

画像計測を利用したスマートデバイスに内蔵される3軸加速度センサの校正

望月隆生*

Calibration of Embedded 3D Accelerometer in Smart Devices Using Vision Metrology

Takao MOCHIZUKI

本稿では、スマートデバイスに内蔵される3軸加速度センサを校正する手法を示した。本手法は、内蔵カメラを使用した画像計測から求めた姿勢と、撮影時の加速度センサの値から、補正に必要な係数を求める。実機による校正実験を行った結果、未校正では $0.131\sim 0.450\text{ m/s}^2$ であった計測誤差を $0.028\sim 0.065\text{ m/s}^2$ に低減させることに成功し、手法の有効性を確認することができた。これにより、スマートデバイスを活用した姿勢や運動の計測をより高精度で行うことが可能となる。

1. はじめに

スマートフォンやタブレット端末などのスマートデバイスは3軸加速度センサ(以下、加速度センサ)を搭載していることから、情報端末としてだけでなく、姿勢や運動の計測器として活用した例が多く報告がされている(例えば文献[1])。しかし、その一方で内蔵状態の加速度センサの精度や校正について触れている報告はほとんど見当たらない。

本稿では、まずスマートデバイスに内蔵された加速度センサの入出力特性をモデル化し、センサ値の補正に必要な係数を示す。次に係数を決定するための画像計測を利用した校正手法を提案する。最後に校正実験を行い、実際の加速度センサの入出力特性と、校正の有効性を示す。

2. 入出力特性のモデル化と補正式

加速度センサは、入力として加えられた加速度を直交する3軸に分解し、加速度ベクトルとして計測値を出力する。しかし、測定値には加速度センサの入出力特性に起因する誤差が存在し、精度を低下させている。この誤差を低減化するために、本稿では入出力特性のモデル化による補正を行う。また、測定値にはノイズによる誤差も含まれるが、これについては有効とされるローパスフィルタ^[2]の適用で対処する。

加速度センサに加えられる加速度を \mathbf{a} 、加速度センサが出力する測定値を \mathbf{d} としたとき、係数行列 \mathbf{R} とオフセットベクトル \mathbf{t} を用いて入出力特性を次のようにモデル化する。

$$\mathbf{d} = \mathbf{R}\mathbf{a} + \mathbf{t} \quad (1)$$

ここで

$$\mathbf{R} = [\mathbf{r}_x \quad \mathbf{r}_y \quad \mathbf{r}_z] \quad (2)$$

としたとき、 $\|\mathbf{r}_x\|$ 、 $\|\mathbf{r}_y\|$ 、 $\|\mathbf{r}_z\|$ は感度係数、 \mathbf{r}_x 、 \mathbf{r}_y 、 \mathbf{r}_z の互いの内積は軸の直交性、 \mathbf{t} は出力オフセットを表す。

実際に加速度センサを使用する上で必要となるのは、加速度センサの出力 \mathbf{d} を補正して真値である加速度 \mathbf{a} を得ることである。そこで補正係数 \mathbf{Q} 、 \mathbf{p} を

$$\begin{cases} \mathbf{Q} = \mathbf{R}^{-1} \\ \mathbf{p} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{t} \end{cases} \quad (3)$$

と定義した上で(1)式を

$$\mathbf{a} = \mathbf{Q}\mathbf{d} + \mathbf{p} \quad (4)$$

と変形し、これを補正式とする。

なお加速度センサの特性は補正係数から \mathbf{R} と \mathbf{t} を逆算すれば求まる。

3. 校正手法

本手法では、重力加速度を利用して加速度センサを校正する。内蔵カメラによる画像計測から求めた姿勢と撮影時の加速度センサの値から、補正に必要な係数を求める。

3.1 座標系の設定と画像計測

タブレット端末の場合、加速度センサの座標軸は図1に示したように設定され、これをセンサ座標系と呼ぶことにする。センサ座標系はタブレット端末に設定される局所的な座標系である。これに対し、

* 生産電子情報システム技術科

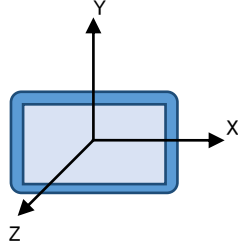


図1 タブレット端末のセンサ座標系

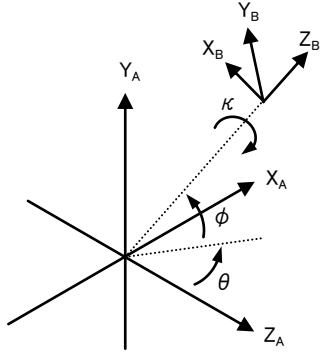


図2 座標系の姿勢

タブレット端末の外側に大域的な座標系として空間座標系を設定する。なお空間座標系のY軸は水平面に対して垂直とする。

画像計測を行うには、タブレット端末に内蔵されるカメラに座標系を設定する必要がある。これをカメラ座標系と呼ぶことにする。カメラ座標系はレンズの光軸をZ軸、撮像面をX-Y平面となるように設定する。

センサ座標系とカメラ座標系の姿勢は概ね一致するが、取り付けのずれなどにより厳密に一致している保証はない。そこで本手法では、この姿勢差についても考慮する。これについては次節で述べる。

座標系の姿勢は回転角または回転行列を用いて表現される。回転角は、図2に示した水平角 θ 、鉛直角 ϕ 、カメラ回転角 κ である。回転行列は3つの回転角による次式である。

$$M = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \dots (5)$$

カメラ座標系の姿勢計測は後方交会を用いる。後方交会は空間座標が既知の基準点を撮影し、基準点のカメラ座標と空間座標からカメラの位置と姿勢を求める画像計測である。後方交会では複数の基準点

が必要となることから、複数の基準点が配置された基準板を用意し、これを用いる。空間座標系は基準板の姿勢によって決定されるため、基準板のY軸が鉛直となるように基準板を設置することで、前述の空間座標系を設定する³⁾。

本稿では後方交会を OpenCV のライブラリを用いて行った。

3.2 補正係数の決定

重力加速度が各座標系および加速度センサにおいて、どのように計測されるかについて考える。空間座標系を基準とするカメラ座標系の姿勢を M_{wc} 、カメラ座標系を基準とするセンサ座標系の姿勢を M_{cs} 、空間座標における重力加速度ベクトルを g_w 、カメラ座標系とセンサ座標系で計測される重力加速度ベクトルをそれぞれ g_c 、 g_s とする。さらに加速度センサの出力を g_D とする。

重力加速度ベクトルの向きは空間座標系のY軸と一致するので、 g_w は

$$g_w = [0 \quad g \quad 0]^T \quad (6)$$

である。ただし g は重力加速度。

g_w は次式のように M_{wc} を用いて g_c に変換できる。

$$g_c = M_{wc} g_w \quad (7)$$

同様に g_c と g_s の関係は M_{cs} を用いて

$$g_s = M_{cs} g_c \quad (8)$$

である。(3)式より g_D と g_s の関係は

$$g_s = Q g_D + p \quad (9)$$

である。

(7)~(9)式において、未知数は、 M_{cs} 、 Q 、 p である。これは、 g_w は既知であることと、 M_{wc} は後方交会で、 g_c は(7)式で、 g_s は(8)式または(9)式でそれぞれ求めるからである。

まず M_{cs} を求める方法について述べる。加速度センサを理想特性と仮定すると(9)式は

$$g_s = g_D \quad (10)$$

となる。これを(8)式に代入すると

$$g_D = M_{cs} g_c \quad (11)$$

となるが、 M_{cs} はランク落ちにより一意でない。そこで N 枚の撮影で得た g_D と g_c を ${}^1g_D, {}^2g_D, \dots, {}^N g_D$ と ${}^1g_c, {}^2g_c, \dots, {}^N g_c$ とそれぞれ表記し

$$\begin{cases} \mathbf{G}_D = [{}^1\mathbf{g}_D & {}^2\mathbf{g}_D & \cdots & {}^N\mathbf{g}_D] \\ \mathbf{G}_C = [{}^1\mathbf{g}_C & {}^2\mathbf{g}_C & \cdots & {}^N\mathbf{g}_C] \end{cases} \quad (12)$$

とすると, (11)式は

$$\mathbf{G}_D = \mathbf{M}_{CS}\mathbf{G}_C \quad (13)$$

とすることができる. $N \geq 3$ のときランク落ちは解消され, 一般逆行列 \mathbf{G}_C^{-1} を使って(13)式を変形すると

$$\mathbf{M}_{CS} = \mathbf{G}_D\mathbf{G}_C^{-1} \quad (14)$$

となり, これより \mathbf{M}_{CS} の最小 2 乗解が得られる.

次に得られた \mathbf{M}_{CS} を用いて \mathbf{Q} と \mathbf{p} を求める方法を述べる. (9)式を次のように表現する.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{g}_S \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{p} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{g}_D \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

これに(8)式を代入すると

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{CS}\mathbf{g}_C \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{p} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{g}_D \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

である. ここで \mathbf{M}_{CS} を求めたときと同様に撮影で得た \mathbf{g}_C と \mathbf{g}_D を

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{G}}_S = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{CS}{}^1\mathbf{g}_C & \mathbf{M}_{CS}{}^2\mathbf{g}_C & \cdots & \mathbf{M}_{CS}{}^N\mathbf{g}_C \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \\ \tilde{\mathbf{G}}_D = \begin{bmatrix} {}^1\mathbf{g}_D & {}^2\mathbf{g}_D & \cdots & {}^N\mathbf{g}_D \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (17)$$

とすると(16)式は

$$\tilde{\mathbf{G}}_S = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{p} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{G}}_D \quad (18)$$

とすることができる. 一般逆行列 $\tilde{\mathbf{G}}_D^{-1}$ を用いて(18)式を変形すると

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{p} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{G}}_S\tilde{\mathbf{G}}_D^{-1} \quad (19)$$

となり, これより \mathbf{Q} と \mathbf{p} の最小 2 乗解が求まる.

以上の校正では, 画像計測で使用する基準板の Y 軸が鉛直であることを前提としていたが, 基準板を精度よく設置することは簡単ではない. そこで簡易的に設置された基準板を使用した場合についても述べておく.

基準板の姿勢が任意である場合, 後方交点は基準板で設定された座標系におけるカメラ座標系の姿勢を得るため, (7)式の \mathbf{M}_{WC} を求めるには空間座標系における基準板の姿勢が不足する. ところが基準板の姿勢を任意として(14)式で求めた \mathbf{M}_{CS} はカメラ座標系におけるセンサ座標系の姿勢と, 空間座標系における基準板の姿勢が合成された回転行列となるため,

(8)式の \mathbf{g}_S は問題なく求めることができる. したがって基準板が任意の姿勢であっても \mathbf{Q} と \mathbf{p} を得ることは可能である. しかし \mathbf{M}_{CS} は本来の定義とは異なる回転行列であるため, 文献[3]のように画像計測に加速度センサを組み込む場合は, 高精度に設置された基準板を用いて \mathbf{M}_{CS} を求めることが必要である.

4. 校正実験

4.1 実験方法

スマートデバイスは東芝製の Android タブレット REGZA AT500 を使用し, カメラ撮影と同時に加速度センサの値を記録するプログラムを作成して実験に用いた. なおプログラムには, 加速度センサのノイズを除去するために 2 次の IIR 型ローパスフィルタ (カットオフ周波数 1Hz) を実装した.

実験では, 垂直に設置した基準板を視点と姿勢を変えながら 34 枚の画像を撮影し, 補正係数を求めた. また, 静止状態における加速度センサの出力波形から信号に含まれるノイズを確認した.

4.2 実験結果

画像計測の位置計測精度を確認するために, 基準点の画像測定値と理論値との差の RMS (2 乗平均の平方根) を求めた. 結果を表 1 に示す. 次に角度計測精度を確認するために基準点の画像計測値から基

表 1 画像計測値と理論値との差の RMS

X 軸[mm]	Y 軸[mm]	Z 軸[mm]
0.026	0.032	0.016

表 2 画像計測の角度計測精度

計測角度 [deg.]	理論値との偏差 [deg.]
89.9983	-0.0017

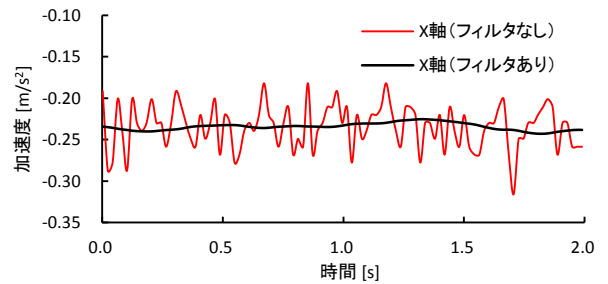


図 3 加速度センサの出力波形

表 3 静止状態のセンサ出力の標準偏差

	X 軸 [m/s ²]	Y 軸 [m/s ²]	Z 軸 [m/s ²]
フィルタなし	0.0266	0.0270	0.0241
フィルタあり	0.0060	0.0060	0.0076

表 4 カメラ座標に対するセンサ座標系の姿勢

回転角	角度 [deg.]
κ	-0.54
ϕ	-0.38
θ	-0.98

表 5 各軸の感度係数

	感度係数
X 軸	1.01
Y 軸	0.99
Z 軸	1.01

準板の角度（姿勢）を算出し、理論値との偏差を求めた。結果を表 2 に示す。それぞれ高い精度が得られていることが確認された。

静止させた加速度センサの出力波形を図 3 に X 軸を例として示す。フィルタが無い場合、静止状態でもノイズによって出力が絶えず変化していることが判る。対してフィルタがある場合、大幅にノイズが低減されていることが判る。10 秒間の静止状態の出力信号の標準偏差を各軸のノイズの大きさとして求めた結果を表 3 に示す。フィルタによりノイズが 1/4 に低減化されていることが判る。

校正から得たカメラ座標に対するセンサ座標系の姿勢を表 4 に示す。ふたつの座標系の姿勢にわずかなずれが認められた。

校正で得られた補正係数から加速度センサの入出力特性を求めた。感度係数は表 5 に示したように、それぞれの軸で 1% 程度の誤差が認められた。各軸の交差角度は表 6 に示したように、それぞれ直角に対して 0.1deg. 程度の偏差が認められた。加速度センサの出力オフセットは表 7 に示したように、最大 0.427 m/s² が認められた。

本校正手法の有効性を確認するために補正の有無による測定誤差の比較を行った。誤差を求める際の基準は、画像計測の精度が十分に高いことから、画像計測で求めた姿勢から算出した重力加速度ベクト

表 6 各軸の交差角度

	交差角度 [deg.]
X-Y 軸	89.96
X-Z 軸	90.10
Y-Z 軸	90.10

表 7 各軸の出力オフセット

	オフセット [m/s ²]
X 軸	0.151
Y 軸	-0.064
Z 軸	0.427

表 8 画像計測から求めた加速度と加速度センサで計測された加速度との差の RMS

	X 軸 [m/s ²]	Y 軸 [m/s ²]	Z 軸 [m/s ²]
補正なし	0.131	0.131	0.450
補正あり	0.028	0.025	0.065

ルを用いた。計測誤差は、加速度センサから得た値と基準との差の RMS とした。結果を表 8 示す。補正なしの場合、計測誤差は 0.131~0.450 m/s² であったが、補正を行うことで 0.028~0.065m/s² に低減し、測定精度の向上が確認できた。

5. おわりに

画像計測を利用してスマートデバイスに内蔵される加速度センサを校正する手法を提案した。本校正手法を用いることで計測精度を向上させることが可能である。ただし、加速度センサのノイズの大きさと比較すると、計測誤差は 1 桁大きな値となっていることから、計測精度を向上させる余地は残されていると考えられる。今後さらに検討を続けたい。

参考文献

- [1]長峯他「スマートデバイスの三軸加速度センサを利用した車いす走行者の疲労推定」, 人工知能学会全国大会論文集, pp. 1-4, 2015
- [2]神村他「スマートフォン搭載センサを使用した二輪車車両挙動把握システムの提案」, DICOM2012 シンポジウム, pp. 1352-1360, 2012
- [3]望月「スマートデバイスを利用した水平面を基準とする画像計測」, 東海職業能力開発大学校紀要, 第 20 号, pp. 1-6, 2013