

Калибровка трехосного акселерометра по данным ряда измерений с различной ориентацией

В.И. Капля, И.В. Савицкий, Д.А. Масников

Волгоградский государственный технический университет

Аннотация: Рассматривается задача калибровки трехосного датчика ускорений. В качестве исходных данных для калибровки используется ряд измерений, полученных с помощью датчика при его различных ориентациях в пространстве. Считается, что датчик неподвижен для каждого варианта ориентации. Данные измерений усредняются в каждом статическом положении датчика, и полученные усредненные результаты используются в качестве параметров в системе нелинейных уравнений, которые решаются методом Левенберга-Марквардта. Приводятся результаты применения предложенной в статье методики в эксперименте с реальным датчиком, что позволяет проверить ее эффективность.

Ключевые слова: трехосный акселерометр, калибровка датчика, система координат датчика, система координат гравитационного поля, поворот системы координат, матрица преобразования координат, поправочный коэффициент, среднее значение ряда измерений, среднеквадратическая ошибка, метод Левенберга-Марквардта.

Введение

Измерение скорости и ускорения является актуальной задачей для управления современным промышленным оборудованием и бытовыми приборами. Датчики, базирующиеся на микроэлектромеханических системах (МЭМС), являются современными средствами обнаружения и измерения ускорения, отклонения, ударных нагрузок одновременно в нескольких степенях свободы. МЭМС технологии позволили создать датчики в виде микросхем с интегрированной цифровой электроникой для обработки измерительной информации и связи с микропроцессорными системами управления [1-3]. Отсутствие механических элементов позволяет обладать таким датчикам стабильными параметрами и невысокой стоимостью.

Калибровка датчиков ускорения позволяет повысить точность проводимых измерений, так как МЭМС датчики имеют разброс параметров при изготовлении до 3%, не смотря на их калибровку при изготовлении [4]. Нормальная работа системы с МЭМС датчиками может быть обеспечена при

условии их периодической калибровки и запоминания значений поправочных коэффициентов в системе управления.

Условия проведения калибровки трехосных датчиков ускорения в общем случае не позволяют достаточно точно сориентировать датчик и точно измерить углы его ориентации, поэтому методика калибровки должна опираться на данные ряда измерений получаемых датчиком при его различных вариантах ориентации. Поскольку датчик постоянно находится под воздействием гравитационного поля Земли, то вариация его ориентации позволяет изменять его показания по величинам измеренных ускорений.

Процесс калибровки реализуется при неподвижном состоянии датчика. Калибровка осуществляется сразу по трем осям, так как точно сориентировать датчик в гравитационном поле относительно вертикали проблематично ввиду погрешностей его установки на носителе.

Математическая модель процесса калибровки

Исходными данными для процесса калибровки является ряд измерений, полученных с помощью акселерометра для различных углов его ориентации. Регистрация измерений выполнялась при неподвижном датчике, после занятия им очередного положения.

Изменение ориентации датчика относительно гравитационного поля Земли может быть описано с помощью матриц поворота систем координат, одна из которых связана с осями чувствительности датчика ускорения, а другая с неподвижным гравитационным полем Земли. Введем следующие обозначения:

$p_i = (p_{i,0} \ p_{i,1} \ p_{i,2})^T$ – вектор усредненных данных трехосного акселерометра для i – того варианта ориентации, где $i = 1..N_{or}$ – номер варианта ориентации датчика;

$k = (k_0 \ k_1 \ k_2)^T$ – вектор поправочных коэффициентов, определяемых в процессе калибровки датчика;

$q_i(k) = \begin{pmatrix} k_0 \cdot p_{i,0} \\ k_1 \cdot p_{i,1} \\ k_2 \cdot p_{i,2} \end{pmatrix}$ – скорректированные поправочными коэффициентами

значения усредненных показаний трехосного гироскопа для каждого варианта ориентации датчика;

$(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)^T$ – углы поворота осей чувствительности акселерометра для i – того варианта ориентации относительно осей гравитационного поля Земли.

Поворот системы координат датчика, осями которой служат оси чувствительности акселерометра, описывается известным [5,6] оператором:

$$Tc(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Получение уравнений для поправочных коэффициентов основано на том, что преобразование вектора усредненных показаний акселерометра p_i в систему координат гравитационного поля Земли должно привести к равенству вертикальной составляющей этого вектора и гравитационной постоянной 9.8 м/с^2 с точностью до знака. Значения двух других компонент вектора показаний p_i должны обратиться в ноль.

В процессе калибровки целесообразно изменять углы ориентации акселерометра на величину, близкую к 90° , поворачивая носитель датчика. Минимальное число вариаций ориентации равно 3. Система уравнений с минимальным числом уравнений в векторно-матричной форме имеет вид:

$$\begin{cases} Tc(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)^T \cdot q_0(k) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix}, \\ Tc(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)^T \cdot q_1(k) = \begin{pmatrix} 0 \\ -g \\ 0 \end{pmatrix}, \\ Tc(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)^T \cdot q_2(k) = \begin{pmatrix} g \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \end{cases} \quad (1)$$

Правые части уравнений представляют собой ортогональные вектора с вертикальной и горизонтальной ориентацией в гравитационном поле Земли, модуль которых равен гравитационной постоянной. Система уравнений (1) является нелинейной, так как содержит в качестве неизвестных, кроме поправочных коэффициентов, углы ориентации. Нахождение решений данной системы уравнений можно реализовать, например, методом Левенберга-Марквардта [7]. Следует отметить, что система (1) состоит из 9 независимых уравнений в канонической форме записи и имеет 12 неизвестных, что обусловлено неоднозначностью требуемой ориентации преобразуемых векторов в горизонтальной плоскости гравитационной системы координат. Проблема неоднозначности решается путем обнуления одного из трех углов в каждом преобразовании. Например, можно обнулить углы вращения вокруг оси z:

$$\begin{cases} \gamma_0 = 0, \\ \gamma_1 = 0, \\ \gamma_2 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) образуют математическую модель процесса калибровки трехосного акселерометра по данным серии измерений в условиях неопределенной ориентации.

Результаты эксперимента

Проверка предложенной методики калибровки трехосного акселерометра осуществлялась на калибровочном стенде, который имел в своем составе: трехосный датчик ускорений; контроллер, управляющий режимами работы датчика и получающий информацию от датчика; SD-карту, на которую осуществлялась запись результатов измерений. Период замеров был установлен равным 10 мс, длительность измерений – 10 секунд (1000 замеров по каждой оси). Пример проведенных измерений на калибровочном стенде в процессе поворотов носителя акселерометра с последующей кратковременной на 2 секунды фиксацией ориентации приведен на рис. 1.

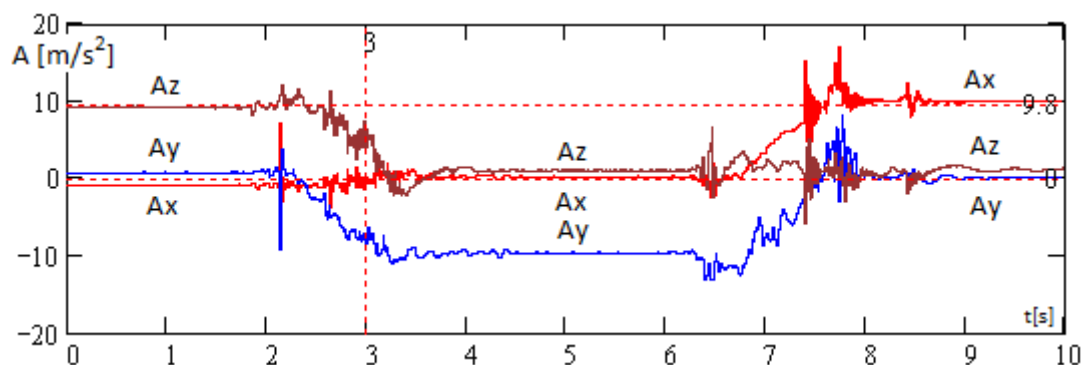


Рис.1. Результаты измерений ускорений при серии поворотов датчика на 90 градусов

Наличие шумов в выходных сигналах датчика обусловило необходимость усреднения замеров. В результате калибровочного эксперимента с МЭМС акселерометром MPU6050 [8, 9] были определены значения поправочных коэффициентов: $k = (0.971 \ 0.005 \ 1.051)^T$.

Вектор относительной погрешности акселерометра по каждой оси чувствительности имеет следующие значения: (2.9% 0.5% 5.1%).

Выводы

Приведенная методика калибровки трехосных акселерометров может использоваться для разработки систем автоматического управления [10],

содержащих подсистемы пространственной ориентации исполнительных элементов.

Литература

1. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
2. Ломакин М.А. Особенности построения модели погрешности МЭМС-датчиков при решении навигационной задачи // Инженерный вестник Дона, 2014, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2398
3. Коноплев Б.Г. , Лысенко И.Е., Шерова Е.В. Интегральный сенсор угловых скоростей и линейных ускорений // Инженерный вестник Дона, 2010, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2010/240/.
4. Maluf N., Williams K. An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering. ARTECH HOUSE, INC., 2006. 304 p.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1974. 832 с.
6. Ma D., Shiau J., Wang I. Lin Y. Attitude Determination Using a MEMS-Based Flight Information Measurement Unit. Sensors. 2012, №12, pp. 1-23.
7. Дэннис Дж., Шнабель Р. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений. М.: Мир, 1988. 440 с.
8. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4. InvenSense, 2013. 52 p.
9. MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.2. InvenSense, 2013. 46 p.
10. Капля В.И., Бойцов Е.П., Пан А.Г. Оценка динамических параметров движения пера графического манипулятора при аппроксимации траектории низкочастотными дискретными гармониками // Научное обозрение. 2015. № 10-1. С. 55-60.

References

1. Raspopov V. Y. Mikromekhanicheskie pribory [Micromechanical devices]. M.: Machine Building, 2007. 400 p.
2. Lomakin M. A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2398/.
3. Konoplev B. G., Lysenko I. E., Sharova E. V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2010, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2010/240/.
4. Maluf N., Williams K. An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering. ARTECH HOUSE, INC., 2006. 304 p.
5. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike (dlya nauchnyh rabotnikov i inzhenerov) [Mathematical handbook (for scientists and engineers)]. M.: Nauka, 1974. 832 p.
6. Ma D., Shiau J., Wang I. Lin Y. Attitude Determination Using a MEMS-Based Flight Information Measurement Unit. Sensors. 2012, №12, pp. 1-23.
7. Dehnnis Dzh., Shnabel' R. Chislennye metody bezuslovnoj optimizacii i resheniya nelinejnyh uravnenij [Numerical methods for unconstrained optimization and nonlinear equations]. M.: Mir, 1988. 440 p.
8. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4. InvenSense, 2013. 52 p.
9. MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.2. InvenSense, 2013. 46 p.
10. Kaplya V.I., Bojcov E.P., Pan A.G. Nauchnoe obozrenie. 2015. № 10-1. pp. 55-60.