

はじめに

このアプリケーションノートには、低g 3軸加速度センサのパラメータとキャリブレーションに関する説明が記載されています。一般に、本書に記載されている手順は、個々の仕様次第では、アナログまたはデジタルの3軸加速度センサにも適用可能です。

このアプリケーションノートの [1節](#) には加速度センサに関する用語とパラメータが紹介されており、[2節](#) には加速度センサのキャリブレーション手法が示されています。

目次

1	用語	4
1.1	加速度センサのデータシート	4
1.2	定義	5
2	加速度センサのキャリブレーション	7
付録 A	最小二乗法	8
改版履歴		11

図一覧

図 1.	ハンドヘルド機器内部の加速度センサ.....	5
図 2.	ピッチの定義.....	6
図 3.	ロールの定義.....	6

1 用語

1.1 加速度センサのデータシート

最初のステップは、加速度センサの仕様書をよく読んで、各パラメータの意味を理解することです。

パラメータの理解

- **Vdd - 電源:** このパラメータによって、加速度センサが動作するDC電源が定義されます。この範囲から外れた電源電圧が使用された場合には、加速度センサの正常動作は保証されません。加速度センサメーカーから提供されるパラメータは、室温 $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ における $V_{dd} = +2.5\text{V}$ （センサにより異なる電圧を用いている場合があります）での値となります。 V_{dd} は、リップルが最小限に抑えられたきれいな電源とすることを推奨します。そのための方法のひとつは、加速度センサへの電源供給に、超低ノイズで低ドロップアウトのレギュレータを使用することです。
- **Idd - 通常モードでの消費電流:** ODRが低ければ消費電流も下がるのが一般的です。
- **ODR - 通常モードでの出力データレート:** このパラメータは、通常モードにおいて選択可能な出力データレートを示しています。
- **BW - システムバンド幅:** このパラメータによって、システムのバンド幅が定義されます。ODR = 100 Hzである場合、BWは通常、内蔵ローパスフィルタを用いて50 Hzとなります。50 Hz未満のあらゆる動きがシステムによって認識されます。システムに50 Hzを超える動きがある場合には、ODRの設定をさらに高くして、システムの有効な信号がすべて含まれるようにする必要があります。
- **Ton - ターン・オン・タイム:** このパラメータによって、加速度センサがパワーダウン・モードを抜けた後、正しい加速度データを出力可能となるまでに必要な時間が定義されます。
- **Top - 動作温度範囲:** このパラメータによって、動作温度範囲が定義されます。指定範囲内でデバイスが動作しているときに、センサの正しい動作が保証されます。
- **FS - 最大測定範囲:** 傾き検出用途では、地球の重力は $\pm 1\text{ g}$ であるため、 $\pm 2.0\text{ g}$ の範囲で十分です。それ以上の g 加速度が必要となる用途では、デバイスの最大測定範囲を広げることもできますが、感度は低下します。
- **So - 感度:** このパラメータによって、1 LSBあたりの加速度値が定義されます。
- **TCSO - 感度の温度依存性:** このパラメータによって、感度の温度依存性が定義されます。たとえば、最大測定範囲が $\pm 2.0\text{ g}$ で、感度の変化は $\pm 0.01\%/^{\circ}\text{C}$ 以内であるとします。その結果、環境温度が $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ に $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 変化した場合の感度の変化は $\pm 0.01\% \cdot 40 = \pm 0.4\%$ 以内となります。これは、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ の温度変化における感度変化が 0.996 mg/LSB から 1.004 mg/LSB の範囲であることを意味しており、感度は温度変化に対して非常に安定しています。したがって、感度の温度補正を行う必要はありません。
- **TyOff - 標準ゼロgレベルオフセット精度:** このパラメータによって、室温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ におけるゼロg精度が定義されます。たとえば、最大測定範囲を $\pm 2.0\text{ g}$ として、ゼロg精度が $\pm 20\text{ mg}$ であるということは、通常、期待される理想値から $\pm 20\text{ mg}$ の範囲でゼロg出力が変動することを意味しています。
- **TCOff - ゼロgレベルの温度依存性:** このパラメータによって、ゼロgレベルが温度変化によってどれだけの影響を受けるかが定義されます。
- **An - 加速度ノイズ密度:** このパラメータによって、加速度センサから得ることのできる有効分解能が定義されます（所望のBWを選択後）。
 1σ 分解能 = $A_n(\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}) \cdot \sqrt{\text{BW}(\text{Hz})}$. BWを高くすると有効分解能が低下します。
- **NL - 非直線性:** このパラメータによって、出力とそれに最も一致する直線との間の最大誤差が定義されます。たとえば、最大測定範囲を $\pm 2.0\text{ g}$ として、非直線性がFSの0.5%であるということは、最大誤差が $0.5\% \cdot 4000\text{ mg} = 2\text{ mg}$ であることを意味していて、この値は 0.1° に相当します。

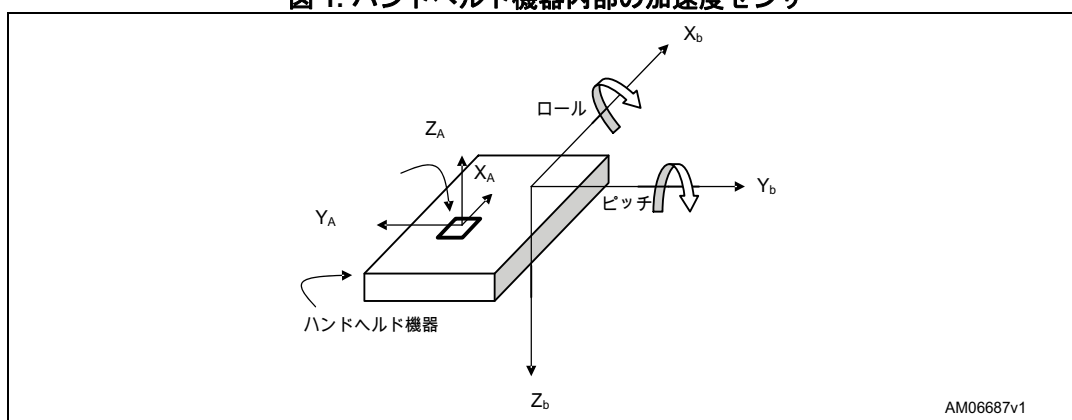
傾き測定のように、0 g状態の付近で測定する必要がある用途では、非直線性効果はごくわずかであり、無視できます。

- CrossAx - 他軸感度: 他軸感度は、パッケージ基板上でのダイ実装位置のアライメントエラーに起因します。ほとんどの用途では無視しても構いませんが、非常に高精度な傾き測定では、[2筋: 加速度センサのキャリブレーション](#)の手順に従うことによって他軸感度効果を簡単に補正できます。さらに、デバイスが最終的なアプリケーションボード上に実装された際には、加速度センサをキャリブレーションすることによって、デバイスの他軸感度と、加速度センサの検出軸とボードの軸の間の軸ずれを同時に補正できます。

1.2 定義

[図 1](#)に示すように、加速度センサが、携帯電話やPDAなどのハンドヘルド機器の中や、単純にプリント基板に取り付けられたものとします。

図 1. ハンドヘルド機器内部の加速度センサ



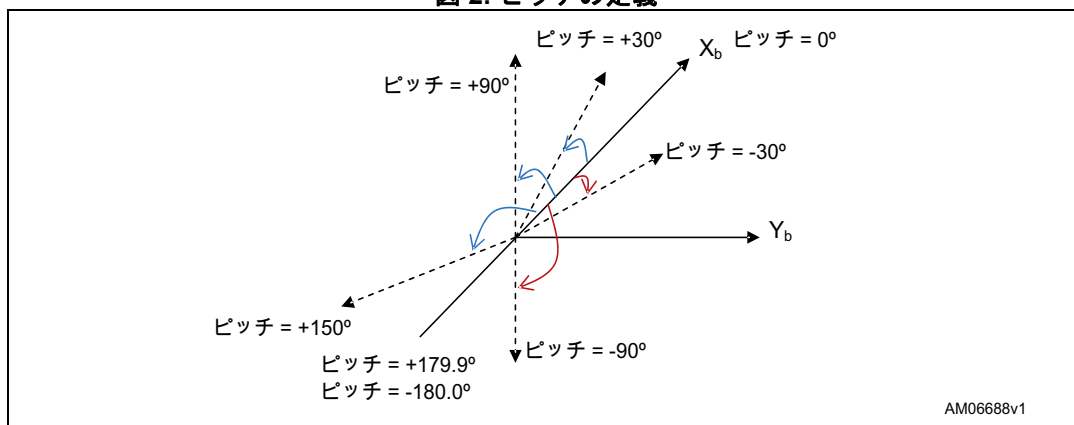
X_b と Y_b と Z_b は、ハンドヘルド機器本体の軸であり、それぞれ奥向き、右向き、下向きという構成となっています。

X_A と Y_A と Z_A は、加速度センサのそれぞれの検出軸です。検出軸を機器本体の軸と同じ方向とするには、センサ測定値の X_A と Z_A の符号を反転させる必要があることに注意してください。

ピッチ角とロール角は水平面を基準としており、この面は地球の重力に直行しています。

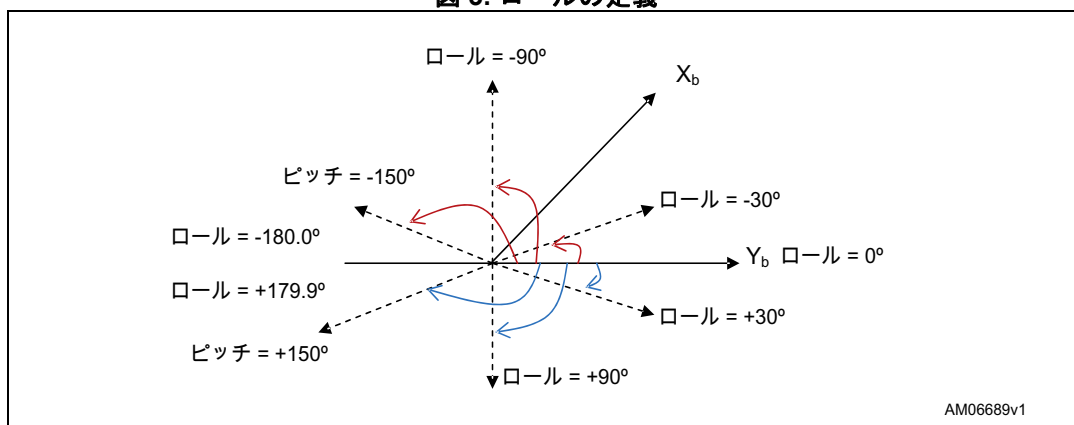
- ピッチ (α) は、 X_b 軸と水平面との間の角度として定義されます。ピッチ角の分解能が 0.1° であるとします。 Y_b 軸の周りに回転して、 X_b 軸が水平レベルから上向きに動いた後に、そのまま垂直位置 ($+90^\circ$) から水平レベルに再び戻ると、ピッチ角は 0° から $+179.9^\circ$ まで変化します。 X_b 軸が水平レベルから下向きに動いた後に、そのまま垂直位置 (-90°) から水平レベルまで再び戻ると、ピッチ角は 0° から -180° まで変化します。たとえば [図 2](#)では、 Y_b は固定されており、ピッチが 0° から $+30^\circ$ 、 $+90^\circ$ 、 $+150^\circ$ 、 $+179.9^\circ$ となるように、 X_b が正方向に回転しています。
- ロール (β) は、 Y_b 軸と水平面との間の角度として定義されます。ロール角の分解能が 0.1° であるとします。 X_b 軸の周りに回転して、 Y_b 軸が水平レベルから下向きに動いた後に、そのまま垂直位置 ($+90^\circ$) から水平レベルに再び戻ると、ロール角は 0° から $+179.9^\circ$ まで変化します。 Y_b 軸が水平レベルから上向きに動いた後に、そのまま垂直位置 (-90°) から水平レベルまで再び戻ると、ロール角は 0° から -180° まで変化します。たとえば [図 3](#)では、 X_b は固定されており、ロールが 0° から $+30^\circ$ 、 $+90^\circ$ 、 $+150^\circ$ 、 $+179.9^\circ$ となるように、 Y_b が正方向に回転しています。

図 2. ピッチの定義



AM06688v1

図 3. ロールの定義



AM06689v1

A_x と A_y と A_z は、LSB形式における加速度センサの生の測定値とします。表 1 既知の地球の重力ベクトルを基準として、6つの静止位置における生のセンサデータの符号の定義を表1に示します。たとえば、図 1において、 X_b と Y_b は水平であり、 Z_b は下向きです。したがって、 $A_x = A_y = 0$ 、 $A_z = +1 g$ となります。

表 1. 生のセンサ測定値の符号定義

静止位置	加速度センサ (符号付き整数)		
	A_x	A_y	A_z
Z_b 下向き	0	0	+1 g
Z_b 上向き	0	0	-1 g
Y_b 下向き	0	+1 g	0
Y_b 上向き	0	-1 g	0
X_b 下向き	+1 g	0	0
X_b 上向き	-1 g	0	0

2 加速度センサのキャリブレーション

1節で加速度センサのパラメータを説明しましたが、次の段階は、加速度センサのキャリブレーションです。

STの加速度センサは、工場出荷時に全数キャリブレーション済みです。画面の縦横回転検出やノートPCの開閉検出などほとんどの用途では、加速度センサの実装後のキャリブレーションは必要ありません。このことは、データシートに記載されているゼロgレベルと感度のパラメータをそのまま使用して、生の測定値 A_x 、 A_y 、 A_z を正規化測定値 A_{x1} 、 A_{y1} 、 A_{z1} に変換できることを意味しています。自動車の警告システム、傾き補正機能付き電子コンパス、水平監視システムなど、傾き測定値の精度が 1° 以下である様な用途では、加速度センサを実装後、キャリブレーションすることを推奨します。

正規化された A_{x1} 、 A_{y1} 、 A_{z1} と、加速度センサの生の測定値 A_x 、 A_y 、 A_z との関係は、以下のように表すことができます。

式 1

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A_{x1} \\ A_{y1} \\ A_{z1} \end{bmatrix} &= [A_m]_{3 \times 3} \begin{bmatrix} 1/A_SC_x & 0 & 0 \\ 0 & 1/A_SC_y & 0 \\ 0 & 0 & 1/A_SC_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x - A_OS_x \\ A_y - A_OS_y \\ A_z - A_OS_z \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} ACC_{11} & ACC_{12} & ACC_{13} \\ ACC_{21} & ACC_{22} & ACC_{23} \\ ACC_{31} & ACC_{32} & ACC_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ACC_{10} \\ ACC_{20} \\ ACC_{30} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ここで、 $[A_m]$ は加速度センサの検出軸と機器本体軸との間のずれの 3×3 行列、 A_SC_i ($i = x, y, z$)は感度 (またはスケールファクタ)、 A_OS_i はゼロgレベル (またはオフセット) です。

加速度センサをキャリブレーションする目的は、 ACC_{10} から ACC_{33} までの12個のパラメータを決定し、それによって、任意位置におけるいかなる特定の生の測定値においても、正規化された値 A_{x1} 、 A_{y1} 、 A_{z1} を求められるようにすることです。その結果は、次の式ようになります。

式 2

$$|A| = \sqrt{A_{x1}^2 + A_{y1}^2 + A_{z1}^2} = 1$$

キャリブレーションは、表 1に示す6つの静止位置で行うことができます。 A_{x1} と A_{y1} と A_{z1} が既知である位置それぞれにおいて、 $ODR = 100$ Hzで加速度センサの生データを5~10秒間収集します。次に、最小二乗法を適用して、加速度センサのキャリブレーションパラメータ12個を求めます。更なる詳細については、付録Aを参照してください。

付録 A 最小二乗法

表 1 に示す 6 つの静止位置における加速度センサのキャリブレーションについて考えてみましょう。
式 1 は次のように書き直すことができます。

式 3

$$[A_{x1} \ A_{y1} \ A_{z1}] = [A_x \ A_y \ A_z \ 1] \cdot \begin{bmatrix} ACC_{11} & ACC_{21} & ACC_{31} \\ ACC_{12} & ACC_{22} & ACC_{32} \\ ACC_{13} & ACC_{23} & ACC_{33} \\ ACC_{10} & ACC_{20} & ACC_{30} \end{bmatrix}$$

または

式 4

$$Y = w \cdot X$$

ここで、

- 行列 X は、求める必要のある 12 個のキャリブレーションパラメータ
- 行列 w は、6 つの静止位置で収集されたセンサー生データ (LBS 単位)
- 行列 Y は、既知である正規化された地球の重力ベクトル

たとえば、

- Z_b 下向き位置 (P1 位置) においては $[A_{x1} \ A_{y1} \ A_{z1}] = [0 \ 0 \ 1]$ となり、 Z_b 下向き位置において、加速度センサの生データ A_x 、 A_y 、 A_z セット (=n1) が得られたものとします。すると、

式 5

$$Y_1 = [0 \ 0 \ 1]_{n1 \times 3}$$

$$w_1 = [A_{xP1} \ A_{yP1} \ A_{zP1} \ 1]_{n1 \times 4}$$

ここで、

行列 Y_1 には、同じ列 $[0 \ 0 \ 1]$ があります。

行列 w_1 には、LBS 形式の生データが含まれています。

- Z_b 上向き位置 (P2 位置) においては $[A_{x1} \ A_{y1} \ A_{z1}] = [0 \ 0 \ -1]$ となり、 Z_b 上向き位置において、加速度センサの生データ A_x 、 A_y 、 A_z セット (=n2) が得られたものとします。すると、

式 6

$$Y_2 = [0 \ 0 \ -1]_{n2 \times 3}$$

$$w_2 = [A_{xP2} \ A_{yP2} \ A_{zP2} \ 1]_{n2 \times 4}$$

- Y_b 下向き位置 (P3 位置) においては $[A_{x1} \ A_{y1} \ A_{z1}] = [0 \ 1 \ 0]$ となり、 Y_b 下向き位置において、加速度センサの生データ A_x 、 A_y 、 A_z セット (=n3) が得られたものとします。すると、

式 7

$$Y_3 = [0 \ 1 \ 0]_{n3 \times 3}$$

$$w_3 = [A_{xP3} \ A_{yP3} \ A_{zP3} \ 1]_{n3 \times 4}$$

- Y_b 上向き位置 (P4位置) においては $[A_{x1} \ A_{y1} \ A_{z1}] = [0 \ -1 \ 0]$ となり、 Y_b 上向き位置において、加速度センサの生データ A_x 、 A_y 、 A_z セット (=n4) が得られたものとします。
すると、

式 8

$$Y_4 = [0 \ -1 \ 0]_{n4 \times 3}$$

$$W_4 = [A_{xP4} \ A_{yP4} \ A_{zP4} \ 1]_{n4 \times 4}$$

- X_b 下向き位置 (P5位置) においては $[A_{x1} \ A_{y1} \ A_{z1}] = [1 \ 0 \ 0]$ となり、 X_b 下向き位置において、加速度センサの生データ A_x 、 A_y 、 A_z セット (=n5) が得られたものとします。
すると、

式 9

$$Y_5 = [1 \ 0 \ 0]_{n5 \times 3}$$

$$W_5 = [A_{xP5} \ A_{yP5} \ A_{zP5} \ 1]_{n5 \times 4}$$

- X_b 上向き位置 (P6位置) においては $[A_{x1} \ A_{y1} \ A_{z1}] = [-1 \ 0 \ 0]$ となり、 X_b 上向き位置において、加速度センサの生データ A_x 、 A_y 、 A_z セット (=n6) が得られたものとします。
すると、

式 10

$$Y_6 = [-1 \ 0 \ 0]_{n6 \times 3}$$

$$W_6 = [A_{xP6} \ A_{yP6} \ A_{zP6} \ 1]_{n6 \times 4}$$

式 5 から 10 までを組み合わせると、 $n = n1 + n2 + n3 + n4 + n5 + n6$ とすると、式 4 は次のようになります。

式 11

$$Y_{n \times 3} = W_{n \times 4} \cdot X_{4 \times 3}$$

ここで、

式 12

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \end{bmatrix}_{n \times 3}$$

$$W = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ W_4 \\ W_5 \\ W_6 \end{bmatrix}_{n \times 4}$$

したがって、キャリブレーションパラメータ行列 X は、最小二乗法によって次のように決定されます。

式 13

$$X = [w^T \cdot w]^{-1} \cdot w^T \cdot Y$$

ここで、

式 14

w^T は転置行列を意味します。

$[w^T \cdot w]^{-1}$ は逆行列を意味します。

改版履歴

表 2. 文書改版履歴

日付	版	変更内容
2014年6月10日	1	初版発行

表 3. 日本語版文書改版履歴

日付	版	変更内容
2017年8月9日	1	日本語版 初版発行

重要なお知らせ（よくお読み下さい）

STMicroelectronics NV およびその子会社（以下、ST）は、ST製品及び本書の内容をいつでも予告なく変更、修正、改善、改定及び改良する権利を留保します。購入される方は、発注前にST製品に関する最新の関連情報を必ず入手してください。ST製品は、注文請書発行時点で有効なSTの販売条件に従って販売されます。

ST製品の選択並びに使用については購入される方が全ての責任を負うものとします。購入される方の製品上の操作や設計に関してSTは一切の責任を負いません。

明示又は黙示を問わず、STは本書においていかなる知的財産権の実施権も許諾致しません。

本書で説明されている情報とは異なる条件でST製品が再販された場合、その製品についてSTが与えたいかなる保証も無効となります。

STおよびSTロゴはSTMicroelectronicsの商標です。その他の製品またはサービスの名称は、それぞれの所有者に帰属します。

本書の情報は本書の以前のバージョンで提供された全ての情報に優先し、これに代わるものです。

この資料は、STMicroelectronics NV 並びにその子会社(以下ST)が英文で記述した資料（以下、「正規英語版資料」）を、皆様のご理解の一助として頂くためにSTマイクロエレクトロニクス㈱が英文から和文へ翻訳して作成したものです。この資料は現行の正規英語版資料の近時の更新に対応していない場合があります。この資料は、あくまでも正規英語版資料をご理解頂くための補助的参考資料のみにご利用下さい。この資料で説明される製品のご検討及びご採用にあたりましては、必ず最新の正規英語版資料を事前にご確認下さい。ST及びSTマイクロエレクトロニクス㈱は、現行の正規英語版資料の更新により製品に関する最新の情報を提供しているにも関わらず、当該英語版資料に対応した更新がなされていないこの資料の情報に基づいて発生した問題や障害などにつきましては如何なる責任も負いません。

© 2017 STMicroelectronics - All rights reserved