

◇◇МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ◇◇

УДК 004.946

Разработка математической модели отслеживания движения человеческой конечности в трехмерном пространстве с помощью МЭМС-датчиков

*Левонич Н.И.**

Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8580-0490>
e-mail: levonikitech@yandex.ru

В данной статье рассматривается разработка математической модели для устройства, способного отслеживать движения человеческой конечности, на базе показаний микроэлектромеханических датчиков. Для разработки и выбора наиболее подходящей модели, были проведены эксперименты на базе общедоступных компонентов. Полученный результат имеет практическое значение, так как может быть применен для создания устройства.

Ключевые слова: системы управления, виртуальная реальность, микроэлектромеханические датчики, фильтр Калмана, микроконтроллеры, MEMS.

Для цитаты:

Левонич Н.И. Разработка математической модели отслеживания движения человеческой конечности в трехмерном пространстве с помощью МЭМС-датчиков // Моделирование и анализ данных. 2021. Том 11. № 3. С. 74–82. DOI: <https://doi.org/10.17759/mda.2021110305>

**Левонич Никита Ильич*, студент, Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8580-0490>, e-mail: levonikitech@yandex.ru



1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развиваются технологии виртуальной и дополненной реальности. В связи с этим встает задача разработки устройств, которые смогут захватывать движения человека и превращать их в движение виртуальных объектов. Захват движений человека может производиться разными средствами, такими как камеры, в том числе TOF-камерами, механическими датчиками (тензорезисторами) и микроэлектромеханическими системами (акселерометрами, гироскопами и магнитометрами). В данной статье будет рассмотрена возможность построения системы, которая с помощью датчиков пространственного положения (акселерометров, гироскопов и магнитометров) [4] будет отслеживать движение руки человека.

2. АНАЛИЗ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ

В качестве базового устройства для построения прототипа системы, позволяющей отслеживать положение руки, был выбран микроконтроллер Arduino [2]. Данный выбор был обусловлен его открытостью, доступностью и обилием документации.

На сегодняшний день на рынке существует множество модулей для Arduino, содержащих те или иные микроэлектромеханические датчики, однако только три модуля содержат акселерометр, гироскоп и магнитометр в сборе. В рамках нашего исследования мы ограничимся только ими. В таблице 1 приведено их сравнительное описание.

Из описания модулей следует, что модули TDK MPU9250 и STMicroelectronics LSM9DS3 обладают примерно одинаковыми характеристиками, а Bosch BNO080 выгодно отличается от них наличием встроенного вычислительного ядра. Наличие вычислительного ядра, вместе с вшитыми производителем алгоритмами обработки, позволяет существенно сократить количество вычислений на базовом устройстве.

Для всех вышеперечисленных датчиков имеются специальные библиотеки на языке C++, которые позволяют считывать показания в память микроконтроллера.

3. ПЕРВЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Целью первого исследовательского эксперимента, с помощью микроэлектромеханических датчиков, стало отслеживание перемещения человеческой конечности с применением метода двойного интегрирования линейных ускорений для нахождения изменения положения объекта. На первом этапе исследования проводилась попытка получения перемещений тела с помощью одного датчика. Это было сделано путем двойного численного интегрирования.

Для реализации этого этапа использовалось следующее материальное обеспечение: микроконтроллер Arduino Leonardo, датчик TDK MPU6050/TDK MPU9250, тканевая перчатка, позволяющая закрепить сборку из микроконтроллера и датчика на кисти руки. Для микроконтроллера на языке C++ была написана программа, реализующая математическую модель двойного интегрирования.



Таблица 1

Сравнение характеристик MEMS модулей для Arduino

Характеристика	TDK MPU9250	STMicroelectronics LSM9DS3	Bosch BNO080
Точность гироскопа	$\pm \frac{125^\circ}{16384c}$ $\pm \frac{125^\circ}{8192c}$ $\pm \frac{4096c}{125^\circ}$ $\pm \frac{2048c}{125^\circ}$	$\pm \frac{125^\circ}{16384c}$ $\pm \frac{125^\circ}{8192c}$ $\pm \frac{4096c}{125^\circ}$ $\pm \frac{2048c}{125^\circ}$	$\pm \frac{3.1^\circ}{c}$ (композиционная точность)
Точность акселерометра	$\pm \frac{1}{16384} g^1$ $\pm \frac{1}{8192} g$ $\pm \frac{1}{4096} g$ $\pm \frac{1}{2048} g$	$\pm \frac{1}{16384} g$ $\pm \frac{1}{8192} g$ $\pm \frac{1}{4096} g$ $\pm \frac{1}{2048} g$	$\pm \frac{3}{1960} g$ (композиционная точность)
Точность магнитометра	0.6мкТ	0.1мкТ 0.2мкТ 0.4мкТ 0.8мкТ	1.4мкТ
Встроенное ядро вычислений	Отсутствует	Отсутствует	Cortex M0
Интерфейсы	I2C, SPI	I2C, SPI	I2C, SPI, UART

В результате данного эксперимента было установлено, что модельная позиция перемещаемого объекта, по мере продолжения исследования, становится все дальше от реального положения объекта в пространстве. При этом анализ логов показывает, что в процессе эксперимента перемещение объекта за единицу времени продолжает расти несмотря на то, что по истечении некоторого времени объект останавливается.

Полученный результат свидетельствует о накоплении ошибки двойного интегрирования. Это усугубляется отсутствием фильтрации помех во входных данных перед их интегрированием.

С целью решения возникшей проблемы был использован фильтр Калмана. Однако в процессе эксперимента подтвердились проведенные ранее другими специалистами многочисленные исследования, свидетельствующие о том, что даже с помощью фильтра Калмана добиться приемлемой точности, для решения, поставленной задачи невозможно.

4. ВТОРОЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Перед началом второго эксперимента была сформулирована гипотеза:

Возможно создать технологию, которая на базе нескольких микроэлектромеханических датчиков, поможет создать систему, с помощью которой можно будет разработать модель движения конечности в реальном времени.

Данная система будет использовать несколько зависимых систем сферических координат, в каждой из которых будет зафиксировано радиальное расстояние.

С целью проверки данной гипотезы был проведен эксперимент. В качестве материальной базы эксперимента были выбраны микроконтроллер Arduino Nano и микроэлектромеханический датчик Bosh BNO080. Была собрана установка, имитирующая упрощенную конечность человека на гидравлических приводах (рисунок 1).

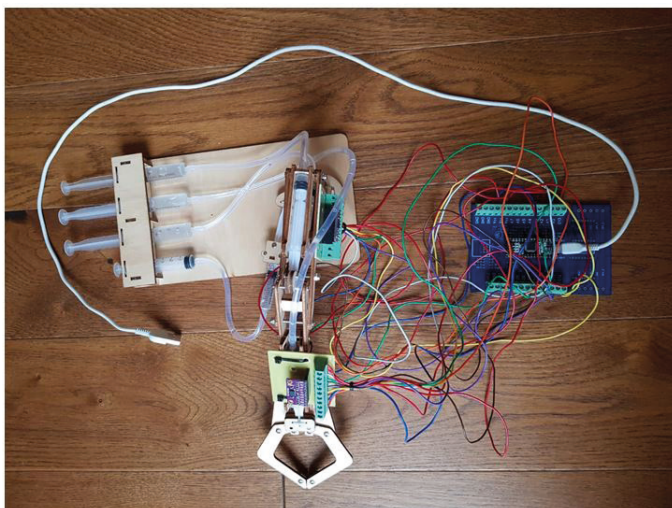


Рис. 1. Установка имитирующая конечность человека

В качестве библиотеки для связи микроконтроллера с датчиком была использована библиотека от компании SparkFun Electronics, которая распространяется под открытой лицензией MIT [3]. Данная библиотека позволяет получить отфильтрованную по Маджвику ориентацию микро электромеханического датчика, а также вычислить соответствующие углы Эйлера. Библиотека позволяет подключиться к датчику по интерфейсам SPI или I2C.

В рамках эксперимента использовался протокол SPI, как наиболее скоростной и позволяющий подключить несколько датчиков.

На два колена установки при помощи стягивающих хомутов закреплены платы, которые содержат датчики Bosch BNO080. Датчики с помощью четырех проводов, образующих шину SPI, подключаются к микроконтроллеру Arduino, как показано на рисунке 2. Все провода шины, кроме провода ChipSelect, являются общими для обоих датчиков.

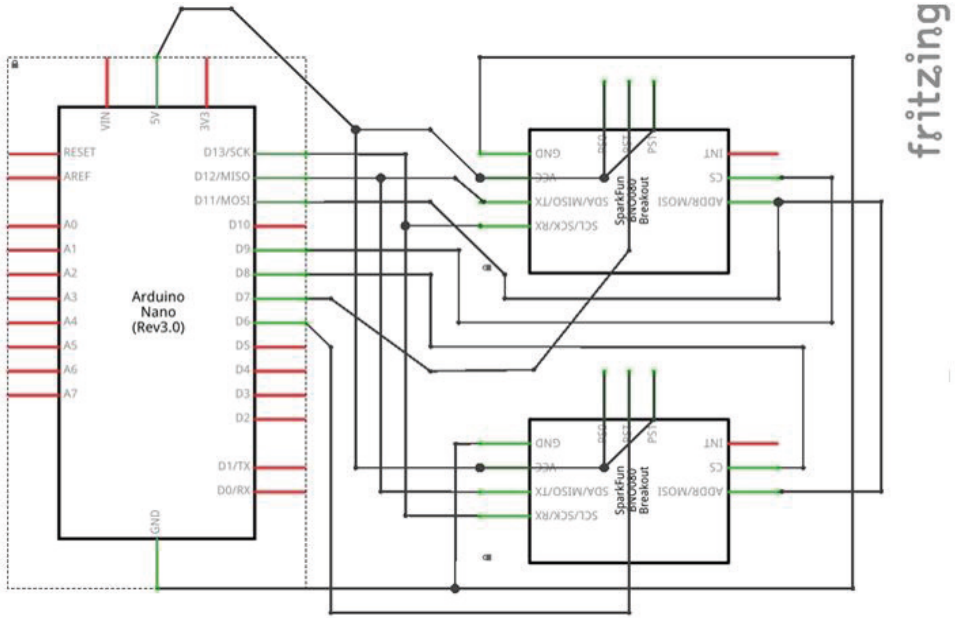


Рис. 2. Схема подключения датчиков

Для тестовой установки была написана программа, которая считывает данные о текущей ориентации датчика (Rotation Vector [1]). При инициализации контроллера датчиком отправляется команда начать передавать данные с интервалом в 50 миллисекунд (листинг 1). При поступлении данных от датчиков, библиотека вычисляет радианную меру углов Эйлера на базе кватернионов ориентации (листинг 2).

```
void setup() {
  imus[0].enableRotationVector(50); // Send data update every 50ms
  imus[1].enableRotationVector(50); // Send data update every 50ms
}
```

Листинг 1. Инициализация датчиков

После получения углов в процессе выполнения программы имеется три четырехбайтовых числа с плавающей точкой стандарта IEEE754, в которых содержатся углы. Они разбиваются на байты и отправляются на компьютер по последовательному интерфейсу в составе пакета (формула 1).

```
angles[0].roll = imus[0].getRoll();
angles[0].pitch = imus[0].getPitch();
angles[0].yaw = imus[0].getYaw();
```

Листинг 2. Получение углов

$$\underbrace{BC00010203}_{\text{Время (Int32,MSB)}} \underbrace{04050607}_{\text{Крен 1 (Float32,LSB)}} \underbrace{08090A0B}_{\text{Тангаж 1 (Float32,LSB)}} \underbrace{0C0D0E0F}_{\text{Рыскание 1 (Float32,LSB)}} \underbrace{10111213}_{\text{Крен 2 (Float32,LSB)}} \underbrace{14151617}_{\text{Тангаж 2 (Float32,LSB)}} \underbrace{18191A1B}_{\text{Рыскание 2 (Float32,LSB)}} DE \quad (1)$$

Данные, получаемые в процессе эксперимента, средствами Python скрипта, использующего библиотеку PySerial, записывались в файл в бинарном виде.

Полученный файл разбирается с помощью алгоритма, реализованного при помощи Pandas в системе Jupyter Notebook, на выходе алгоритма таблица в формате CSV [6]. Полученный временной ряд был визуализирован в виде динамического графика. Каждый кадр динамического графика представляет собой шесть систем координат (по системе для каждого измеренного угла), в которых для каждого угла строится двумерный радиус-вектор, соединяющий начало координат и точку $(\cos \alpha, \sin \alpha)$. Кадр этого динамического графика изображен на рисунке 3.

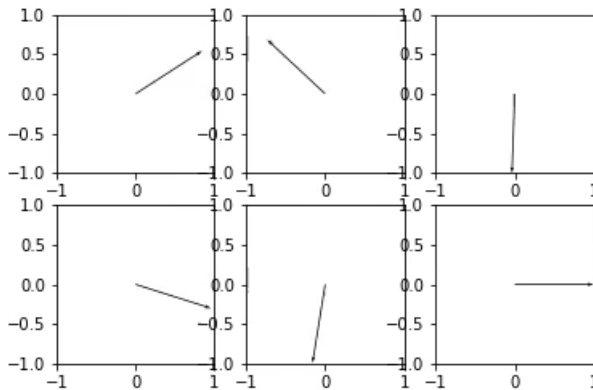


Рис. 3. Визуализация полученных данных

Анализ динамического графика выявил отсутствие непрерывности в изменении положения датчика. На рисунке 4 изображен трехмерный график, показывающий зависимость синуса и косинуса угла от времени.

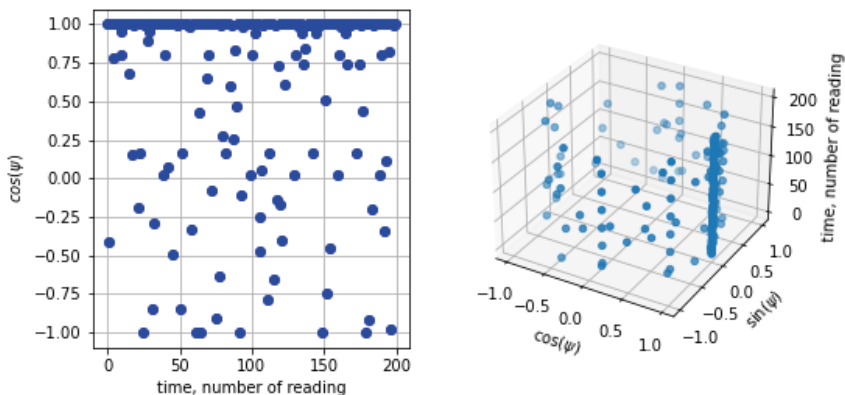


Рис. 4. Зависимость тригонометрических функций угла от времени во втором эксперименте



По результатам анализа показаний приборов были сделаны следующие предположения:

- плохая защита коммуникационных проводов от возможных наводок;
- отсутствие фиксации установки и недостаточная устойчивость её конструкции;
- некорректная настройка библиотеки PySerial.

Для преодоления проблем, связанных с особенностями конструкции и её креплением, было принято решение собрать вторую установку третий эксперимент.

5. ТРЕТИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Целью этого эксперимента являлось точное, с минимальными погрешностями, получение изменение углов собственного вращения гироскопа. В качестве материальной базы эксперимента, были выбраны микроконтроллер Arduino Nano и микроэлектромеханический датчик Bosch BNO080. Для третьего эксперимента была использована установка, основанная на сервоприводе (рисунок 5).

В процессе эксперимента, крестовина гироскопа с закрепленной на ней планкой с датчиком вращалась. Управление вращением производилось с помощью джойстиков. Данные о положении гироскопа считывались и передавались на компьютер тем же способом, что и во втором эксперименте. Принимающая же часть была полностью переделана. На этот раз принимающая часть была реализована с помощью NodeJS 15.6.0, serialport 9.0.4, d3 6.2.0 и electron 10.1.5.

Результатом данного эксперимента явилось существенное улучшение точности определения углов собственного вращения гироскопа. Результат изображен на рисунке 6.

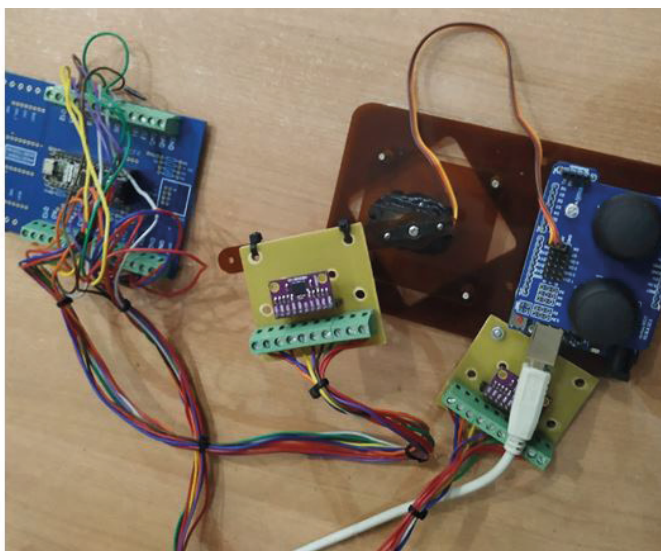


Рис. 5. Установка на базе сервопривода

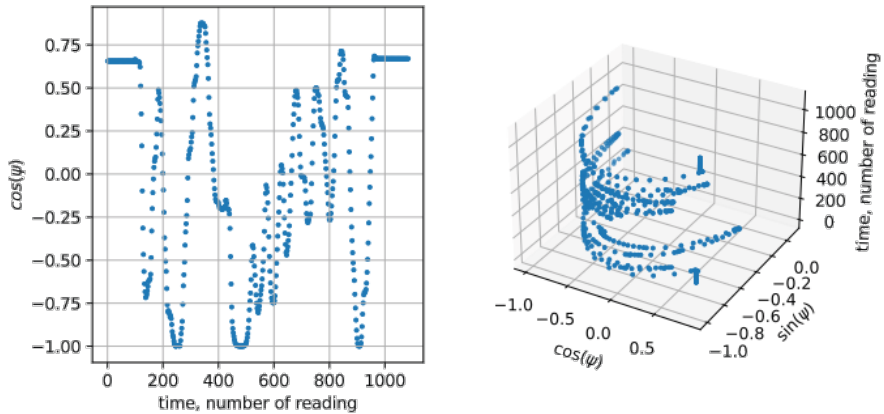


Рис. 6. Зависимость тригонометрических функций угла от времени в третьем эксперименте

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования были разработаны, реализованы и протестированы две математические модели отслеживания движения человеческой конечности в трехмерном пространстве с помощью МЭМС датчиков. В результате реализации и тестирования первой модели выяснилось, что в конкретном случае она неприменима ввиду того, что она не позволяет добиться приемлемой, для решения поставленной задачи, точности.

В результате двух экспериментов, направленных на реализацию и тестирование второй математической модели, удалось разработать алгоритм получения углов собственного вращения гироскопов. Основываясь, на данном алгоритме возможно создание системы отслеживания движения человеческой конечности.

Литература

1. BNO080 Datasheet. – URL: https://cdn.sparkfun.com/assets/1/3/4/5/9/BNO080_Datasheet_v1.3.pdf. – (дата обращения: 11.10.2020).
2. Louis L. Working principle of Arduino and using it // International Journal of Control, Automation, Communication and Systems (IJCACS). – 2016. – Т. 1, No 2. – С. 21–29.
3. The MIT License | Open Source Initiative. – URL: <https://opensource.org/licenses/MIT>. – (дата обращения: 11.10.2020).
4. Карпенко В.С. Применение микроэлектронных датчиков акселерометров, гироскопов и магнетометров в системах управления // Наука – перші кроки : тези доп. XIII регіон. студент. наук.техн.конф. (Маріуполь, 2226 квітня 2019 р.) : в 4 т. ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2019. – Т. 3. – С. 11



Development of a Mathematical Model for Tracking Movement of a Human Limb in Three-Dimensional Space Using MEMS Sensors

Nikita I. Levonovich*

Moscow State University of Psychology and Education (MSUPE), Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8580-0490>

e-mail: levonikitech@yandex.ru

This article discusses the development of a mathematical model for a device capable of tracking the movements of a human limb based on the readings of microelectromechanical sensors. For developing and selecting the most suitable model, experiments were conducted based on publicly available components. The result obtained is of practical importance since it can be used to create a device.

Keywords: control systems, virtual reality, microelectromechanical sensors, Kalman filter, microcontrollers, MEMS.

For citation:

Levonovich N.I. Development of a Mathematical Model for Tracking Movement of a Human Limb in Three-Dimensional Space Using MEMS Sensors. *Modelirovanie i analiz dannykh = Modelling and Data Analysis*, 2021. Vol. 11, no. 3, pp. 74–82. DOI: <https://doi.org/10.17759/mda.2021110305> (In Russ., abstr. in Engl.).

References

1. BNO080 Datasheet. – URL: https://cdn.sparkfun.com/assets/1/3/4/5/9/BNO080_Datasheet_v1.3.pdf. – (date of the application: 11.10.2020).
2. Louis L. Working principle of Arduino and using it. *International Journal of Control, Automation, Communication and Systems (IJCACS)*. – 2016. – T. 1, No 2. – С. 21–29.
3. The MIT License | Open Source Initiative. – URL: <https://opensource.org/licenses/MIT>. – (date of the application: 11.10.2020).
4. Karpenko V.S. Primenenie mikroelektronnykh datchikov akselerometrov, giroskopov i magnetometrov v sistemakh upravleniya. *Nauka – pershi kroki : tezi dop. XIII region. student. nauk. tekhn.konf. (Mariupol', 22–26 kvitnya 2019 r.)* : v 4 t. DVNZ «PDTU». – Mariupol', 2019. – T. 3. – p. 11

***Nikita I. Levonovich**, student, Moscow State University of Psychology and Education (MSUPE), Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8580-0490>, e-mail: levonikitech@yandex.ru