

Гайнияров Игорь Мадыхатович

Методы и алгоритмы обработки информации для системы захвата движений на инерциальных микроэлектромеханических сенсорах

05.13.01 — Системный анализ, управление и обработка информации
(информатизация и связь)

Научный руководитель

к.т.н., Обабков Илья Николаевич

г. Екатеринбург, 2021 г.

Цель работы

Целью диссертационной работы является:

Реализация аппаратно–программного комплекса для захвата движения человека на основе инерциальных микроэлектромеханических сенсоров (МЭМС):

- со сбросом интегральной ошибки инерциальных МЭМС;
- с печатными платами, способными разместиться на всех фалангах пальцев;
- со специальной структурой пакета данных для последующего снижения размерности данных (вейвлет преобразование).
- с разработанным методом снижения биомеханической избыточности данных.

Актуальность

Реальные задачи

Реальные задачи

```
graph TD; A[Реальные задачи] --- B[Реабилитация]; A --- C[Физические тренировки]; A --- D[Виртуальные стенды]
```

Реабилитация

Физические тренировки

Виртуальные стенды

Актуальность

Реабилитация и медицина

- Отслеживание за динамикой восстановления двигательной функции (по типу холтера для суточного мониторинга за ЭКГ).
 - ▶ У пожилых людей.
 - ▶ У пациентов с хроническими двигательными нарушениями, например ДЦП.
- Отслеживание негативных двигательных событий (например, падения).
- Анализ движения двигательной активности детей для прогноза их развития (метод Прехтла).

Актуальность

Физические тренировки

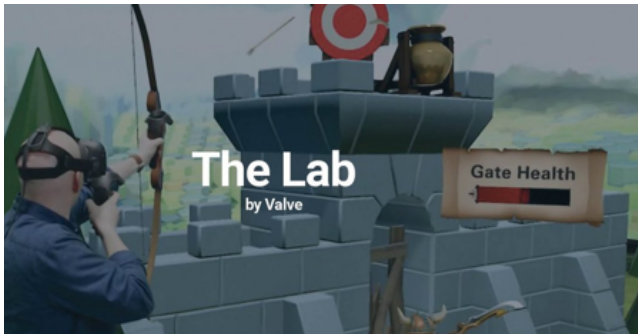


- Анализ спортивной техники в процессе тренировки¹.
- Определение видов упражнений во время тренировки.
- Учёт интенсивности двигательной активности.

¹<https://pivot.yoga/>

Актуальность

Виртуальные стенды



- Человеко-машинный интерфейс, способный отслеживать мелкую моторику.
- Подготовка виртуальной среды для обучения в виртуальной реальности.

Научная новизна

1. Обработка двигательных данных происходит в пространстве исходных значений сенсоров, без применения углов Эйлера и кватернионов, что позволяет избавиться от проблем с дрейфом нуля гироскопа и дребезгом акселерометра.
2. Предложенный метод позволяет включать в обработку данных не только инерциальные МЭМС и магнитометр, а ещё и другие сенсоры оцифровывающие физиологические показатели.
3. Индивидуальный подсчёт избыточности данных для заданного набора движений, что позволяет отключать лишние сенсоры из работы системы и повышать уровень дискретизации для оставшихся узлов оцифровки движений.
4. Предложен оригинальный метод снижения размерности данных для работы в пространстве исходных значений сенсоров, основанный на вейвлет преобразовании.

Методы исследования

Основным методом исследования

является захват движений человека и их последующее сравнение с эталонными действиями за счет обработки исходных данных МЭМС, полученных в виде множества моментных угловых скоростей и проекций на вектор гравитации.

Основные результаты

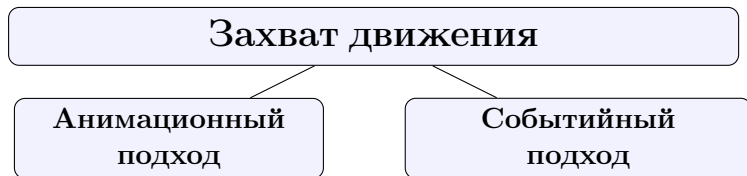
В работе получены и выносятся на защиту следующие результаты.

1. Аппаратно–программный комплекс для захвата движения на инерциальных микроэлектромеханических сенсорах.
2. Метод снижения размерности данных, основанный на вейвлет преобразовании.
3. Метод снижения биомеханической избыточности данных.

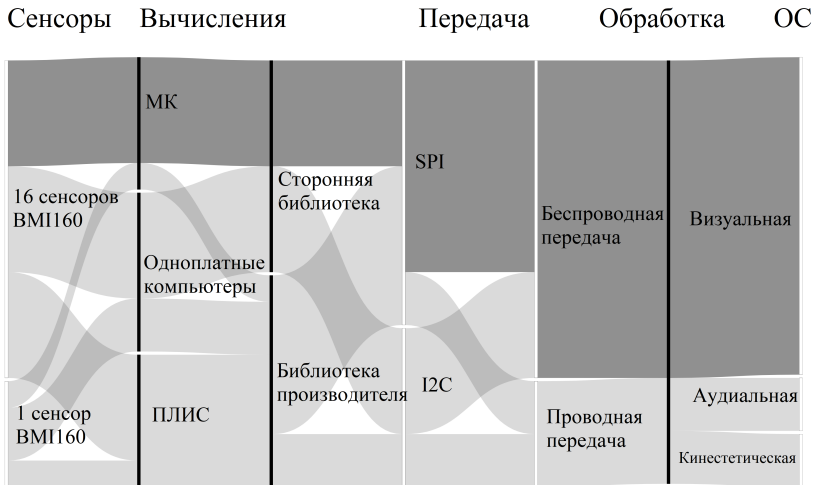
Способы захвата движений

- Маркерная технология.
 - ▶ Оптическая.
 - Пассивная.
 - Активная.
 - ▶ Магнитная.
 - ▶ Механическая.
 - Тензорезистивная.
 - Экзоскелетная.
 - ▶ МЭМС.
 - ▶ Гониометрическая.
 - ▶ Акустическая.
- Безмаркерная технология.
 - ▶ Прямой метод времени пролёта инфракрасного луча.
 - ▶ Постоянная модуляция сигнала.
 - ▶ Затворная технология.

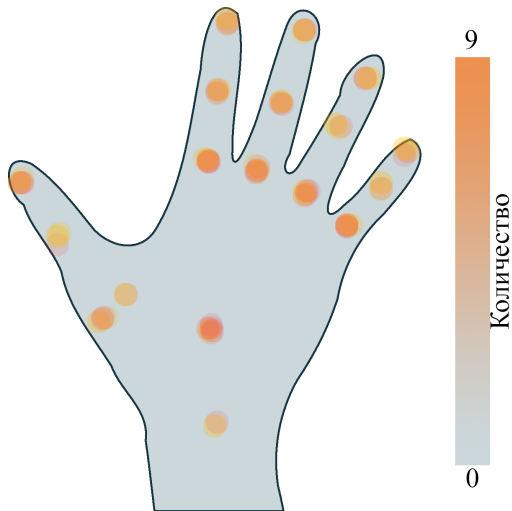
Два подхода к обработке МЭМС данных



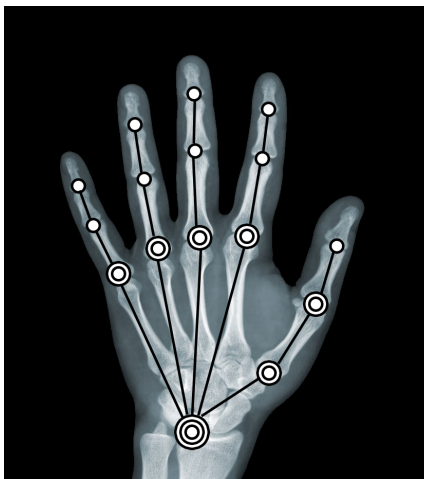
Возможные конфигурации системы захвата движений с использованием МЭМС



Тепловая карта расположения сенсоров на кисти у других исследовательских групп



Биомеханическая модель кисти



○ 1 степень свободы

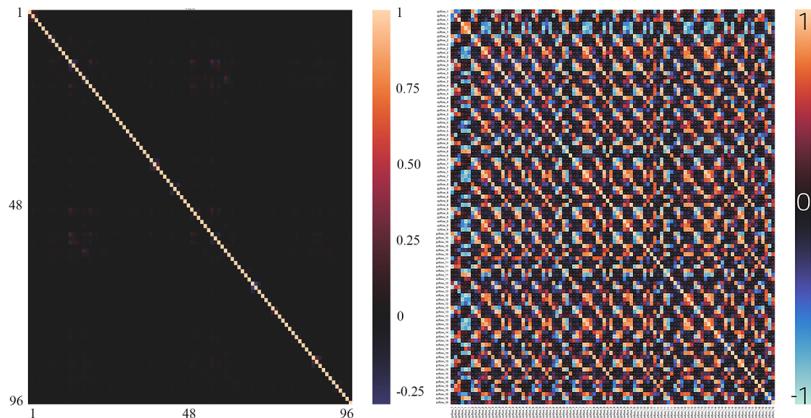
◎ 2 степени свободы

◎◎ 3 степени свободы

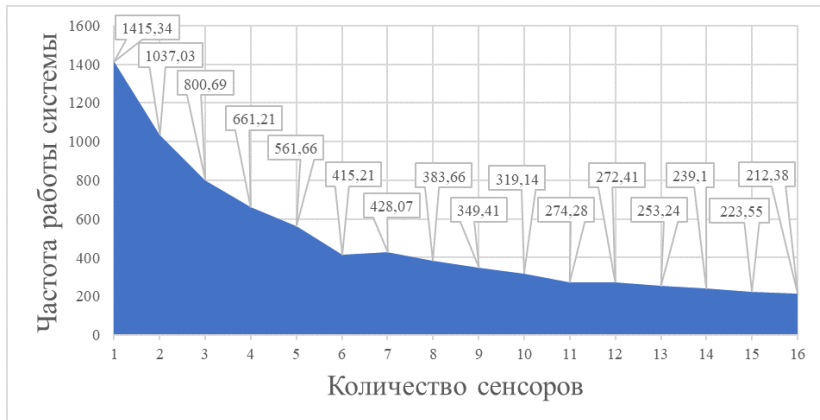
Алгоритмы обработки данных в анимационном подходе

- Маджвика.
- Махони.
- Комплементарный первого и второго порядков.
- Тригонометрического преобразования проекций на вектор гравитации «atan2».
- Алгоритм расчета угла только по гироскопу.

Снижение биомеханической избыточности данных



Увеличение частоты дискретизации сигнала...



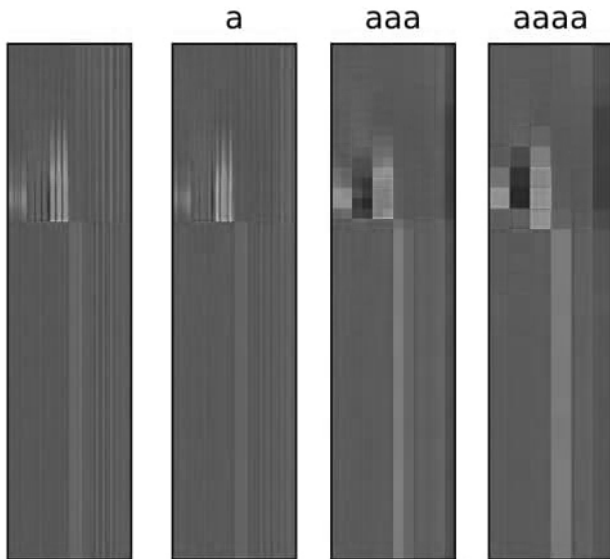
Вейвлет преобразование

Временной ряд в виде потока данных можно разложить при помощи высокочастотного фильтра. Получается два набора коэффициентов: аппроксимации и детализации. Детализирующие коэффициенты получаются после высокочастотного фильтра. Коэффициенты аппроксимации после низкочастотного фильтра.

$$y_{\text{low}}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]g[2n - k] \quad (1)$$

$$y_{\text{high}}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]h[2n - k] \quad (2)$$

Вейвлет преобразование



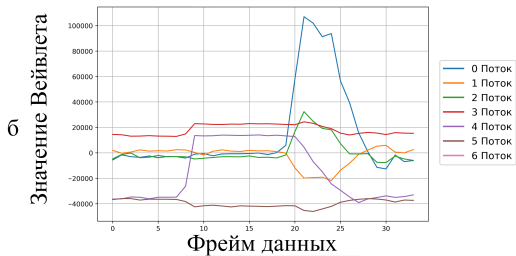
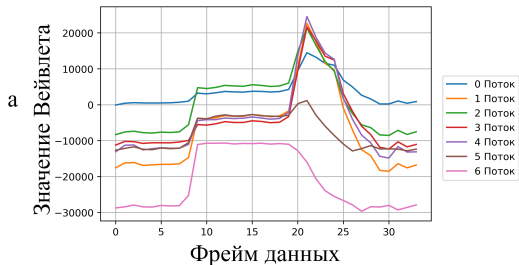
Вейвлет преобразование

В соответствии с правилом Найквиста, если исходный сигнал имеет самую высокую частоту f_{max} , он требует выборки частоты

$$f_s = 2f_{max}$$

Следовательно, на каждом уровне разложения n каждая информационная ось рекурсивно разделяется пополам на идеальной частоте среза.

Вейвлет преобразование

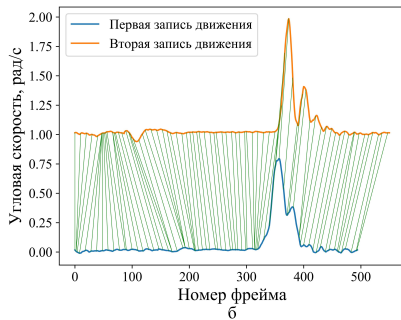
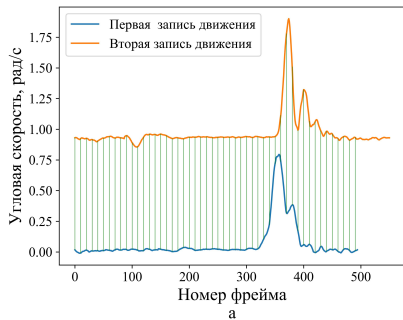


Примеры паттернов движений

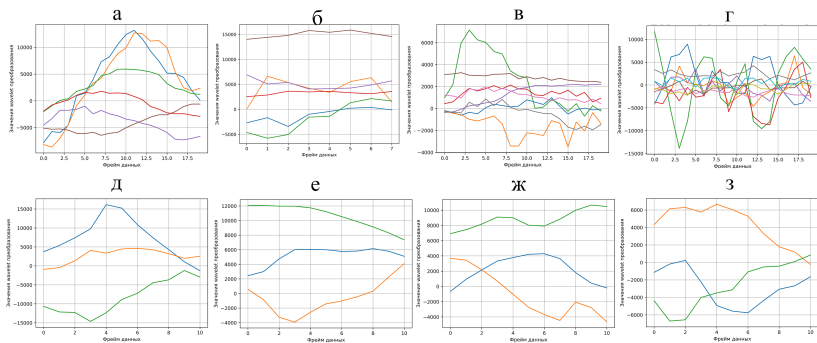
Записанные движения для проверки работы системы:

- 1 Проводится прямая линия.
- 2 Отводится указательный палец
- 3 Сгибается безымянный палец.
- 4 Осуществляются случайные движения.
- 5 Осуществляется движение ладонью как плоскостью от себя.
- 6 Осуществляется движение ладонью как плоскостью влево.
- 7 Осуществляется движение ладонью как плоскостью на себя.
- 8 Осуществляется движение ладонью как плоскостью вправо.

Алгоритм динамической трансформации временной шкалы

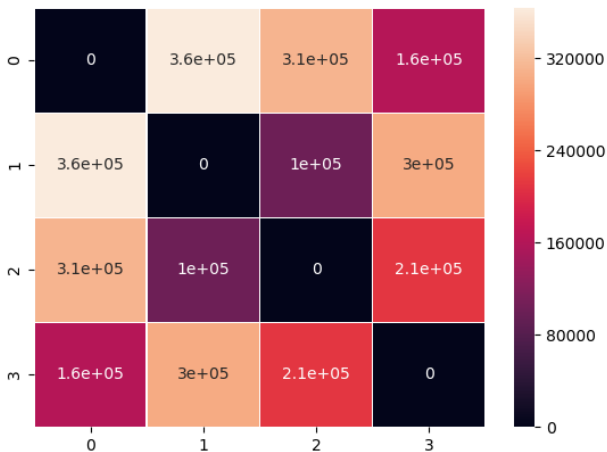


Графики полученных паттернов



(а) Прямая линия. (б) Отведение указательного пальца. (в) Сгиб безымянного пальца. (г) Случайные движения. (д) Движения ладонью от себя. (е) Движения ладонью влево. (ж) Движения ладонью на себя. (з) Движения ладонью вправо.

Алгоритм динамической трансформации временной шкалы



Получившиеся уровни биомеханической избыточности

Для набора данных, где:

- ① 41. Проводится прямая линия.
- ② 26. Отводится указательный палец
- ③ 28. Сгибается безымянный палец.
- ④ 13. Осуществляются случайные движения.
- ⑤ 72. Осуществляется движение ладонью как плоскостью от себя.
- ⑥ 70. Осуществляется движение ладонью как плоскостью влево.
- ⑦ 65. Осуществляется движение ладонью как плоскостью на себя.
- ⑧ 71. Осуществляется движение ладонью как плоскостью вправо.

Сравнение результатов работы алгоритма ДТВШ со снижением биомеханической избыточности и без неё

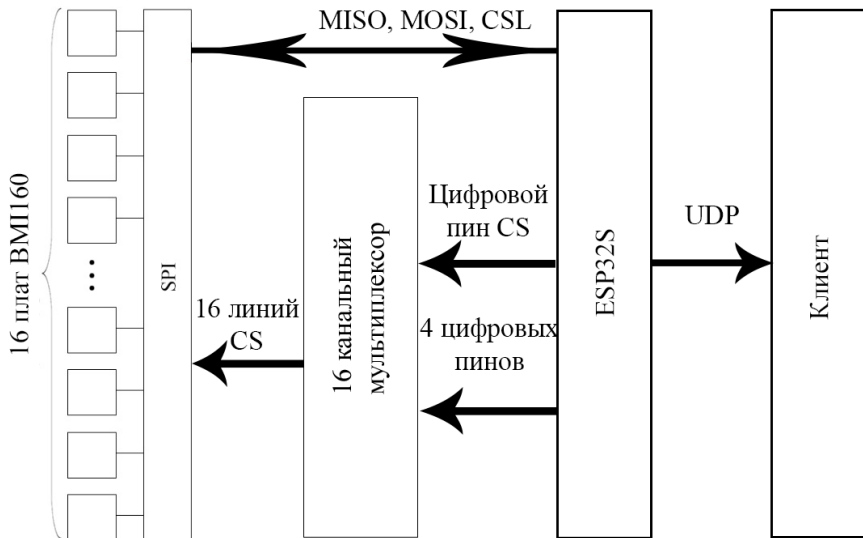
Среднее ускорение обработки данных увеличено в 1.938372658 раза.
Средний размер обработанного движения сократился в 1.763238652.

Название датасета	Избыточные данные		Тестовые данные		Соотношения тестовых к избыточным данным	
	Время, мс	Память, байт	Время, мс	Память, байт	Время, мс	Память, байт
Линия 1	7.4852	5968	2.4972	4016	2.9974	1.4861
Линия 2	6.4871	5440	1.9970	3664	3.2484	1.4847
Отведение 1	4.9903	3856	2.1555	3232	2.3151	1.1931
Отведение 2	1.9963	1792	0.9983	1512	1.9998	1.1852
Сгиб 1	1.9960	2224	1.1449	1872	1.7434	1.1880
Сгиб 2	1.9963	2128	0.9985	1792	1.9993	1.1875
Случайные 1	21.9581	17440	17.4677	17440	1.2571	1.0000
Случайные 2	39.9253	32512	22.4593	32512	1.7777	1.0000
От себя 1	2.9943	3328	0.9980	1184	3.0002	2.8108
От себя 2	1.9963	1600	0.4995	608	3.9967	2.6316
Влево 1	1.9963	1744	0.4995	656	3.9967	2.6585
Влево 2	1.4973	1504	0.5016	576	2.9848	2.6111
На себя 1	1.4970	1024	0.5009	416	2.9886	2.4615
На себя 2	1.4963	1408	0.4992	544	2.9971	2.5882
Вправо 1	1.9963	1984	0.9999	736	1.9964	2.6957
Вправо 2	1.4973	1408	1.4973	544	1.0000	2.5882

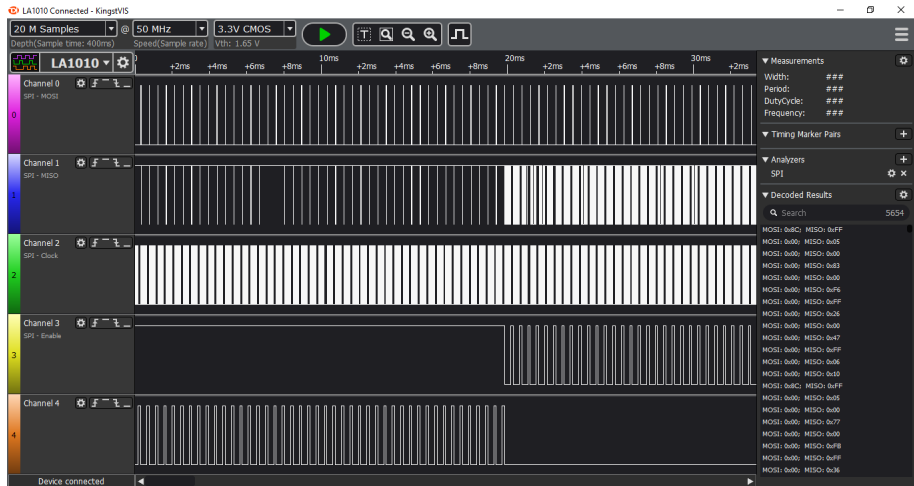
Аппаратная реализация

Аппаратная реализация

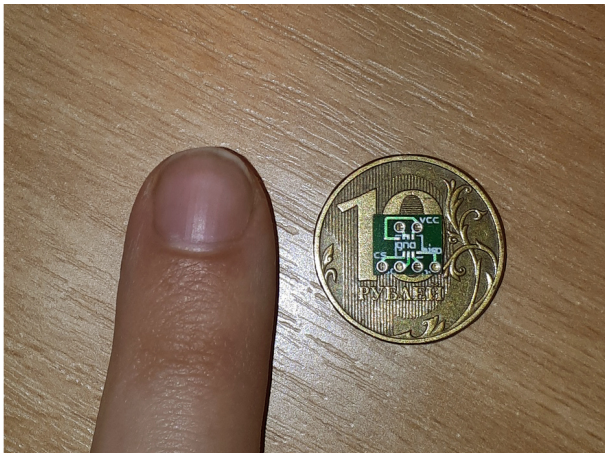
Структура аппаратного комплекса



Последовательность цифровых сигналов работающей системы



Размер получившихся печатных плат для сенсоров



Аппаратная часть системы



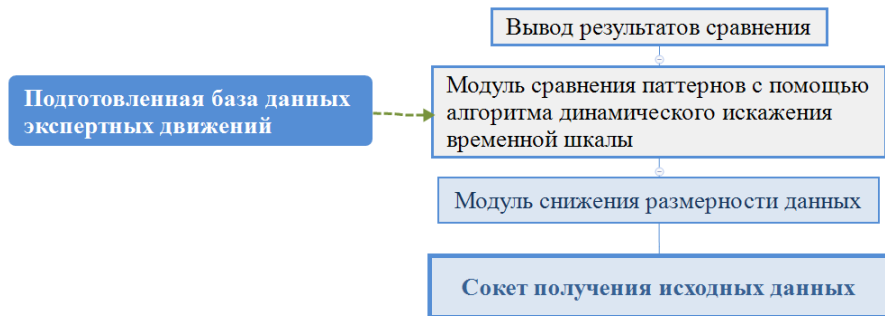
Программная реализация

Программная реализация

Псевдокод прошивки микроконтроллера

```
1 Function setup
2   | start_Wi_Fi_access_point() // Запускаем Wi-Fi точку доступа.
3   | setup_multiplexer_init_position()
4   | // Устанавливаем мультиплексор в начальное положение.
5   | initial_every_bmi160() // Инициализируем все сенсоры.
6 end
7 Function loop
8   | beginPacket(udpAddress, udpPort)
9   | // Открываем пакет для записи и указываем адрес доставки.
10  for one_sensor in sensors do
11  |   | change_channel() // Меняем канал мультиплексора
12  |   | one_sensor.readMotionSensor() // Считываем данные сенсора
13  |   | write_data() // Записываем данные в пакет
14  | end
15  | endPacket // Отправляем пакет
16 end
```

Структура программного комплекса приёма, обработки и вывода данных



Характеристики аппаратно–програмного комплекса

Языки программирования

- *C, C++*,
- *Python 3.7*.

При разработке использовались библиотеки

- Python для визуализации данных: *seaborn, matplotlib*.
- Python для анализа данных: *pandas, pywt, numpy, rpy2*.
- C, C++ для программирования микроконтроллера: *hanyazou: BMI160-Arduino*.

Заклучение

Публикации

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определённых ВАК

- *Igor Gajniyarova, Ilya Obabkvb, Nikolai Khlebnikovc: Motion capture in educational robotics*, AIP Conference Proceedings, vol. 1886, №1, AIP Publishing, 020085, Eds: American Institute of Physics Inc., 2017
- *Igor Gajniyarova, Ilya Obabkvb, Ilya Starodubtsev, Olga Lvova, Ekaterina Suleimanova, Irina Antipina: The Motion Capture as Behavior Analyzing Method of Spontaneous Motor Activity in Human Infants*, 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), IEEE, 2019
- *Igor Gajniyarova, Ilya Starodubtsev, Rustam Samedov, Alisa Sibogatova, Irina Antipina, Yana Zolotareva: Animatronic Hand Model on the Basis of ESP8266*, 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), IEEE, 2019
- *Averbukh V. L., Natalya V. Averbukh, Pavel Vasev, Igor Gajniyarov, Ilya Starodubtsev. The Tasks of Designing and Developing Virtual Test Stands //2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC). – IEEE, 2020. – С. 49-54.*
- *Averbukh V. L., Averbukh N. V., Gajniyarov I. Problems Arising in the Design of Workstations Based on Augmented Reality //2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC). – IEEE, 2020. – С. 55-59.*

Основные результаты оформлены в статьях:

- *Гайнрияров И.М., Морозов А.А.* Сравнение алгоритмов фильтрации сырых данных для маркерной киберфизической системы захвата движений, Молодой ученый, №16, с.192–195, 2017
- *Гайнрияров И.М., Обабков И.Н., Хлебников Н.А.* Метод захвата движений как средство естественного интерфейса. GraphiCon // Международная конференция по машинному зрению. 24-28 сентября 2017. Тезисы. Пермь, ПГНИУ, 2017. С. 193–196.
- *Гайнрияров И.М., Морозов А.А.* Технология захвата движений и образовательные роботы. //IV Международная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации». 15-19 мая 2017. Тезисы. Екатеринбург, УрФУ, 2017. С. 127–128.
- *Гайнрияров И.М., Стародубцев И.С. и др.* Аниматронная модель руки на базе ESP8266. //Международная конференция по машинному зрению. 23-26 сентября 2019. Брянск, Брянский государственный технический университет, 2019. С. 274–278.
- *Гайнрияров И.М., Валиева Э.Р. и др.* Исследование мелкой моторики в VR. // Международный форум "COGNITIVE NEUROSCIENCE — 2019. 06-07 ноября 2019. Екатеринбург, Уральский федеральный университет, 2019. С. 221–222.
- *Гайнрияров И. М., Стародубцев И. С.* Построение модели движения кисти руки на базе микроэлектромеханических сенсоров и алгоритма динамической трансформации временной шкалы //Интеллектуальные системы в науке и технике. Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века. – 2020. – С. 165-170.

Свидетельства

Свидетельства о государственной регистрации программ ЭВМ:

- Обработка данных с трехосевого гироскопа/акселерометра фильтром Калмана, настроенного под Arduino MEGA 2560. №2014613954.
- Прошивка ESP8285 для сбора данных с 18 BMI160 и дальнейшей передачи POST методом. №2019611071.
- Визуализатор потоковых CSV данных GY-BMI160 из UDP пакетов. №2020662364.

Конференции

Основные результаты были представлены на конференциях:

- на 27 международной конференции по компьютерной графике, обработке изображений и машинному зрению, системам визуализации и виртуального окружения «GraphiCon» (Пермь, 2017 г.);
- на IV международной конференции «Физика. Технологии. Инновации ФТИ–2017» (Екатеринбург, 2017 г.);
- на семинаре сектора визуализации в Институте Математики и Механики УрО РАН (Екатеринбург, 2017 г.);
- на научно–практической конференции «Молодые учёные и научно-технический прогресс России» (Екатеринбург, 2018 г.);
- на всероссийском конкурсе научно–технологических проектов «Сириус» (Сочи, 2019 г.);
- на 29 международной конференции по компьютерной графике, обработке изображений и машинному зрению, системам визуализации и виртуального окружения «GraphiCon» (Брянск, 2019 г.);
- международный форум по когнитивным нейронаукам на «Cognitive neuroscience — 2019» (Екатеринбург, 2019 г.);
- на международной конференции по инженерным, компьютерным и информационным наукам «Сибиркон» (Екатеринбург, 2019 г.);
- на всероссийской конференции по машинному зрению «Наука и глобальные вызовы XXI» (Пермь, 2020 г.);
- на международной конференции цифровой индустрии: состояние и перспективы развития 2020 Global Smart Industry Conference «GloSIC» (Челябинск, 2020 г.);

Спасибо за внимание!

1 Введение

- Цели
- Актуальность
- Научная новизна
- Методы

2 Основные результаты

- Аппаратная реализация
- Программная реализация

3 Заключение

- Публикация результатов