合は、図2に示した様に、周波数スペクトルで歩行の基本周波数の偶数倍の周波数の成分のみが大きなピークを示し、それ以外の周波数の成分は小さなものとなっていました。歩行が続き、このようなスペクトルが並ぶと、時間周波数マップには、図3下段に示すように、特徴的な縞構造が現れます。更に、図3下段では一番下が一番低い周波数ですから、この縞の縦方向の位置で歩行の速度が判ります。

上段と下段で、横軸の拡がりっていますが、対応関係は判ると思います。歩行が続いた後、区切りの為の動かない領域があります。動かない領域は時間周波数マップでは空白の領域になります。

その後、最初の歩行より上段の振幅が小さく、横縞の位置が低い、すなわち、強度が弱くて速度も小さい歩行が始まります(2つめ)。

区切りの後、より振幅の大きな横縞の位置が高い歩行が続き(3つめ)、区切りを挟んで、更に振幅の大きな横縞の位置の高い歩行に続きます(4つめ)。

5つ目の塊は、更に振幅の大きな横縞の位置の高いジョギングが始まり、区切り無しに、更に振幅の大きな区間が続きます。横縞の位置は同じです。ジョギングから走行になったようです。

5つ目の塊は、その後今までとは違う変動のパターンを示します。この領域は、下段に縞構造が現れません。歩行や走行とは異なる加速度変動です。その後、1つめの塊と類似した歩行に続きます。その後、2つめ、3つめ、4つめに類似した歩行が繰り返され(6つめ、7つめ、8つめ)、最後は再び走行になっています。

このデータより、歩行の周波数(ピッチ)が歩行中に変動する場合がある事、遅い速度の場合は一定した速度で歩くのは難しい事、速く歩こうとすると周波数とともに加速度の振幅(歩行の強度)も大きくなる事、歩行からジョギング・走行になると振幅が格段に大きくなる事が判ります。

図4はおもしろい例です。どうも歩行以外の方法で

加速度の変動を起こした様です。図4の下段には縞構造のある領域がありません。判断できないと思って挑戦して来たのでしょうか。実は、このような例がある事を想定して、一望して判断できるようにこのプログラムを作成したのです。学生諸君とのやりとりは、まじめな学生も、面白い事やってくれる学生もインスピレーションを与えてくれる大事なものです。

歩行・走行とそれ以外の加速度変動を縞構造のパターンの有無で区別できるようになりました。また、この縞構造の有無はハーモニクス比の値によっても判断する事ができます。また、歩数は解析している時間範囲の長さ歩行のピッチ（周波数）をかける事で得る事ができます。歩行・走行運動を他の加速度変動から識別し、ピッチや歩数が判るようになりました。

さて、歩行に関するこのような研究は、スポーツ科学を意識してではなく、高齢者の転倒予測や転倒防止の観点から行われていました。従って、通常歩行以上の速度や走行への拡張など意識したものは見当たりませんでした。今回の検討で、歩行の解析と同じ考え方を走行にも使えそうだという事と、走行の特徴がおぼろげに判った訳です。

この結果を受けて、共同研究者と二人で、高速歩行時、走行時のデータを何度も測定し解析し、歩行、走行に関する知見を集積しました。そして、垂直方向の加速度の解析結果でハーモニクス比が3以上であれば歩行・走行と識別できる事、2次のハーモニクスの振幅が0.6以下ならば歩行であり、それより大きければ走行である事が判りました。この判断基準に基づいて、このプログラムの後期のバージョンでは、歩行時、走行時それぞれの総時間と総歩数を表示する様にしました。

6. 速度と移動距離と消費エネルギー

この様にして、走っては、歩行・走行速度の変動の定性的なマップと歩数とを眺めているうちに、やはり歩行・走行時の速度や距離を知りたいと思う様になりました。その為には歩幅の情報が必要です。といっても、万歩計を買った人がよくやるように、床に物差しをおいて歩幅を計測すれば済むというものではありません。歩行時・走行時の歩幅が必要となります。そして、その歩幅は、歩行速度によって変化することになります。

こういう事を考えている時期に、徐々に伸びてきた

多摩川辺の走行範囲のちょっと先に、400mのトラックがあるのを見つけました。また、これと同じ頃、私が市販万歩計の歩数カウント精度を調査する為に求めたオムロンの活動量計 Jog style HJA-300 には、長さの判ったコースを走り、その区間での歩数から歩幅を求める機能がありました。

この400mトラックを利用し、HJA-300を使用して歩幅の速度依存性を測定してみました。我々の装置も同時に装着してです。ゆっくり歩くところから、全力で走るまで、速度を変えて測定を行いました。当時は、まだ走れる距離が短かったので、トラックまでは、体力を温存する為にゆっくり歩いて行きました。後半の測定で400m走り続けるのがきつかった事！

図3の場合と同様に、走行・歩行の速度を増加して行くと、歩行速度を決定するピッチ（歩行の周波数）と2次のハーモニクスの振幅の両方が増加し、これらと同時に歩幅も増加しました。前へ勢いよく進もうとする加速度の増加は、歩幅の増加とともに加速度の垂直方向の成分の増加をもたらす事が判りました。

つまり、歩行・走行速度が速くなると、2次のハーモニクスは周波数も振幅も両方も増加するのです。ピッチ、振幅と歩幅との関係を検討すると、振幅と歩幅とが良い線形関係を示しました。

次の日、今度は共同研究者と二人で測定を繰り返しました。被験者2人で、合計3回の測定を行った結果を図5に示します。歩幅と2次のハーモニクスの振幅との間に、比較的良好な線形関係が得られました。

ここで得られた関係式を使用して、2次のハーモニクスの振幅より歩幅を推定する事ができます。歩幅が

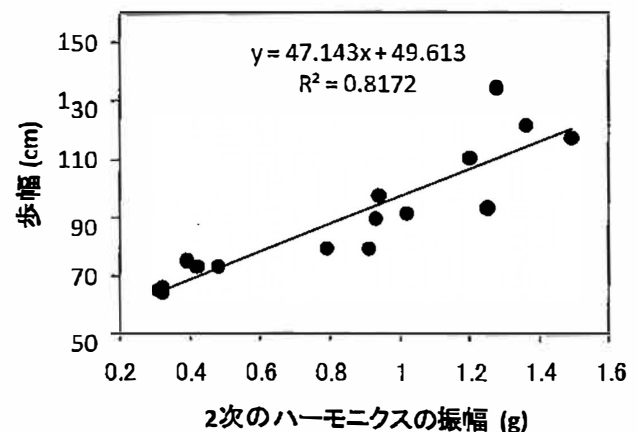


図5 2次のハーモニクスの振幅と歩幅の関係

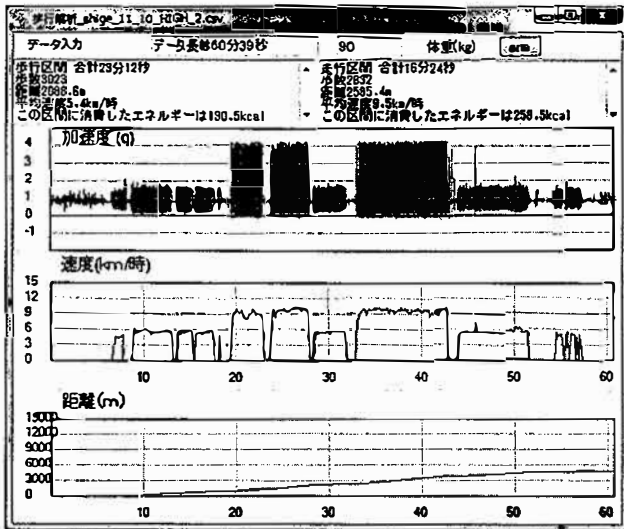


図6 FFTバージョン

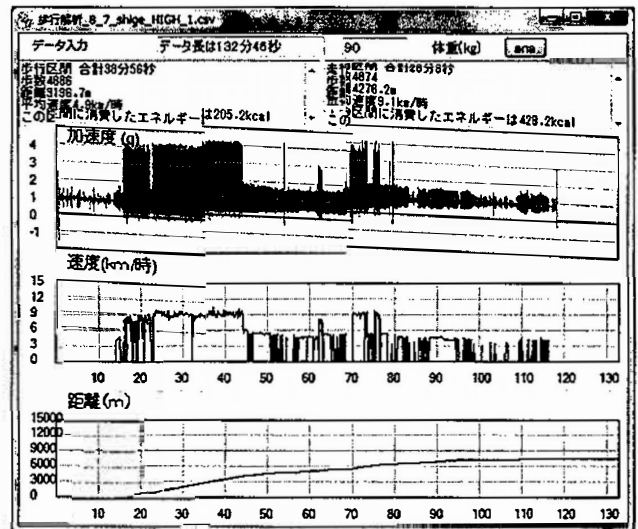


図7 解析結果がおかしなデータの例

判ると、距離と速度とがわかります。また、2次のハーモニクス（高調波）の振幅の大きさで、歩行と走行を区別できるので、走行と歩行を区別してエネルギー消費をそれぞれの速度より精度よく推定することができます。

これで歩行・走行評価装置 FFT バージョンの完成です。（図6）横軸は、測定開始からの経過時間で、時間軸は3つとも揃っています。目盛の数字は分単位です。上段の図は垂直方向の加速度、中段の図は速度、下段の図は積算距離です。最上段には、歩行と走行の総時間、総歩数、総距離、平均速度及び消費エネルギーが表示されます。

7. 歩行・走行管理の実例

多摩川辺を走りながら、このようなデータを集積しているうちに、おかしな事が起こりました。図7の測定開始後50分から70分にかけての領域をご覧ください。上段の図の加速度は切れ目なく歩行を続けているのに、中段の図の速度が0になっている箇所が散見されます。歩いている筈の領域で歩いていないと判定されたのです。

歩いていないと判定された領域の波形と周波数スペクトルを図8に示します。上段の垂直方向の加速度波形をみると連続する2つの山の形が異なっていて、同じ形状の山は一つおきに出現しています。これは左右の歩行が大きく異なり、アンバランスがある事を示しています。その右側のスペクトルを見ると、図2とは異なり、波形の形状を反映して、左から3番目のピークが大きくなっています。すなわち、奇数次のハー

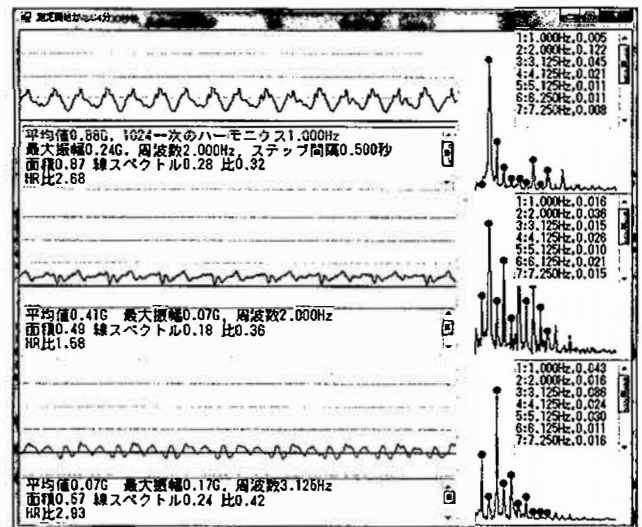


図8 左右のバランスが悪くハーモニクス比が小さいデータの例

モニクスの振幅が大きくなっています。この結果ハーモニク比が2.68と小さくなり、ハーモニクス比3.0以上という歩行・走行の識別条件を満たさなくなった訳です。

急に走る頻度が多くなったので、走る前から残っていた筋肉痛が、走っている間に痛くなり、ギブアップしての歩行でした。本人が思っていたよりもアンバランスは大きかった様です。

このように、毎日の走行・歩行をモニターして管理する事にも応用できそうです。

8. 一步一步を大切にバージョン

歩行・走行評価装置の FFT 版は、歩行・走行管理

のツールとしてならば、歩行・走行の問題点発生箇所がすぐに識別でき大層便利です。一方、歩いている、或いは走っているのに、そうでないと判定される領域が存在する事は、歩行・走行距離や、速度、消費エネルギーを知る為のツールとしては困ります。

元々、周波数スペクトルの縞構造の有無で歩行・走行の識別し、これに対応したハーモニック比を使用していましたが、歩行・走行であってもハーモニック比が小さくなる場合があると、他の方法を探す事が必要になります。

また同じ頃、8秒間も歩行が安定しない高齢者や小さな子どもの歩数をカウントしたいという要望を頂きました。

歩行が8秒間も安定しないという事であれば、解析する範囲を短くする必要があります。一步一步を大切に検出しようと、時間範囲を左右の1歩(1ストライド)を検出するのに必要な程度に短くする事を考えました。そして、ハーモニック比に代わる方法として、垂直・前後方向の加速度の最大ピークを求め、その周波数の1/2の周波数に左右方向の大きなピークがあれば、歩行・走行運動と判断できるのでは無いかと考えました。このやり方だと、例えば歩行が不安定であっても、1ストライドがあれば検出する事ができます。3軸加速度センサーならではの方法です。歩数の数えそこないは随分減るでしょう。

しかし、これを実現するには困った問題が一つだけあります。FFTは高速に周波数解析ができる素晴らしい方法ですが、高速にする為のアルゴリズム上、データ点の個数によって周波数分解能がきまってしまうのです。我々は高々4Hzまでの情報が詳しく欲しいのに、FFTは64Hzまでの情報を1Hz毎にくれるのです。

解決方法は、実は簡単でした。

周波数解析に高速化しないフーリエ変換を使用すれば良いのです。元来、フーリエ変換は様々な周波数の正弦波を持ってきて、データ波形の中に対応する成分がどの程度あるかを求める方法です。

求めたい周波数範囲は明確ですし、データ数は少ないし、その上、この頃のパーソナルコンピュータは高速なので、高速化の為の工夫をしたものを使わなくても大丈夫でしょう。

解析の時間範囲を2秒と短くし、0.5Hzから5Hzまで0.1Hz毎に増加する周波数に対応する成分を求

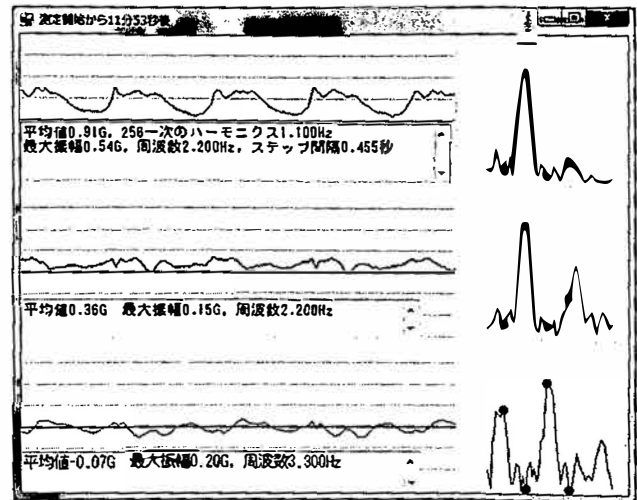


図9 高速化しないフーリエ変換による解析例

める事を考えました。周波数が0.5Hzから5Hzまで変化すると、1サイクルに必要な時間である周期は2秒から0.2秒まで変化します。各周波数の成分を求める為には、解析時間範囲はその周波数の整数倍としなければいけません。そこで、解析の時間範囲を各周波数の周期の整数倍で2秒を超えない最大のものとしました。子どもを対象とした場合は解析範囲1秒が良かったのですが、高齢者を含むと2秒必要でした。

図9が解析の例です。加速度波形の表示範囲が2秒と短くなり、周波数スペクトルの表示範囲も0.5Hzから5Hzと狭くなりました。4次までのハーモニックの成分を丸印で示しています。上段が垂直方向、中段が前後歩行、下段が左右歩行です。

垂直方向と前後方向が0.5Hz以上の同じ周波数に最大ピークを持ち、左右方向はその1/2の周波数にピークを持つ場合に歩行としました。図9の例では、垂直方向と前後方向は、2.2Hzに最大ピークを持ち、左右方向のスペクトルは3次のハーモニックの位置の3.3Hzに最大のピークがありますが、1次のハーモニックの位置にも大きなピークがあります。従って、歩行・走行で2次のハーモニックの周波数2.2Hz、振幅0.54gとなります。このような解析により、冒頭にお見せした図1の結果が得られました。

皆さんも、使ってみませんか？

9. 終わりに

私自身、この装置と共に“発達”して、この研究を始める前とは、随分違う風景を見る事ができるようになりました。また、子どもの歩行・走行挙動やその発

達の追跡にもこの方法は有効と思います。データ例をまた別の機会に紹介したいと思います。

また、本稿ではフーリエ変換や周波数解析そのもの

については触れていません。これらに関しても、別の機会にご説明したいと思います。