

第9回 加速度の計測

今回の実習では、加速度センサを用いた加速度計測を行う。加速度センサは近年非常に開発が進んだセンサのひとつである。加速度は物体が運動した際に生じる慣性力をひずみや抵抗の変化に変えて計測することが多い。

9.1 概要

今回の実習では以下のことを中心に学ぶ。

- 加速度と慣性系
- 身体加速度の応用範囲
- 加速度のキャリブレーション方法

9.1.1 目的

静的な問題を考えるのではなく、動的な問題をここでは考えるが、物体に力が働き、物体が動くところには加速度が働いている。このとき働いた加速度を知ることによってどのような力が作用したのか、またどのような運動を物体が行ったのかを推定できる。

今回はこの運動物体に生じた加速度を加速度センサを用いて計測し、その加速度の使い道をさぐる。

9.2 加速度センサの原理

加速度センサは文字通り、「加速度」を計測するためのセンサである。加速度といってもピンとこないかもしれないが、物体が動くためには力が必要であり、物体に作用した力に比例した加速度が生じるというのは、ニュートンの運動の法則のひとつである。この加速度を計測するためのセンサが加速度センサである。簡単に原理を説明しておきたいと思う。

電車に立って乗っていると走り始めたときには後ろに倒れそうになり、止まろうとしたときには進行方向に倒れそうになる。この原理を使っている(図 9.1)。すなわち重りのついた物体が加速度を受けるとそれを支える柱は変形を起こす。変形量は微小だが加速度に比例することが分かっている。そこでこの変形量を電気信号に変えて加速度として観測するわけである。したがって、実際には加速度そのものを計測するわけではなく、加速度が生じた際に物体に起こる変形や、電気的变化を計測しこれに比例している範囲内で加速度を計測している。この計測する原理によっていくつかの種類と計測の得手不得手がある。

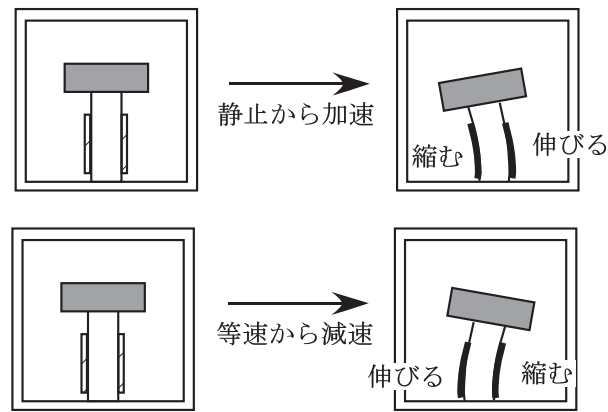


図 9.1: 加速度センサの原理

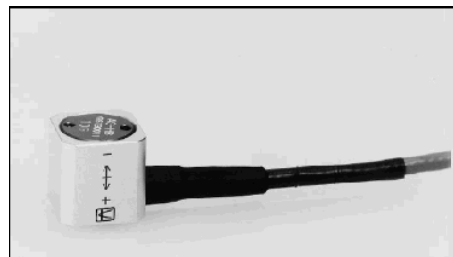


図 9.2: ひずみゲージ型加速度センサ

9.2.1 加速度センサの種類

加速度センサにはその計測原理によっていくつかの種類がある。以下に代表的な加速度センサを紹介しておく。

- ひずみゲージ型加速度センサ
- ピエゾ抵抗型加速度センサ
- 圧電型加速度センサ

9.3 計測の手順

9.3.1 準備するもの

加速度計測には以下のようなハードウェアを準備する。

1. 加速度センサ
2. (必要であれば) アンプ
3. (その場で信号を観察するのであれば) オシロスコープ
4. (PC にデータを記録するのであれば) PC
5. (PC にデータを記録するのであれば) A/D 変換器



図 9.3: 圧電型加速度センサ

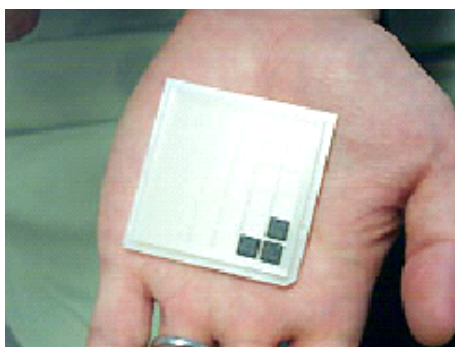


図 9.4: ピエゾ抵抗型加速度センサ：IC 型



図 9.5: 3 軸加速度センサ (ASM302) (株) スター精密社製

6. テーピング

7. キャリブレーション用の治具・水準器

9.3.2 ここで使用する加速度センサ

今回使用するのは、(株) スター精密社製の piezo 抵抗型加速度センサ (ASM302) である。3 軸加速度センサ、ASM302(以下、加速度センサ) は文字通り 3 軸、すなわち X,Y,Z の 3 つの軸についての加速度を計測可能である。3 軸とは通常、右手の法則にしたがって X(親指), Y(人差し指), Z(中指) の 3 つの軸のことをいう。そして計測できる加速度の範囲であるが、 $\pm 2G$ となっている。1G とは重力加速度に相当するため、これを SI 単位系で表せば、 $19.6m/s^2$ となる。X 軸を左右、Y 軸を前後、Z 軸を上下のそれぞれの軸に一致するようにおけば、Z 軸には常に重力加速度の $1G(9.8m/s^2)$ が加かることになる、X 軸・Y 軸の残りの軸には加速度が検出されないことになる。

9.3.3 動加速度と静加速度

さて加速度計測で一つ気をつけておかなければならないことがある。それは動加速度と静加速度の違いである。動加速度は動いている際の加速度、といった意味合いで用いられるが、静加速度はこれとは逆に動いていないときの加速度の意味である。動いていないときに加速度が生じるのかといぶかしむかもしれないが、重力加速度のことをさしている。重力は地球上にあるものにはおよそ、 $9.8m/s^2$ の大きさで作用している。手に持ったボールを離すと落下していくことでも重力が作用していることは分かるだろう。

加速度センサのなかには、この重力加速度を計測できるものと、重力加速度を計測できないものの 2 通りがある。重力加速度が計測できるということは動かない場合 (つまり直感的には加速していない状態) であっても、重力の加速度を計測できることから、物体がどのような姿勢にあるのかを知ることも可能である。姿勢センサなどと呼ばれて売られているセンサの類はこうした静的加速度を計測しているものが多い。またこの静的加速度のことを、加速度の **DC 成分** と呼ぶこともある (すなわち周波数でいえば 0Hz の成分)。周波数成分で直流成分を計測できるという意味である。これに対して、動的加速度とはまさに動いているときの加速度をさす。これを **AC 成分** と呼ぶこともある。ここでは DC 成分も計測可能な加速度センサ,ASM302 を用いる。

9.4 NI ELVIS を使った 3 軸加速度計測

9.4.1 加速度センサの接続

加速度センサは、小さなユニバーサル基板とよばれる基板に装着済みである。ケーブルを通してある穴を手前側に見てもらうと、左右方向に X 軸、前後方向に Y 軸、上下方向に Z 軸が配置され

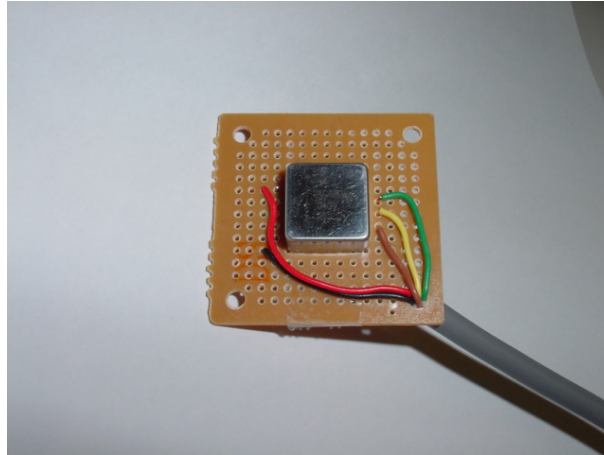


図 9.6: スター精密製加速度センサ, 基板実装済み

ることがわかる。

9.4.2 NI ELVIS 基板上の配線

今回は、加速度の信号を PC にとりこむために、日本ナショナルインスツルメンツ社の製品、NI ELVIS を用いる。NI ELVIS の基板上で配線を行う。以下の手順にそってジャンパーワイヤを接続してほしい。

加速度センサ出力の配線 加速度センサからの出力は、X(茶),Y(黄),Z(緑) の色となっている。これを端子台の手前から数えて 3 番目、4 番目、5 番目の各端子に接続する。端子台はねじ込み式になっているので、マイナスドライバーでねじを締めこむ要領でケーブルを固定する。

加速度センサ電源・GND の配線 加速度センサに供給するための電源ラインは赤、GND ラインは黒のケーブルである。これを端子台の手前側を電源、2 番目を GND として端子台に接続する

端子台の配置 基板向かって左側の基板上にまず、6pin 端子台を挿し込む。6pin が縦一列になるように挿し込むこと

端子台と NI ELVIS の配線 端子台と NI ELVIS とを接続する。以下の組み合わせで接続を行う。

1. 端子台 GND(手前から 2 番目)←→Oscilloscope CH A-
2. 端子台 X 軸加速度(手前から 3 番目)←→Oscilloscope CH A+
3. 端子台 Y 軸加速度(手前から 4 番目) 配線しない
4. 端子台 Z 軸加速度(手前から 5 番目)←→Oscilloscope CH B+
5. Oscilloscope CH A-と CH B-をワイヤで配線する。

9.4.3 Oscilloscope で確認

ここまで配線できたら、信号がとれているかどうかだけを確認しよう。NI ELVIS を起動して Oscilloscope のパネルを開こう。

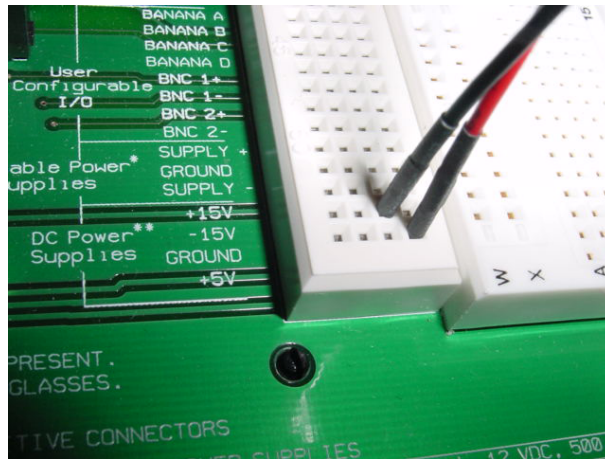


図 9.7: 加速度センサ電源および GND の接続

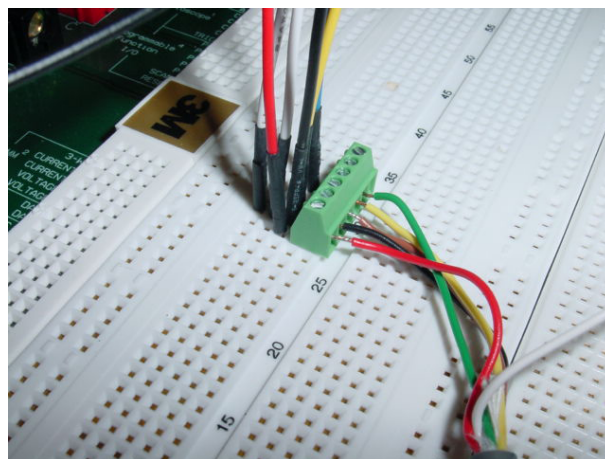


図 9.8: 加速度センサにつながる端子台

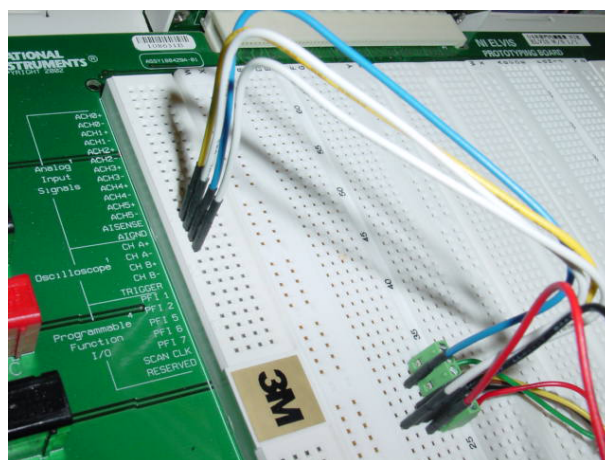


図 9.9: 加速度センサ出力をオシロスコープ入力に接続

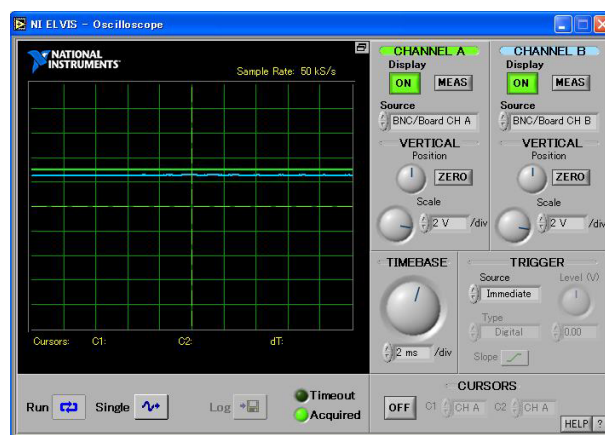


図 9.10: オシロスコープで加速度を観察する

表 9.1: 較正值記録表

	$-1G(-9.8m/s^2)$	$0G(-9.8m/s^2)$	$+1G(-9.8m/s^2)$
X 軸			
Y 軸			
Z 軸			

加速度センサの装着された基板を少し動かしてみよう。あまり激しく動かすと計測が出来ないので、X 軸の方向 (左右) と Z 軸の方向 (上下) 方向に少し動かしてみて Oscilloscope で波形の観測が出来るかどうかを確認しよう。

9.4.4 加速度の較正 (Calibration)

ここで、計測している加速度の X 軸と Z 軸では動かしていないときの加速度の値に違いがあることに気がついたであろうか？これが静加速度とよばれる重力加速度成分に相当する。配線のせいで加速度センサが載っている基板を水平に保つことは難しいが、ためしに X 軸を重力方向に向けてみよう。すなわち X 軸が上下方向に向くように調節してみると、静止しているときの基線が動くことが確認できるだろう。このとき重力の影響を受けない X 軸が水平のときと X 軸が重力方向と完全に一致したときとの出力差が、ちょうど $1G(=9.8m/s^2)$ ということになる。そこで、この重力分の値が分かっているならば、得られた電圧値から加速度の大きさがわかる。重力と並行に軸が配置されれば、その軸には重力加速度である $\pm 1G(9.8m/s^2)$ が検出され、重力軸と直角に軸が配置されればその軸には理論上は重力加速度は検出されない。

このようにして、なんらかの絶対的な値をもって得られた計測値を実際の次元のある値に変換することを、**較正 (Calibration)** と呼ぶ。計測器を用いる際には得られるデータは先述したように電圧などの値であり、それが A/D 変換された後のデジタル値がわかるだけであるから、較正を行わない限り実際の物理量は得られない。物理データの計測では較正は必須かつ重要な作業である。以下の表 9.1 に目視した電圧を書き込んでおこう。ただしこの際加速度センサの軸の矢印が重力方向 (鉛直下向き) に一致したときに、正の向きと決めておこう。

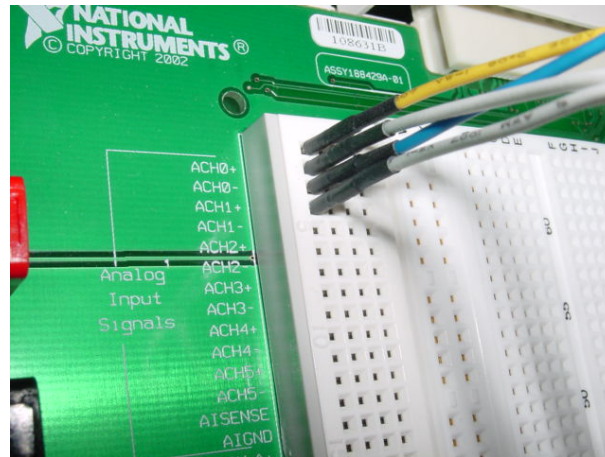


図 9.11: 加速度センサ出力をアナログ入力端子に接続

9.5 応用事例: バランス判定装置

9.5.1 バランス判定装置の仕様

ここでは次の仕様を満たすバランス判定装置をつくってみよう。

1. 加速度センサをおなかの前で保持して
2. 10 秒間目をつぶり
3. 前後・左右の加速度の変化を計測
4. 前後・左右の加速度振幅でバランス能力を評価
5. あまりにバランスの悪い人には警告ランプがつく

上の仕様を満たすためには、前後・左右 2 チャンネルのデータを 10 秒間、適当なサンプリング周波数 (1ch あたり 1 秒間に何個のデータを取得するか) で計測し、そのデータから加速度の振幅 (最大値と最小値との差) を求めなければならない。

ここではサンプリング周波数を 100Hz としよう。一秒間に各チャンネルで 100 個のデータをとる。10 秒間では 1000 個のデータを取得する。これが 2 チャンネル分あるので合計で 2000 個のデータを計測することにしよう。

9.5.2 配線の変更

端子台と NI ELVIS の配線 端子台と NI ELVIS とを接続する。以下の組み合わせで接続を行う。

1. 端子台 X 軸加速度 (手前から 3 番目) $\longleftrightarrow$ Analog Input Signals/ACH0+
2. 端子台 GND (手前から 2 番目) $\longleftrightarrow$ Analog Input Signals/ACH0-
3. 端子台 Z 軸加速度 (手前から 5 番目) $\longleftrightarrow$ Analog Input Signals/ACH1+
4. 端子台 GND (手前から 2 番目) $\longleftrightarrow$ Analog Input Signals/ACH1-

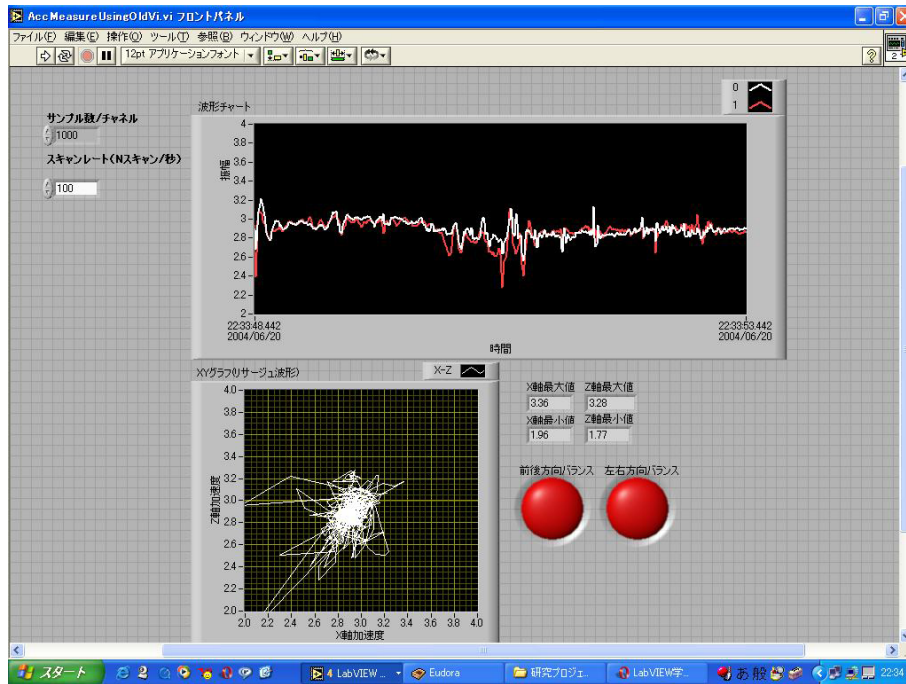


図 9.12: BalanceTest.vi のフロントパネル

9.5.3 BalanceTest.vi をダウンロードする

さて、一旦配線したケーブルをはずして、次はバランス能力計測のための Vi を用いて加速度を計測してみよう。Vi の名前は、BalanceTest.vi である。以下の URL からダウンロードしてほしい。

BalanceTest.vi <http://www.sfc.keio.ac.jp/~ohgi/Lecture/2005/DataAcquisition/BalanceTest.vi>

9.5.4 BalanceTest.vi

フロントパネル

図 9.12 が BalanceTest.vi のフロントパネルである。

1. 波形グラフ 各 1
2. XY チャート 各 1
3. 数値制御器 各 2
4. 数値表示器 各 4
5. LED 表示器 各 2

ブロックダイアグラム

ブロックダイアグラムを図 9.13 に示した。ブロックダイアグラムをよく観察するとどのようなことを行っているのかが理解できる。次の流れで計測が行われている。

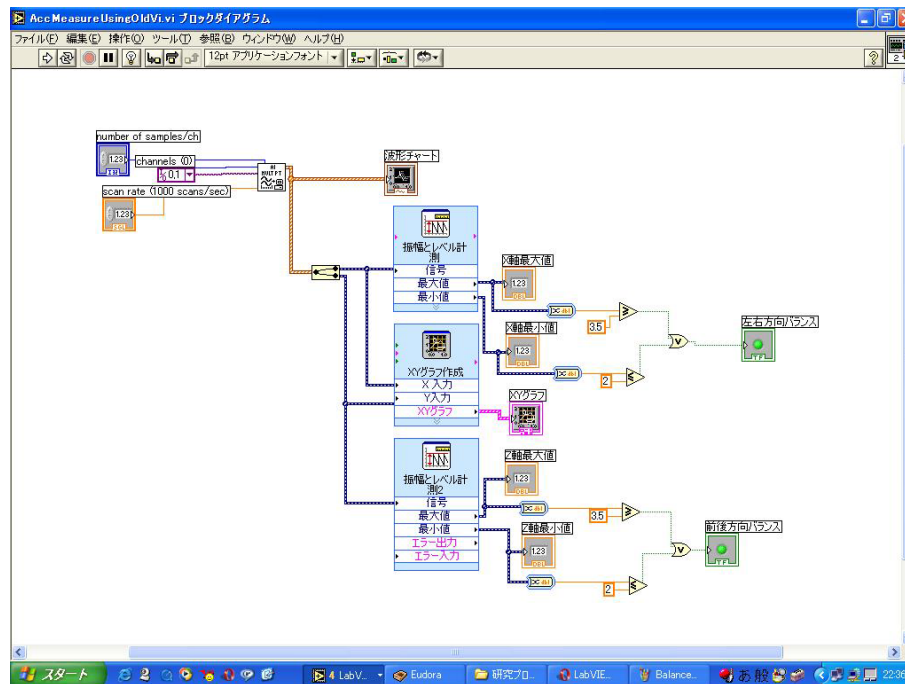


図 9.13: BalanceTest.vi のブロックダイアグラム

1. アナログデータを複数のチャンネルから複数個のデータを取り込むための Vi(AI Acquire WaveForms.vi) がプログラムのスタート地点
2. この AI Acquire Waveforms.vi に対して、デバイス番号 (1)、入力チャンネル (0,1)、サンプル数/チャンネル (1000 個)、サンプリング周波数 (100Hz) をパラメータとして設定
3. 計測データを波形チャートで表示
4. 計測データを X 軸加速度と Z 軸加速度に分割
5. X 軸、Z 軸の加速度それぞれの最大値・最小値を「振幅とレベル計測 Express Vi」を使って求める
6. 最大値・最小値がそれぞれ約 $\pm 1G$ を超えていたら (つまりバランスの悪い人には)、LED を点灯
7. XY グラフ Vi を使って、横軸に X 軸加速度、縦軸に Z 軸加速度をとって表示する。

横軸に X 軸加速度をとり、縦軸に Y 軸加速度をとる、すると時間軸がなくなり X 軸と Y 軸の加速度の関係が明らかになる。もしも X 軸の波形と Y 軸の波形に時間的な遅れ (位相差) がなければ、この図形は 45 度の傾きを持つ図形となるが、2 つの入力波形に大きさと時間的ずれがあるとこれは楕円をしめす。この図形のことを **リサージュ** と呼ぶ。この場合の図 9.13 は、横軸が左右方向の加速度、縦軸が前後方向の加速度である。どの方向によろめいていたのか、おおよその予想ができるはずだ。

加速度ではないが、床反力計 (フォースプレート) によってこのようなバランスを評価するものは臨床医学の分野で使われている。眼をつぶって立つことでどのようなふらつきを見せるかで、正常者かパーキンソン病 (脳の疾患) の患者か、あるいは患者の予備群かを判定する材料にするものはすでに世に出回っている。

9.6 結果

移動する、運動する物体に装着した加速度センサから出力される加速度信号には、重力成分、並進加速度成分、回転運動の成分 (遠心加速度成分、接線加速度成分) の 4 つの信号が混在している。これらを分離することは 1 つだけの加速度センサの信号からだけでは無理であることが理論的に分かっている。そこで姿勢を計測するためのカメラや方位センサ、さらには回転成分を直接計測するジャイロセンサなどを併用する必要がある。つまり、得られる加速度の扱いには若干の注意が必要である。

9.7 分析方法

加速度を取り扱うには若干の注意が必要と述べたが、移動体の加速度計測は次のような場合には有効であろう。

- 振動の計測 (自動車や電車、自転車、バイクなどの振動特性、プロペラやモータの動特性)
- 衝撃加速度の計測 (ランニング時や、バット・ゴルフクラブの打撃)
- 姿勢変化の推定 (ヒトの日常活動計測) や歩数の計測

以下の URL には、ヒトが歩行したときの腰部加速度が記録されているデータがおいてある。

キャリブレーションデータ <http://www.sfc.keio.ac.jp/~ohgi/Lecture/2006/MathS/OhgiWalkingCal.TXT>

歩行時の 3 軸加速度 <http://www.sfc.keio.ac.jp/~ohgi/Lecture/2006/MathS/OhgiWalkingRaw.TXT>

以下の問題に各自で挑戦してみよ。

- 垂直方向の加速度センサ情報から歩数をカウントするにはどのような処理を行えばよいか、考えよ。
- 被験者が横たわったか、それとも立っているのか、前かがみになってお辞儀をしているのか、を判定するにはどのように処理すればよいか？それぞれのセンサ信号の波形を予測せよ。

9.8 加速度計測の応用

今回は加速度センサを使って簡単な運動計測を行ってみた。運動計測には最初に述べたように様々なセンサを用いることが出来る。最後にスポーツや運動において運動計測を行った例を仰木の研究のなかから紹介しておきたい。

9.8.1 ゴルフスイング技能評価アプリケーション

非常に小さく、しかも対衝撃加速度の性能が高い加速度センサがでてきたおかげで、ゴルフスイングの際のクラブに装着しても壊れないものが実現できるようになった。腰、手首、ゴルフクラブヘッドの 3 箇所に 3 軸加速度センサ (合計 9ch) を装着し、スイングの際の動きを計測した。同時に横方向から映像を同時記録し動きの様子と加速度の比較が行えることでゴルファーの癖や弱点を明らかにすることが可能である。

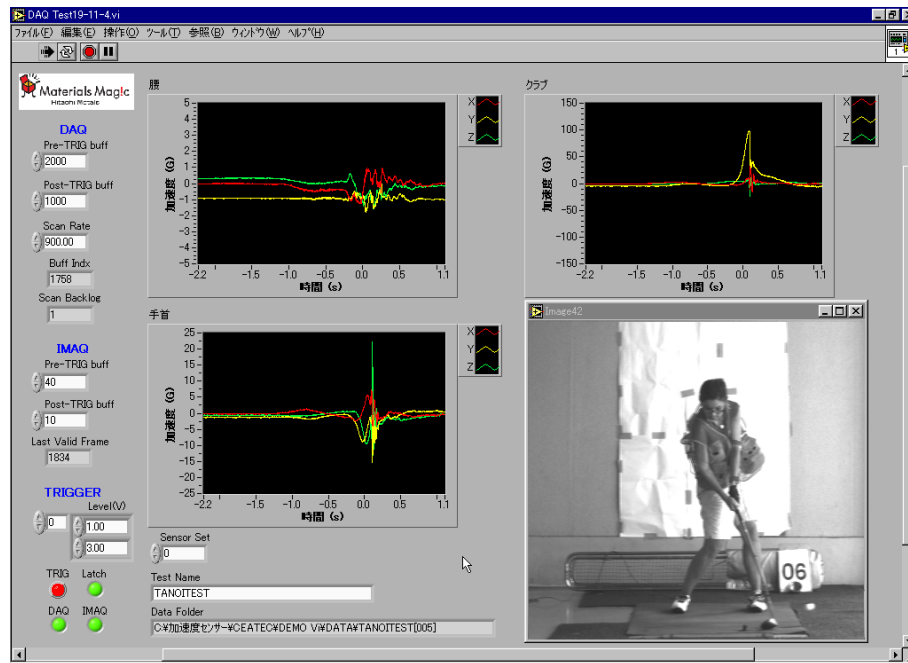


図 9.14: 3 軸加速度センサと映像の同時記録によるゴルファーのスイング診断アプリケーション

9.8.2 水泳用 3 軸加速度センサ内蔵データロガー

加速度センサでは、様々な加速度 (並進・重力・遠心・接線加速度) が計測されるが、これらを分解することは 1 つの加速度センサでは出来ない。しかしジャイロセンサを用いると角速度を計測することができるために、物体の回転の様子を捉えることが可能である。これを利用して防水仕様でマイコン制御の水泳選手用の加速度・角速度計測装置を開発した。これを用いることで水中カメラをもってしても困難であったスイマーの水中ストロークの様子を観察できるようになった。

9.9 メモ欄

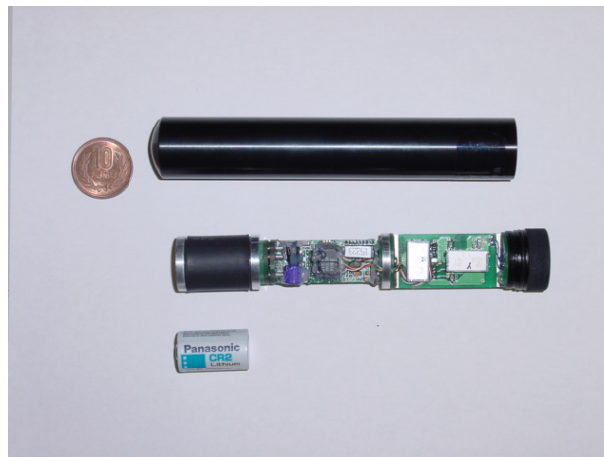


図 9.15: 水泳用 3 軸加速度センサ・3 軸ジャイロセンサ内蔵データロガー

参考文献

- [1] 画像理解－3次元認識の数理－. 森北出版, 1990.
- [2] Y.I. Abdel-Aziz and H.M. Karara. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry*, pp. 1–18. American Society of Photogrammetry, Falls Church, 1971.
- [3] Kingston Bernard, 足立和隆訳. よくわかる筋の機能解剖. メディカルサイエンス・インターナショナル, 2000.
- [4] Thompson Floyd, 中村千秋, 竹内真希. 身体運動の機能解剖 (Manual of Structural Kinesiology). 医道の日本社, 1997.
- [5] F. Gazzani. A new algorithm for calibrating stereophotogrammetric systems devoted to motion analysis. *Human Movement Science*, 1993.
- [6] 八田秀雄. 乳酸を活かしたスポーツトレーニング. 講談社, 2001.
- [7] 八田秀雄. エネルギー代謝を活かしたスポーツトレーニング. 講談社, 2004.
- [8] 八田秀雄. 乳酸. 講談社, 2007.
- [9] H. Hatze. High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified dlt-approach. *J. Biomechanics*, 1988.
- [10] G.T. Marzan and H.M. Karara. A computer program for direct linear transformation solution of the collinearity, and some application of it. *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetric Systems*, pp. 420–476, 1975.
- [11] 金子公宥, 福永哲夫 (編). バイオメカニクス, 身体運動の科学的基礎. 杏林書院, 2004.
- [12] 吉福康郎, 池上康男. 格闘技における打の動作. *Japanese Journal of Sports Science*, Vol. 3, No. 3, pp. 188–198, 1984.
- [13] 伊藤朗 (編). 図説 運動生化学入門. 医歯薬出版, 1987.