

テーマ 2：加速度センシングとデータ補正

担当 勝間 亮（なかもず B8-207 号室）

katsuma@omu.ac.jp

1 目的

三軸加速度センサはゲーム機やスマートフォンなどに組み込まれ、様々な動きの検出や移動距離の測定などを行うことで、各種サービスの提供・品質向上に役立っている。しかし、加速度センサの取得する値の誤差は非常に大きく、適切な補正をかけなければいけないが、使用機器、動き方、動かす人の癖など様々な要因によって最適な補正值は変わってくる。そこで、本実験では三軸加速度センサを搭載した機器（スマートフォン）を人間が手に持って動かしたとき、その移動距離をできるだけ正確に測定することを主な目的とし、できるだけ正確な補正值の調査を行う。

2 距離測定に関する解説と課題

2.1 センサ値の取得

三軸加速度センサは図 1 で示す x 軸、 y 軸、 z 軸の各成分の加速度をセンシングする。例えば、図 1 の x 軸と並行な方向に移動させる（加速度を与える）と x 軸方向の成分の数値のみが変化することになる。一般的には、スマートフォンを移動させるときは x 軸、 y 軸、 z 軸の成分すべてが加速度を検出することが多い。ただし、地球上では重力が働いているため、重力加速度も常に検出し続けることに注意しなければならない。

また、後ほど取り上げる重要な事項として、加速度の値は常に微細なブレを含んでいる。人間がスマートフォンを手に持つと、手の揺れも加わってかなりの誤差を含むことになる。

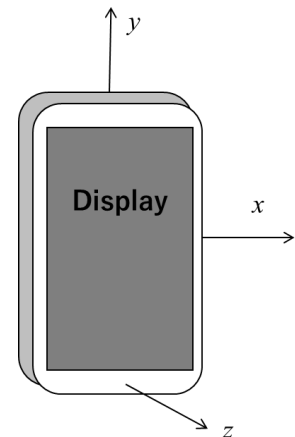


図 1: スマートフォン座標系

2.2 一つの軸のみを対象とした移動距離の測定

いま、静止状態から x 軸と並行な方向にスマートフォンを移動させ、再び静止させたと仮定する。このとき、 x 軸成分の加速度のみが検出されるため、その移動距離は単純な二重積分により求めることができる。まず、各時刻で加速度センサが検出した x 軸成分の加速度が表 1 のようになったとする。ここでは、サンプリング周期は 0.2 秒と仮定している。実際のサンプリング周期は一般的なアプリでもこれより短い、説明のために簡単化している。

表 1: センサが取得した加速度値の例

| 時刻[s] | 加速度[m/s ²] |
|-------|------------------------|
| 0 | 0 |
| 0.2 | 6 |
| 0.4 | 4 |
| 0.6 | -2 |
| 0.8 | -6 |
| 1.0 | 0 |

加速度

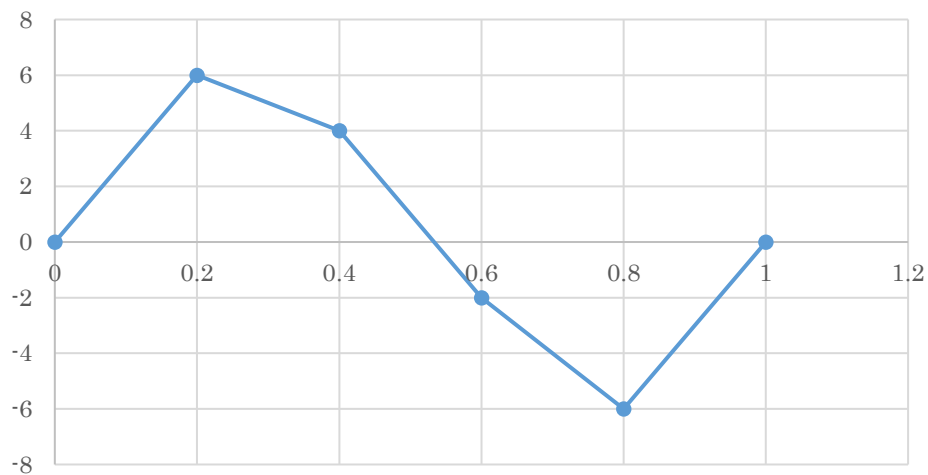


図 2: 時間経過による加速度値の変化を表すグラフ（横軸：時間，縦軸：加速度）

サンプリング周期が 0.2 秒であるため，例えばデータ取得開始時から 0.1 秒後の加速度の値は不明であり，その近傍の 0 秒時点と 0.2 秒時点の値から推測するしかない．そこで簡易な方式として，サンプリングが行われた点を直線で結ぶ台形補正を紹介する．台形補正によりグラフ化したものが図 2 である．このグラフより， n 回目のサンプリング ($n \geq 1$) の時点での速さは， n 回目のサンプリングでの加速度の値 a_n とサンプリング周期 I を用いて以下の式で表される．ただし便宜上，時刻 0 のときを 0 回目のサンプリングとし， $a_0=0$ とする．

$$\sum_{k=1}^n \frac{(a_{k-1} + a_k)I}{2}$$

例えば図 2 において 0.6 秒時点での速さを求めたい場合は，次の式で表される．

$$(0+6) \times 0.2 \div 2 + (6+4) \times 0.2 \div 2 + (4+(-2)) \times 0.2 \div 2 = 1.8 [\text{m/s}]$$

最初の項は 0 秒から 0.2 秒までの積分を表しており，三角形の面積の公式と同等であるが，ここでは台形の面積の公式の形で記述している．次の項は 0.2 秒から 0.4 秒までの積分を表しており，台形の面積の公式と同等である．以降，同様にして台形の面積を足し続けていくことで，各時刻の速度を求めることができる．各時刻について速度を求め，表 2 にまとめる．

表 2: 各時刻における算出された速度

| 時刻[s] | 加速度[m/s ²] | 速度[m/s] |
|-------|------------------------|---------|
| 0 | 0 | 0 |
| 0.2 | 6 | 0.6 |
| 0.4 | 4 | 1.6 |
| 0.6 | -2 | 1.8 |
| 0.8 | -6 | 1.0 |
| 1.0 | 0 | 0.4 |

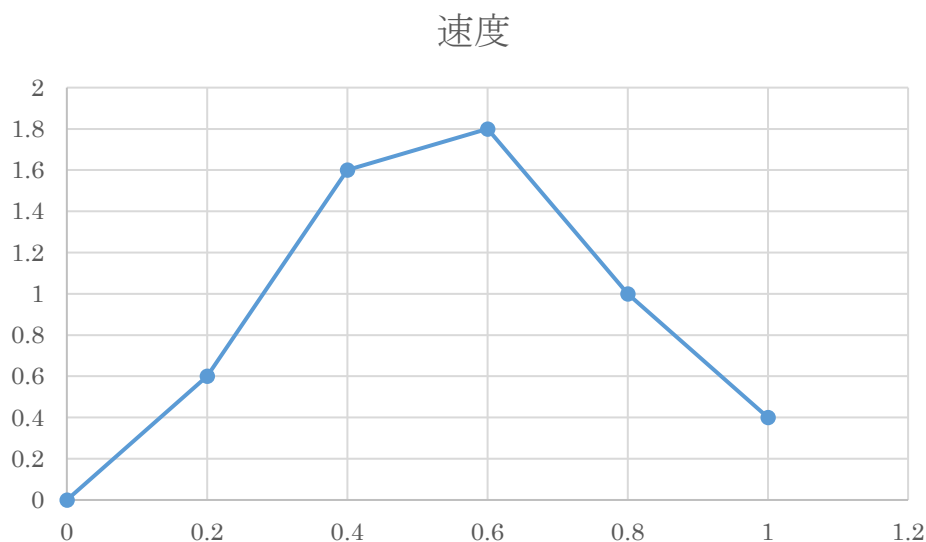


図 3: 時間経過による速度値の変化を表すグラフ（横軸：時間，縦軸：速度）

各時刻における速度を図 3 に示す．この例では静止状態からスマートフォンを移動させ，静止状態にしたにも関わらず，時刻 1[s]の時点で最終的な速度が 0 になっていないことが分かる．一般的に，サンプリング周期が十分に短くないことや，加速度値の誤差が原因となり，移動終了時の速度が 0 になることはまずないのが現状の加速度センサの性能である．

各時刻の速度から， n 回目($n \geq 1$)のサンプリング時刻での速度を v_n としたとき，以下の式で移動距離を求めることができる．ただし， $v_0=0$ とする．

$$\sum_{k=1}^n \frac{(v_{k-1} + v_k)I}{2}$$

各時刻について移動距離を求め，表 3 にまとめる．

表 3: 各時刻における算出された総移動距離

| 時刻[s] | 加速度[m/s ²] | 速度[m/s] | 総移動距離[m] |
|-------|------------------------|---------|----------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.2 | 6 | 0.6 | 0.06 |
| 0.4 | 4 | 1.6 | 0.28 |
| 0.6 | -2 | 1.8 | 0.62 |
| 0.8 | -6 | 1.0 | 0.9 |
| 1.0 | 0 | 0.4 | 1.04 |

2.3 ローパスフィルタ

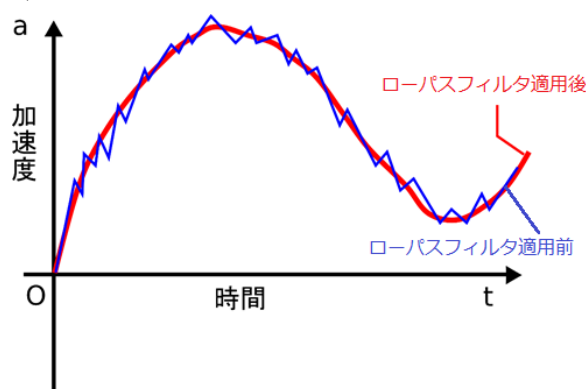


図 4: ローパスフィルタの概念図

2.2 節では，説明のためにシンプルな例を出したが，現実には加速度の値を計測すると図 4 の青色で表すグラフのようにブレが非常に大きい．この原因は様々存在するが，例えば加速度センサ自体の微細な振動が一因である．そこで，そのブレを軽減するために，ローパスフィルタを適用する必要がある．ローパスフィルタとは，データ中の高周波成分を除去し，低周波成分を抽出するフィルタのことである．ここでの高周波成分とは急激に変化する加速度値に相当し，低周波成分とはゆるやかに変化する加速度値に相当する．すなわち，微細な振動をある程度除去することができる．

ローパスフィルタにも様々な存在するが、一例として移動平均法を紹介する。n 回目のサンプリングでの加速度の値 a_n に対して以下の補正を行い、 a'_n を補正後の新たな値とする。また、 $a_0 = 0$ とする。

$$a'_n = ba_{n-1} + (1-b)a_n$$

ここで、 b の値は元のデータの影響をどれだけ弱めるかを定める係数であり、 $0 < b < 1$ の範囲で適切に決める必要がある。最適な b の値は場合によって様々に変化するため、環境に合わせて調整しなければいけない。参考程度の情報でしかないが、0.8 周辺の値が使われることが多いようである。上記で紹介した移動平均法は 2 サンプルに関するものであり、3 サンプル以上の平均を取る方式も存在する。

2.4 xyz 軸のいずれとも平行でない向きの移動に関する距離測定

スマートフォンの移動途中に回転動作がない場合、x 軸、y 軸、z 軸それぞれの成分について距離測定を行い、それらの距離を成分合成すれば実際に移動した距離を求めることができる。x 軸、y 軸、z 軸それぞれの成分の移動距離を d_x 、 d_y 、 d_z としたとき、スマートフォンの移動距離 d に関して以下の式が成り立つ。

$$d = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2}$$

2.2 節で解説したような一軸のみが反応する移動方向の場合、他の 2 軸に関する成分が 0 になる。例えば、x 軸方向と平行な移動の場合、 d_y と d_z の成分が 0 になるため、 d_x に関する移動距離がそのままスマートフォンの移動距離となる。

3 データの取得と距離測定方法

3.1 加速度データの取得について

簡単な距離測定のデータ取得方法を紹介する。ここでは、Physics toolbox sensor suite というアプリを用いて加速度の値を取得する。主な操作は以下の通りである。

- (1) Physics toolbox sensor suite を起動
- (2) 計測したいセンサを選択 (直線加速度を選択することを推奨)
- (3) 開始を押すとログ取得が始まり、停止を押すとログ取得が終わる
- (4) スマートフォンからメールで csv ファイルを送信

csv 形式でログが保存されるので、Excel 等で扱いやすい。特に直線加速度は重力の影響をあらかじめ除去して、純粋な移動に関する加速度を取得するため、本実験との相性が非常に良い。

データ取得においていくつか重要な注意点があり，以下のことは必ず守ること．詳しくは記述しないが，これらのいずれかが守られていない場合，移動距離推定が正しく行えなくなる．

- ・静止状態から加速度のログの取得を開始し，静止状態でログの取得を終了する
- ・移動途中にスマートフォンは回転させない
- ・重力加速度を除去する

3.2 加速度データの形式について

取得された加速度データは **time** (時刻)，**X_value** (x 軸方向の加速度)，**Y_value** (y 軸方向の加速度)，**Z_value** (z 軸方向の加速度) の 4 つの要素からなる．各項目の単位に関して，**time** は秒[s]，**X_value** と **Y_value** と **Z_value** はメートル毎秒二乗[m/s²] である．

| | A | B | C | D |
|---|--------|----------|----------|----------|
| 1 | time | X_value | Y_value | Z_value |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0.0335 | -0.10957 | 0.32767 | 0.792 |
| 4 | 0.0359 | 0.18756 | 0.14116 | 0.63483 |
| 5 | 0.0702 | -0.03054 | 0.18277 | -0.03922 |
| 6 | 0.1185 | 0.58723 | 0.89948 | -0.10897 |
| 7 | 0.1633 | -0.08383 | 0.09924 | 0.40401 |
| 8 | 0.1893 | -0.42736 | -0.40985 | 0.36958 |
| 9 | 0.2306 | -0.30611 | 0.07035 | 0.11107 |

図 5 加速度データの例

例えば，図 5 の加速度データではログ取得開始時は時刻 0 で，どの軸も加速度を検出していない状態から始まる．上記の通り加速度のログ取得の開始時は意図的に静止状態にしているはずであるため，直後のサンプリング時刻 0.0335 のときも静止状態を保っていると考えられるが，この時点から誤差が混入している．このときの x 軸の -0.10957，y 軸の 0.32767，z 軸の 0.792 はすべて誤差である．

実際のスマートフォンの移動開始時刻は加速度データごとに違っているが，すべての加速度データにおいて ログ取得開始時刻から最低でも 0.5 秒間は静止状態を保持することを推奨する．後に提示する課題において，必要があればこの事を利用して回答してもよい．

3.2 加速度データから移動距離を計算する基本的な方法

ここまでに色々記述してきたことをまとめると、移動距離の以下の手順で行う。

Step1. 加速度データを取得して CSV ファイルに保存

Step2. ローパスフィルタ(適切に調整する必要あり)により加速度値を補正

Step3. 補正後の加速度に対する積分により速度を算出

Step4. 速度の積分（つまり加速度の二回積分）により移動距離を算出

これにより求めた距離は、実際の移動距離とは大きく異なると思われる。そのため、加速度データに対して様々な補正を考えていく必要がある。そこで、4 章で述べる各課題を与える。

4. 課題について

4.1 計算に便利なツール

加速度データはもともと CSV 形式で取得しており、Microsoft Excel で簡単に編集や計算が可能であるため、お勧めする。Microsoft Office を導入していない人は、オンライン上で Google スプレッドシート を利用すると Excel とほぼ同等の作業が可能である。Google スプレッドシートは Google アカウントを取得するだけで無料で利用できる。使い方を検索するとたくさん情報が出てくるので、利用したい人は各自で準備すること。また、C 言語、Java、Python などデータ処理したい人はそれでも構わない。

4.2 課題内容

(課題 1) x 軸のみが反応する方向にスマートフォンを 1メートル 移動させたときの加速度データを 5 回計測せよ。ただし、スマートフォンは人が手に持って移動させること。その 5 回分のデータを加速度データ 1-1, 1-2, 1-3, 1-4, 1-5 と名付ける。これらのデータに対して、2.3 節で紹介した移動平均法 (2 サンプル) によるローパスフィルタを適用することを考える。この実験設定において 適切と思われる係数 b の値を 1 つ決定せよ。ただし、どういう観点から適切と言えるかを班で議論し、どのような議論を経て結論に至ったかを説明すること。その際には移動距離の計算方法と計算結果の詳細 (加速度データ 1-1, 1-2, 1-3, 1-4, 1-5 全部) についても述べること。

【回答すべき事項】

・決定した係数 b の値

・決定した係数 b が適切と言える理由 (班での議論を含む)

・採用した距離計算方法

(例えば、台形補正を利用した、 x 軸以外の加速度を無視した等)

・加速度データ 1-1, 1-2, 1-3, 1-4, 1-5 の距離計算結果

(課題 2) この課題は班で連携して取り組んでも良いし、あるいは個人で取り組んでも良い。

加速度データ 1-1, 1-2, 1-3, 1-4, 1-5 について、これらの生データに対して x 軸方向の移動距離を計算すると、実際に移動させた 1 メートルになることは滅多にない(ごく稀に例外があり、5 つのデータすべて移動距離の計算結果が 1 メートルとなった場合はデータを取り直すこと)。そのため生データに補正を加える必要がある。どのように補正すれば移動距離の計算結果の誤差が小さくできるかのアイデアを考えて列挙せよ。さらに、それらのアイデアうちの 1 つを選び(複数でも可)、その具体的な補正方法の詳しい説明を記述し、効果の検証と考察について記述せよ。 なお、この検証と考察においては、補正を各加速度データ 1-1, 1-2, 1-3, 1-4, 1-5 に適用して移動距離計算を行った結果をすべて記述し、その結果に対する考察を記述すること。

考えついた方法の効果が計算結果としてうまく出なかったとしても、アイデアのねらいがきちんと伝わるように記述され、計算結果の考察ができていれば、それはこの課題の回答として十分に成立する。

(参考) 補正のアイデアの一例として、最終速度を 0m/s に補正するアイデアとそのねらいを紹介する。データ取得の際には静止状態からスマートフォンを移動させた後に再び静止状態にしたにも関わらず、最終的な速度を計算したときに 0m/s になることは滅多にない。そのため、移動距離の計算結果にも誤差が生じている。最終的な速度が 0 もしくは非常に小さくなるようにデータを補正することで、データ取得終了時における計算上の速度と実際の速度を同等にできるため、誤差を軽減できる可能性が高い。

【回答すべき事項】

・補正アイデアの列挙

・選択した補正アイデアのねらい(どういうメカニズムで誤差を軽減したいのか)

・実際にどのように補正するか具体的な説明(何に対してどういう計算を行うのか)

・補正方法を加速度データ 1-1, 1-2, 1-3, 1-4, 1-5 に適用したうえでの移動距離の計算結果

・移動距離の結果に対する考察(何がよかったか、何がダメだったか等)

(課題 3) スマートフォンを手に持ち、 x 軸 y 軸 z 軸すべてが反応する方向に $d[m]$ 直線移動させる行動の加速度データ取得を 5 回実施せよ。移動方向や d の値は班で相談して決めること。実際にスマートフォンを移動させる人は班の代表 1 名が行い、その加速度データを班のメンバで共有してよい。この試行の環境は 5 回とも同一になるよう努力すること。このデータ取得環境について、他人が読んで再現可能なレベルで詳しく説明せよ。取得された 5 回分のデータを利用して移動距離 d の値を推定し、実際の移動距離との差分を示せ。課題 2 で考えた補正方法も使ってよい。ただし、5 回の試行データをどのように使って移動距離 d を推定したかについて、その方法の詳細を説明すること。さらに、班でセッティングしたデータ取得環境の良かったところや悪かったところを評価せよ。

【回答すべき事項】

・データ取得環境の詳細な記述

・移動距離 d の計算をするうえで、どの方法を用いるのかの説明（課題 2 の補正方法を使うならその旨の記述も忘れないように）

・5 回の試行データをどのように d の推定に使うかの説明

・移動距離 d の最終的な推定値

・データ取得環境の考察

5. レポートの体裁，提出に関して

4 章の課題 1，課題 2，課題 3 に対する回答を 1 つの文書ファイルで作成し，ガイダンス資料に記載の通りの期日までに授業支援システム経由で提出すること。提出ファイルは PDF(.pdf)，Microsoft Word(.doc, .docx)，テキストファイル(.txt)のいずれかにしてください。ガイダンス資料に記載されている「実験報告書の書き方」の形式である必要はなく，本実験指導書の 4.2 節にある課題内容の回答すべき事項を満足する報告書であれば良い。回答作成の過程で出現するすべてのデータ（Excel 表等）を添付する必要はなく，回答において重要なデータについて平均値，最大値，最小値などの説明に適した形で文中にて提示すればよい。