Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ВЫСШАЯ ШКОЛА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Направление: 09.04.04 – Программная инженерия

Профиль: Разработка программно-информационных систем

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В VR

Студент 2 курса

группы 11-822

«___»_____2020 г. Хасанов Б.В.

Научный руководитель

к.т.н., доцент кафедры программной инженерии

«___»_____2020 г. Кугуракова В.В.

Директор Высшей школы ИТИС КФУ

канд. техн. наук

«___»_____2020 г. Абрамский М.М.

Казань – 2020

Содержание

Введение **4**

Постановка задачи **6**

Глава 1. Обзор предметной области **7**

1.1 Системы симуляции обратной тактильной связи 7

1.2 Виды систем симуляции обратной тактильной связи 8

1.2.1 Вращательные датчики 9

1.2.2 Виброотдача 12

1.2.3 Умная ткань на основе силикона 15

1.3 Выводы 18

Глава 2. Проектирование комплекса **19**

2.1 Концепция разрабатываемого комплекса 19

2.2 Обзор hardware инструментария 21

2.3 Выводы 26

Глава 3. Разработка аппаратно-программного комплекса **27**

3.1 Создание прототипа 27

3.2 Прототипирование анимаций в трехмерном пространстве 37

3.3 Выводы 38

Глава 4. Обсуждение результатов **40**

4.1 Результаты поворота и сгибания пальцев 40

4.1.1 Поворот ладони 40

4.1.2 Сгибание поочерёдно каждого пальца 41

4.1.3 Сгибание комбинаций пальцев 41

4.1.4 Комбинирование различных положений и сгибов 42

4.2 Отказоустойчивость прототипа перчатки 42

4.3 Итоговая стоимость пилотного устройства 43

4.4 Выводы 44

Заключение **45**

Список использованных источников **46**

Приложение **50**

Приложение А. Фрагменты исходных кодов 50

Приложение В. Принципиальная схема устройства 53

Приложение С. Скриншоты работы устройства 54

Введение

На данный момент виртуальная реальность массово вошла развлекательную и учебную сферу жизни человека. В игровой индустрии представлено более 3000 различных игр с применением технологии VR. Российские Железные Дороги используют VR приложения для обучения персонала [1], т.к. это позволяет нагляднее и безопаснее продемонстрировать работу некоторых узлов железной дороги, без последствий имитировать аварийную ситуацию и исключить внешние факторы, которые могут помешать обучению.

На сегодняшний день, системы виртуальной реальности позволяют задействовать лишь ограниченное количество органов чувств человека. В массовых системах виртуальной реальности задействованы лишь глаза и уши. Более продвинутые, дорогие и громоздкие решения позволяют симулировать различные тактильные и температурные ощущения. Эти решения могут быть как и в виде перчаток, позволяющих ощущать объем и текстуру виртуальных предметов [2], так и в виде полноценных костюмов, в которых пользователь ощущает капли дождя, ветер и температуру [3].

Добавление симуляции тактильных ощущений позволяет использовать системы виртуальной реальности с большим погружением. Это нужно для соблюдения и выполнения строгих требований, предъявляемых к приложениям, которые могут быть использованы в качестве обучающих пособий. Подобные приложения должны иметь возможность передавать тактильные характеристики объекта, а именно – его размеры. Это позволит отслеживать правильность действий обучаемого: то, как он держит предметы, переносит их и позиционирует в пространстве. Руки – это основной агент, которым человек физически взаимодействует с окружающим внешним миром, постоянно выполняет повседневные действия,

манипулирует объектами и прикасается к ним. В медицинской сфере, отслеживание рук и симуляция тактильных ощущений используется для реабилитации (см., например, [4]), изучения психологических проблем (см., например, [5]), развития двигательных навыков в тренировочной симуляции (см., например, [6]), обучения моторным навыкам.

Большинство существующих решений, позволяющих симулировать тактильные ощущения в виртуальной реальности громоздки, дороги и неудобны в использовании.

Отсутствие легкого, недорогого и удобного в использовании комплекса обратной тактильной связи в VR, является проблемой данной работы. В ходе данной работы будет разработан аппаратно-программный комплекс обратной тактильной связи в виртуальной реальности.

Разработка комплекса, обеспечивающего отслеживание рук и симуляцию обратной связи в виртуальной реальности – сложный и крупный проект, состоящий из нескольких междисциплинарных трудозатратных задач, таких как: распознавание сгибания суставов пальцев и перемещения ладони, передача данных от системы распознавания и перемещения, симуляция обратной тактильной связи, и т.д.

Постановка задачи

Цель данной работы – разработка аппаратно-программного комплекса обратной связи в VR.

Для достижения данной цели, были поставлены следующие задачи:

1. Изучить современные решения симуляции обратной тактильной связи в виртуальной реальности, присутствующие на рынке.
2. Протестировать технологии, использование которых возможно при создании собственного прототипа аппаратно-программного комплекса обратной связи в VR.
3. Создать прототип комплекса обратной связи в VR.

Глава 1. Обзор предметной области

1.1 Системы симуляции обратной тактильной связи

Системы с симуляцией тактильной обратной связи для отслеживания положения рук и пальцев, которые на данный момент существуют на рынке, в большинстве случаев выполнены в виде перчаток, которые пользователь надевает на руки. Подобные перчатки используют различные технологии для отслеживания положения рук и пальцев: оптические [7], акустические [8] и магнитные [9], инновационные методы и технологии связанные с волоконной оптикой [10; 11], тензометрическими датчиками [12; 13], методами зондирования, основанные на эффекте Холла[1] [14]. Но каждая система имеет некоторые ограничения или недостатки, которые можно исправить: повысить точность и стабильность данных, упростить надевание и снимание системы, чтобы пользователь испытывал меньшие трудности при надевании комплекта, облегчить и ускорить калибровку, уменьшить вес, внедрить адаптацию под разные размеры рук, и, конечно, существенно снизить общую стоимость устройства.

[1] Эффект Холла – явление возникновения поперечной разности потенциалов при помещении проводника с постоянным током в магнитное поле. (Цитата из Wikipedia)

1.2 Виды систем симуляции обратной тактильной связи

Существующие на рынке решения можно условно разделить на две категории:

1. Перчатки с механической обратной связью.
2. Перчатки имитирующие обратную связь.
3. Перчатки с комбинированной обратной связью.

К первому типу перчаток относятся перчатки Dexmo [15], разработанные компанией Dexta Robotics. Данные перчатки представляют собой экзоскелет, надеваемый на руку. С помощью экзоскелета и сервоприводов, осуществляется обратная связь с миром VR: при взятии виртуального предмета в руку, сервоприводы не дают руке сжаться, тем самым показывая границы предмета.

Ко второму типу перчаток относится целая группа различных устройств: Noitom Hi5 VR [16], CaptoGlove [17], Senso [18], Manus VR [19] и другие. Перчатки подобного типа обычно оснащены несколькими IMU датчиками с 9 степенями свободы, которые отслеживают положения пальцев и кистей в пространстве, датчиками изгиба для отслеживания сгибания пальцев и средствами обратной связи на основе пьезодатчиков, вибродвигателей и т.д. За обработку информации с датчиков и передачу обратной связи отвечает микроконтроллер, питающийся от аккумулятора. Связь с ПК обеспечивается с помощью USB соединения или по Bluetooth.

К третьему типу относят перчатки HaptX Gloves. Они имеют комбинированную обратную связь, сочетающую в себе использование экзоскелета и имитирования тактильной связи. Это положительно влияет на степень погружения пользователя в виртуальную реальность, но негативно сказываются на общем весе и габаритах устройства, а также на его цене.

1.2.1 Вращательные датчики

Рассмотрим первое из решений, представленных на рынке. Перчатки с механической обратной связью на рынке представлены компанией Dexta Robotics. Перчатки от Dexta Robotics выполнены в форм-факторе экзоскелета, надеваемого на руку. При движениях пальцев, шарниры в экзоскелетах движутся, тем самым передавая информацию о том, в каком положении находятся пальцы пользователя. Всего было выпущено три разных версии сенсорной перчатки.

Версия Dexmo Classic, изображенная на рис. 1, которая являлась базовой версией, использовалось несколько вращательных датчиков, для захвата движения рук по 11 степеням свободы. Базовая версия определяла вращение большого пальца, изгиб всех пальцев и разведение пальцев друг от друга. Захват движения производился с помощью одного инерциального измерительного устройства. Также, было внедрено отслеживание ориентации движения руки по осям X, Y и Z.

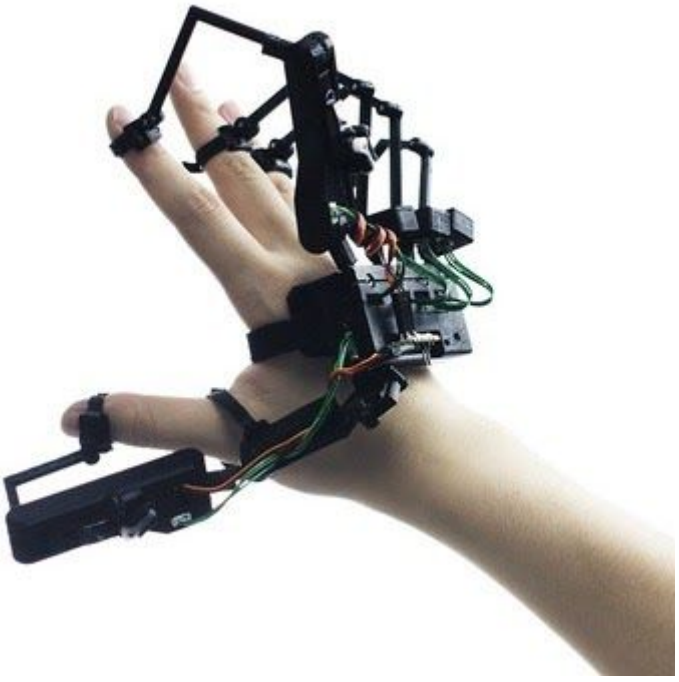


Рисунок 1 – Dexmo Classic использует несколько вращательных датчиков

Данная версия не подходит для использования в виртуальной реальности, в ней отсутствует тактильная отдача и беспроводная передача данных. Версию Dexmo Classic пользователи могут использовать для манипуляции, с помощью пальцев, аватарами, которые отображаются на экране, создавать анимированные модели и управлять каким-либо программным приложением с помощью жестов. Также, было написано программное обеспечение, позволяющее переводить жестовый язык в текстовый формат.

Следующей разработанной моделью является Dexmo F2. В данной модели появилась частичная механическая обратная связь с помощью контролируемых дисковых тормозов. При захвате пользователем виртуального предмета, дисковые тормоза, расположенные в шарнирах экзоскелета, препятствуют дальнейшему сжатию одного или нескольких пальцев, что симулирует физическую обратную связь. Пользователь физически ощущает, что не может сильнее сжать пальцы. При этом, отсутствует симуляция упругости предметов - шарниры или свободно двигаются, или полностью заблокированы.

Последняя версия перчатки Dexmo получила сервоприводы, которые позволяют не только останавливать пальцы, при соприкосновении с предметом, не давая их сильнее согнуть, как это было в модели Dexmo F2, но и частично противостоять сгибанию пальцев, воздействуя в обратную сторону, т.е. разгибать их, что симулирует упругость предметов. На рисунке 2 изображена перчатка Dexmo, где A – суставы, в которых движение считывается, но никак не ограничивается, B – суставы, в которых движения считываются и ограничиваются, C – суставы, в которых движения не считываются, но ограничиваются.

Рисунок 2 – Перчатка Dexmo

В итоге, Dexta Robotics сумела разработать интересное и наиболее физически явное решение для симуляции обратной тактильной связи. Силовая обратная связь – лучшее из решений, если нужно добиться максимально точной, в плане восприятия человеком, передачи тактильной обратной связи. Использование энкодеров позволяет уменьшить частоту и время калибровки перчатки – калибровка нужна только при первом надевании перчатки и занимает около 1-2 минут. Но у данного решения существуют существенные недостатки:

1. Громоздкость конструкции перчатки – экзоскелет достаточно объемный, а большой вес всех механизмов отрицательно влияет на активность пользователя, т.к. руки достаточно быстро устают.
2. Используемые механизмы, такие как энкодеры и сервоприводы, имеют конечную точность измерений, которой может быть недостаточно при некоторых использованиях
3. Использование сложных механизмов, негативно влияет на цену устройства, которая на данный момент стремится к 12000$ за самую простую модель устройства.
4. Решения от Dexta Robotics на данный момент недоступны для обычных пользователей. Использование сенсорных перчаток доступно лишь для разработчиков ПО и для использования в своих демо-проектах.

1.2.2 Виброотдача

Компания Manus-VR разработала несколько вариантов устройств, передающих движения рук и пальцев в виртуальную реальность. Среди их разработок присутствует несколько вариантов перчаток. Отличия между ними в том, что только один из вариантов, а именно модель Prime II Haptic, позволяет осуществлять передачу обратной тактильной связи.

Рисунок 3 – Перчатка Prime II Haptic

Перчатки Prime II Haptic выполнены в виде тканевой перчатки, которая плотно обхватывает руку пользователя. Поверх перчатки, на внешней стороне, в районе ногтевых пластинок, расположены вибродвигатели, используемые для симуляции обратной тактильной связи с помощью виброотдачи.

Отслеживание движений пальцев осуществляется с помощью датчиков гибкости, расположенных на каждом пальце, и IMU сенсоров. Точность отслеживания пальцев находится на хорошем уровне, т.к. компания использует автоматические фильтры, неверующие дрейф, который создается акселерометром IMU сенсора. Перчатки комплектуются сменным аккумулятором, обеспечивающим, в режиме отслеживания положения рук, до 5 часов работы. При использовании обратной тактильной связи, время работы от аккумулятора существенно снижается. Для отслеживание положения рук в пространстве, требуются дополнительные трекеры.

Компания Manus-VR одна из немногих компаний, которая позволяет купить комплект для погружения в виртуальную реальность обычным пользователям, не являющимся разработчиками ПО. Собственное ПО компании, которое используется для настройки и калибровки, имеет достаточно большое количество настроек, позволяющих подогнать перчатку под конкретного пользователя и ПО. При этом, модель Prime II Haptic не лишена минусов:

1. Используемые для тактильной отдачи вибромоторы расположены на внешней стороне пальцев, которая обладает низкой чувствительностью и менее интуитивно понятна для пользователя.
2. Существующие игры и ПО не могут полностью поддерживать перчатки.
3. Стоимость устройства делает его недоступным для большинства пользователей, использующих виртуальную реальность.
4. Периодические проблемы с калибровкой перчаток, уменьшают продолжительность использования виртуальной реальности.

1.2.3 Умная ткань на основе силикона

Третье решение, которые рассмотрим – это Перчатки HaptX Gloves от компании HaptX совмещают в себе несколько технологий симуляции обратной связи. Перчатки выполнены в форме экзоскелета, под которым находится дополнительная тканевая перчатка. Экзоскелет позволяет физически ограничивать перемещение пальцев руки, изменяя подвижность определенных суставов, а тканевая перчатка, которая содержит в себе умную ткань на основе силикона, позволяет симулировать ощущения прикосновения на кончиках пальцев.

Наиболее революционным, является собственная разработка компании HaptX, позволяющая симулировать прикосновения к предметам. Гибкая ткань содержит в себе воздушные каналы, по которым к кончикам пальцев поступает сжатый воздух. На кончиках пальцев находятся тактильные приводы, к которым и поступает сжатый воздух. Тактильные приводы выполнены в виде площадок, на которых находятся небольшие механизмы в виде мембран. При поступлении сжатого воздуха, мембраны расширяются и начинают оказываться давление на кончик пальца, тем самым, симулируя прикосновение к предмету. Толщина тактильных приводов – менее 1,5 мм. Всего, каждая перчатка, содержит 130 мембран. Это позволяет обеспечить давление на кожу кончиков пальцев таким образом, что пользователь воспринимает это как реальное соприкосновение с каким-либо предметов.

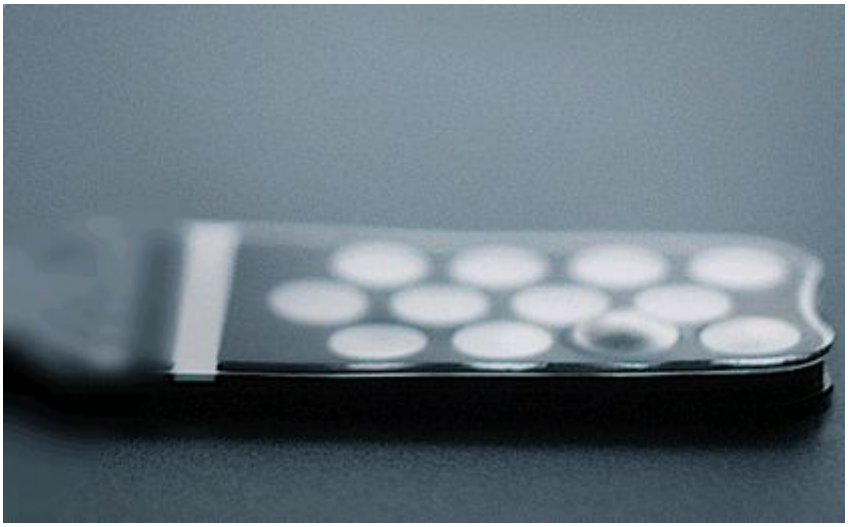


Рисунок 4 – Панель, симулирующая прикосновения

Экзоскелет, которых находится поверх тканевой перчатки, позволяет симулировать прикосновений к предметам с помощью ограничения подвижности суставов. Это реализовано с помощью сервоприводов, которые обеспечивают усилие до четырех фунтов на каждый палец. При сжатии предмета в виртуальной реальности, пользователь ощущает ограничение в подвижности суставов. Реализация похожа на ту, которая присутствует в сенсорной перчатке Dexmo, но наличие обратной тактильной связи на кончиках пальцев, повышает уровень погружения пользователя в виртуальную реальность. Подобная связка улучшает восприятие размера, формы и веса виртуальных предметов.

Отслеживание движения пальцев реализовано с помощью IMU сенсоров высокой точности, позволяющих с точностью до миллиметра отслеживать движения всех пяти пальцев.

Перчатки HaptX Gloves – это прекрасный аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий глубокое погружение в виртуальную реальность, за счет симуляции тактильной обратной связи. Комбинация из экзоскелета и тканевой сенсорной перчатки, усиливает эффект присутствия, а высокоточные IMU сенсоры позволяют передавать в виртуальную даже

небольшое движение пальцами. Данный комплекс отлично подходит для использования в обучающих платформах, но он имеет существенные недостатки, не позволяющие выйти на широкий рынок:

1) Высокая итоговая стоимость, из-за использования высокоточных сенсоров и сервоприводов.
2) HaptX Gloves на данный момент доступны только разработчикам ПО.
3) Сложная калибровка устройства.

1.3 Выводы

В результате анализа имеющихся на рынке перчаток, позволяющих отслеживать руки в виртуальной реальности и симулировать обратную связь, были выявлены их преимущества и недостатки. Часть недостатков присутствует у всех имеющихся моделей, а часть - лишь у некоторых. Часто встречающиеся недостатки, присущие практически у всех рассмотренных систем:

- Большинство перчаток достаточно дороги.
- Часть перчаток не доступны обычному пользователю, их можно купить лишь разработчикам VR игр и систем.
- Практически все перчатки, кроме Dexmo и HaptX Gloves, не используют силовую обратную связь.
- Сложная настройка и калибровка устройств.
- Невозможность использовать их в широкодоступных VR проектах.

Глава 2. Проектирование комплекса

2.1 Концепция разрабатываемого комплекса

Анализ имеющихся на рынке моделей перчаток виртуальной реальности позволил разработать собственную концепцию аппаратно-программного комплекса. Комплекс тактильной обратной связи для потребительской виртуальной реальности должен быть функционально сбалансированным, недорогим, легким, независимым от стационарных объектов, и в то же время, он должен обеспечивать обратную связь, которая будет как-либо физически ощутима и сможет реально имитировать касание и манипулирование виртуальными объектами; то есть интерфейсы должны противостоять силам, превышающим силу пальцев при высокой частоте обновления с высокой точностью. Всем этим характеристикам отвечает комплекс, состоящий из недорогой перчатки, которая сочетает в себе отслеживание пальцев, вибро-инактивированную обратную связь, обнаружение положения и ориентацией руки в пространстве, а также беспроводным сопряжением.

Разработка подобной системы должна использовать уже существующие технологии, т.к. это позволит быстро создать частично работающий прототип и сразу выявить возможные проблемы, позволив без существенных потерь во времени сменить технологию на другую, которая обеспечит возможность продолжить разработку и тестирование устройства без существенного увеличения времени. Использование распространенных технологий позволит воспользоваться опытом людей, которые их уже применяли. Это могут быть как и простые описания принципов подключения, так и написанные библиотеки, позволяющие быстро разобраться с правильной обработкой поступающей информации. Так же, это

способствует тому, что технологии уже вышли в массовое использование, а значит, скорее всего, имеют небольшую стоимость, что положительно отразится на итоговой цене устройства.

В итоге, концептуальная модель должна иметь перечисленные характеристики:

- беспроводная связь по Bluetooth;
- легкая калибровка;
- наличие встроенного аккумулятора;
- небольшая стоимость, в сравнении с конкурентами.

Ключевыми особенностями разрабатываемого комплекса перчаток является захват и передача информации о сгибания суставов всех пяти пальцев с помощью датчиков изгиба. Для отслеживания ориентации и положения руки в пространстве, предполагается использовать трекеры HTC VIVE и датчики IMU. Для этого трекеры HTC VIVE должна быть закреплены на тыльной стороне перчатки и зафиксированы несколькими инфракрасными камерами, установленными в лаборатории, а датчики IMU - закреплены на каждом кончике пальцев. Для обеспечения обратной тактильной связи посредством вибрации, двигатели вибрации должны быть прикреплены к кончику каждого пальца. Обработка и передача данных будет происходить с помощью микроконтроллера на базе Arduino, закрепленного в районе запястья, который, в свою очередь, будет передавать все необходимые значения на компьютер. Для обмена данными между микроконтроллером Arduino и компьютером предполагается использовать технологию Bluetooth. Электропитание на перчатку будет подаваться с небольшой батареи, которая также будет закреплена в районе запястья.

2.2 Обзор hardware инструментария

Управляющим звеном программно-аппаратного комплекса будет является микроконтроллер на платформе Arduino. Данная платформа была выбрана по причине того, что она является наиболее удобной для прототипирования компактных аппаратно-программных комплексов. В зависимости от поставленных задач, используемых датчиков и дополнительных модулей, существует возможность выбрать подходящий микроконтроллер на данной платформе. В каждый микроконтроллер уже заранее прошит загрузчик, позволяющий загружать собственное ПО без использования стороннего программатора. Это положительно сказывается на времени отладки очередной версии программного обеспечения, т.к. для обновления ПО достаточно подключить микроконтроллер посредством USB подключения или с помощью переходника UART-USB к компьютеру. Переходник нужен в случае использования платы Arduino, которая не имеет USB выход и преобразователь UART. Подобные платы имеют меньшее энергопотребление, что увеличивает время работы при использовании аккумуляторной батареи, и меньшие размеры. Так же, удобство прототипирования обеспечивается тем, что в платы с микроконтроллерами, в зависимости от модификации, имеют достаточно большое количество цифровых и аналоговых выходов и выходов. Удобством использования платформы является то, что она имеет собственную IDE, которая облегчает разработку, тестирование, отладку и загрузку программ в микроконтроллер. Язык программирования, который использует Arduino – специально модифицированная версия C++.

В дальнейшем, для следующих прототипов и конечной версии перчатки, возможно использование другого микроконтроллера, который будет подобран по нужным параметрам: количеству аналоговых и цифровых выходов, количеству памяти для встроенного ПО и т.д. Это позволит

дополнительно снизить итоговую стоимость системы, т.к. платы Arduino, имеют большую стоимость, чем обычные микроконтроллеры без дополнительной обвязки.

Для прототипирования на данном этапе будет использована версия Arduino Mega. Данная версия обладает наибольшим количеством аналоговых и цифровых интерфейсов. В ходе прототипирования и разработки прототипа, будет возможно использование более миниатюрных версий Arduino меньшим количеством аналоговых и цифровых входов-выходов и меньшим объемом памяти. Возможно, также, отказаться от плат со встроенным UART преобразователем.

Таблица 1. Характеристики микроконтроллера на платформе Arduino

Микроконтроллер	ATmega2560
Рабочее напряжение	5В
Напряжение питания	5-12В
Цифровые входы/выходы	54 (из них 14 могут использоваться в качестве ШИМ-выходов)
Аналоговые входы	16
Максимальный ток одного вывода	40 мА
Flash-память	256 КБ (из которых 8 КБ используются загрузчиком)
SRAM	8 КБ
EEPROM	4 КБ
Тактовая частота	16 МГц

В Табл. 1 подробно перечислены необходимые характеристики.

Для отслеживания сгибания пальцев, предполагается использовать резистор изгиба FS-L-0095-103-ST (Модуль гибкости). Данный модуль работает посредством изменения своего сопротивления, которое изменяется в зависимости от уровня изгиба металлических секций внутри него. Тем самым, с помощью него возможно отслеживать различные отклонения двух поверхностей друг от друга. В случае сенсорной перчатки, установив данный модуль на поверхность пальцев, возможно получать информацию о том, насколько сильно был согнут тот или иной палец.

Таблица 2. Характеристики модуля гибкости

Модуль	FS-L-0095-103-ST
Активная длина	95 мм
Общая длина	112 мм
Толщина	0,43 мм
Мощность	0,5 Вт (1 Вт в пике)
Срок службы	не менее 1000000 изгибов
Сопротивление изначальное	10 кОм
Сопротивление в согнутом состоянии	60-110 кОм
Допуск сопротивления	±30%

Это позволит эмулировать движения суставов пальцев в виртуальной реальности. В состоянии покоя (когда модуль никак не изогнут), его сопротивление находится в районе 10 кОм. По мере изменения изгиба модуля, его сопротивление растет или уменьшается. Характеристики данного модуля см. в Табл.2.

Для передачи ориентации в пространстве будет использован Инерциальный модуль на 10 степеней свободы (IMU модуль). Если модуль гибкости позволяет передавать информацию о том, как сильно был согнут сустав пальца, то данный модуль позволит передавать информацию о том, в каком направлении происходит сгибание, т.к. пользователь имеет возможно перепозиционировать руку в пространстве, особенно это касается большого пальца руки, который самостоятельно может отклоняться от оси сгибания. Для каждого пальца будет использован свой модуль IMU. Это позволит точно отслеживать перемещение всей руки в пространстве, что, совместно с трекером HTC VIVE, даст целостную информацию о том, где находится рука, ладонная поверхность и все пальцы. В состав данного модуля входит три датчика: LIS331DLH, L3G4200D и LIS3MDL.

Каждый из них отвечает за следующие показатели:

- Трёхосный акселерометр LIS331DLH считывает ускорение относительно собственных осей X, Y и Z. Максимальная чувствительность 9.8×10-3 м/с². Диапазон измерений ±2/ ±4/ ±8 g.
- Трёхосный гироскоп L3G4200D считывает скорость вращения относительно собственных осей X, Y и Z. Максимальная чувствительность 8.7×10-3 град/сек. Диапазон измерений ±250/ ±500/ ±2000 град/сек.
- Трёхосный магнетометр / компас LIS3MDL считывает напряженность магнитного поля относительно собственных осей. Максимальная чувствительность 1.46×10-4 Гс. Диапазон измерений ±4/ ±8/ ±12/ ±16 Гс.

Характеристики модуля:

- Напряжение питания: 3,3–5 В.
- Потребляемый ток: менее 10 мА.
- Габариты: 25,4×25,4 мм.

Для симуляции прикосновения к предметам в виртуальной реальности будут использованы вибромоторы. Вибромоторы представляют собой двигатели с постоянными магнитами. Каждый вибромотр будет закреплен на кончике пальца, что позволит передавать информацию о касании предмета только на те пальцы, которые действительно коснулись его в виртуальной реальности. Чем сильнее предмет будет сжиматься, тем сильнее будет виброотдача, что позволит симулировать “выскальзывания” предметов в виртуальной реальности, если они были недостаточно сильно сжаты. Интенсивность вибрационной обратной связи зависит от частоты и амплитуды вибрационного сигнала. Частота и амплитуда прямо пропорциональны входному напряжению вибрационного двигателя и могут варьироваться в диапазоне от 50 Гц до 220 Гц. Для регулировки входного напряжения используется широтно-импульсный модулятор (ШИМ). Размеры каждого вибротора: 4 мм в толщину и 10 мм в диаметре.

Беспроводная передача данных будет осуществляться посредством технологии Bluetooth. Для осуществления соединения через Bluetooth установлен дополнительный приемопередающий модуль HC-06, который подключен к последовательному интерфейсу UART на Arduino. С помощью него будет осуществляться передача данных с датчиков гибкости и ускорения, и прием информации для датчиков вибрации, эмулирующих прикосновения к предметам. Данный модуль совместим с bluetooth-адаптерами которые поддерживают протокол SPP, а так же модуль поддерживает протокол Bluetooth v2.0+EDR, который поддерживается большинством современных устройств с беспроводной связью. Антенна модуля находится на его плате и выполнена в виде небольшой зигзагообразной полосы. За обработку сигналов отвечает микросхема BC417 серии BlueCore4-Ext фирмы Cambridge Silicon Radio, микросхема

флэш-памяти ES29LV800DB-70WGI производства Excel Semiconductor объемом 8 Мбит используется для хранения ПО и конфигураций. В зависимости от выбранного профиля, возможно понижать и повышать общую мощность модуля от 0,25мВт до 2,5 мВт. Максимальное энергопотребление в режиме передачи данных и сопряжении устройств - 50 мА. Питание модуля возможно от 3.3 до 5 вольт стабилизированного напряжения.

Управление модулем происходит с помощью UART интерфейса. В схеме используется делитель напряжения – для предотвращения возможного повреждения модуля.

Возможность контроля профиля энергопотребления модуля и малое потребление энергии в режиме соединения и поиска, позволяют использовать его в устройствах с аккумуляторным питанием.

Для питания комплекса будет использована литий-ионная аккумуляторная батарея объемом 2500 мАч. Подобный аккумулятор обеспечивает автономность в течение 3-6 часов. Использование аккумулятора позволит полностью отказаться от проводов. Использование более мощного аккумулятора нецелесообразно, т.к. возрастет итоговая масса комплекса, а сеансы более 3 часов большая редкость.

2.3 Выводы

Разработанная концепция сенсорной перчатки, отвечает всем поставленным спецификациям и может конкурировать с уже существующими аналогами. Использование модулей и инструментов, которые уже существуют, позволяет воспользоваться сторонним негативным и позитивным опытом и частью открытого программного кода. Рассмотренные модули доступны для покупки в России, что сокращает время разработки, т.к. нет необходимости ждать доставку необходимых модулей.

Глава 3. Разработка аппаратно-программного комплекса

3.1 Создание прототипа

При создании прототипа имеющиеся модули были протестированы по отдельности и совместно. Это позволило обнаружить недостатки существующей концепции сенсорной перчатки.

Первым был испытан модуль гибкости FS-L-0095-103-ST. Поведение модуля гибкости было проверено в диапазоне использования перчатки, который составляет от 0° до 90°, поскольку это приблизительный диапазон движения человеческих пальцев и соответствует полному разгибанию пальцев и их полному сгибанию. Измерения проводились в этом диапазоне с шагом 5 градусов. Сопротивление модуля, значения которого поступают в Arduino, в ходе данного эксперимента изменялось практически линейно.

Данные из эксперимента были оформлены в график (см. рис. 5), где ось Y – это сопротивление модуля, которое считывает микроконтроллер, а ось X – это угол, на который согнут модуль.

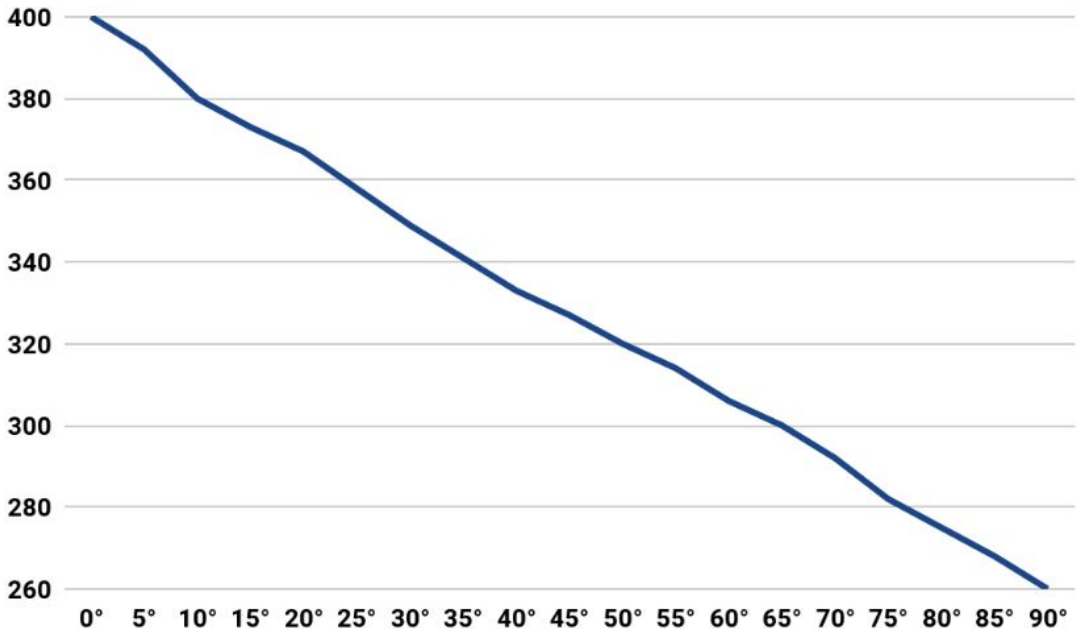


Рисунок 5 – Зависимость сопротивления модуля от угла изгиба

Затем, каждый датчик гибкости был закреплен на перчатке так, чтобы он был сверху каждого пальца руки. Данное расположение наиболее удачное, т.к. датчик гибкости с меньшей вероятностью может быть поврежден при сгибании. Были проведены новые измерения сопротивления каждого модуля посредством полного сгибания всех пяти пальцев. Всего, каждый палец был согнут и разогнут 10 раз. Полученные результаты можно наблюдать в таблице 3.

Таблица 3. Измерение сопротивления каждого модуля

	1		2		3		4		5	
	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°
1	451	380	478	399	390	235	502	443	450	381
2	449	378	481	402	391	238	501	440	453	382
3	448	379	480	401	392	236	501	441	451	380
4	449	378	481	400	390	235	502	439	449	381
5	452	381	479	403	393	236	501	442	452	382
6	450	380	480	398	391	234	500	441	450	382
7	451	380	478	401	391	235	501	446	451	380
8	449	381	480	402	392	233	502	444	452	381
9	451	379	478	400	390	235	498	443	453	382
10	450	381	479	399	389	237	499	443	449	381
Среднее	450	379,7	479,4	400,5	390,9	235,4	500,7	442,2	451	381,2

В таблице 3 по вертикали указан порядковый номер измерения, по горизонтали указан порядковый номер пальца, а ниже - значения углов сгиба пальца в градусах (значения были 0 и 90 градусов для каждого пальца). На

пересечениях вертикальных и горизонтальных строк указаны значения сопротивления, которые поступают с модуля гибкости.

На основе данных, полученных в ходе этого эксперимента, было выведено линейное уравнение для каждого из пальцев (см. Табл. 4).

Таблица 4. Линейное уравнение для каждого из пальцев

Большой палец	$xa = (450 - Ya) \div 68,56$
Указательный палец	$xb = (479,4 - Yb) \div 52,32$
Средний палец	$xc = (390,9 - Yc) \div 96,42$
Безымянный палец	$xd = (500,7 - Yd) \div 39,51$
Мизинец	$xf = (451 - Yf) \div 43,22$

Здесь Ya, Yb, Yc, Yd и Yf – это значения сопротивления модуля гибкости для каждого пальца, получаемые микроконтроллером Arduino, а xa, xb, xc, xd, xf – это значения, которые передаются во внешнее программное обеспечение.

Данные уравнения нужны для того, чтобы данные, поступающие во внешнюю систему, при одинаковом угле сгиба каждого пальца, имели одинаковые значения. Это позволяет калибровать модули гибкости только один раз, и обеспечивает постоянными выходными данными, где при сгибе любого пальца, например, на 60 градусов, система получит одинаковые выходные данные, которые будут соответствовать 60 градусам, т.е. обеспечивается полная линейная зависимость угла сгиба и выходных данных для каждого пальца.

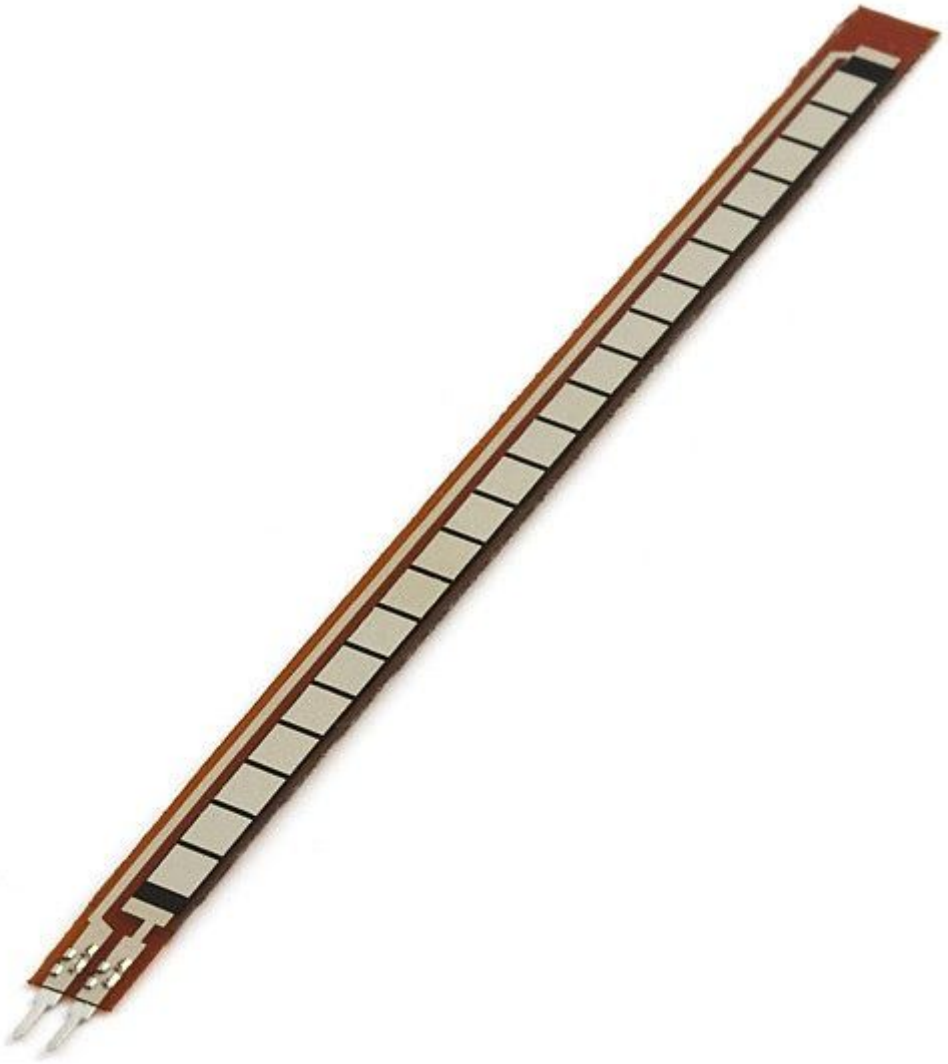


Рисунок 6 – Модуль гибкости FS-L-0095-103-ST

В конечном счете, модуль гибкости FS-L-0095-103-ST подходит для использования в прототипе сенсорной перчатки. Данные с модуля корректно принимаются контроллером Arduino, и, после некоторых преобразований, могут передаваться во внешнюю систему. Расположение модуля гибкости на внешней стороны пальцев обеспечивает корректное считывание сгибания и разгибания всех пяти пальцев.

Для считывания ориентации и координат ладони и кончиков пальцев было решено использовать инерциальный модуль на 10 степеней свободы (IMU модуль). Всего планировалось использовать 6 IMU модулей: 5 модулей должны были быть расположены на внешней стороне кончика каждого

пальца, а 1 модуль - на внешней стороне ладони. Модули на кончиках пальцев предполагалось использовать для более точного считывания движения пальцев рук. Модуль на внешней стороне ладони нужен для определения положения и ориентации ладони. Расположение модуля на кончиках пальцев с внешней стороны обусловлено тем, что данное расположение позволяет разместить на кончиках пальцев с внутренней стороны вибромоторы, которые отвечают за симуляцию тактильной обратной связи. Расположение IMU модуля для определения положения и ориентации ладони на внешней стороне ладони наиболее рационально, т.к. при таком расположении, модуль никак не ограничивает подвижность кисти и пальцев.

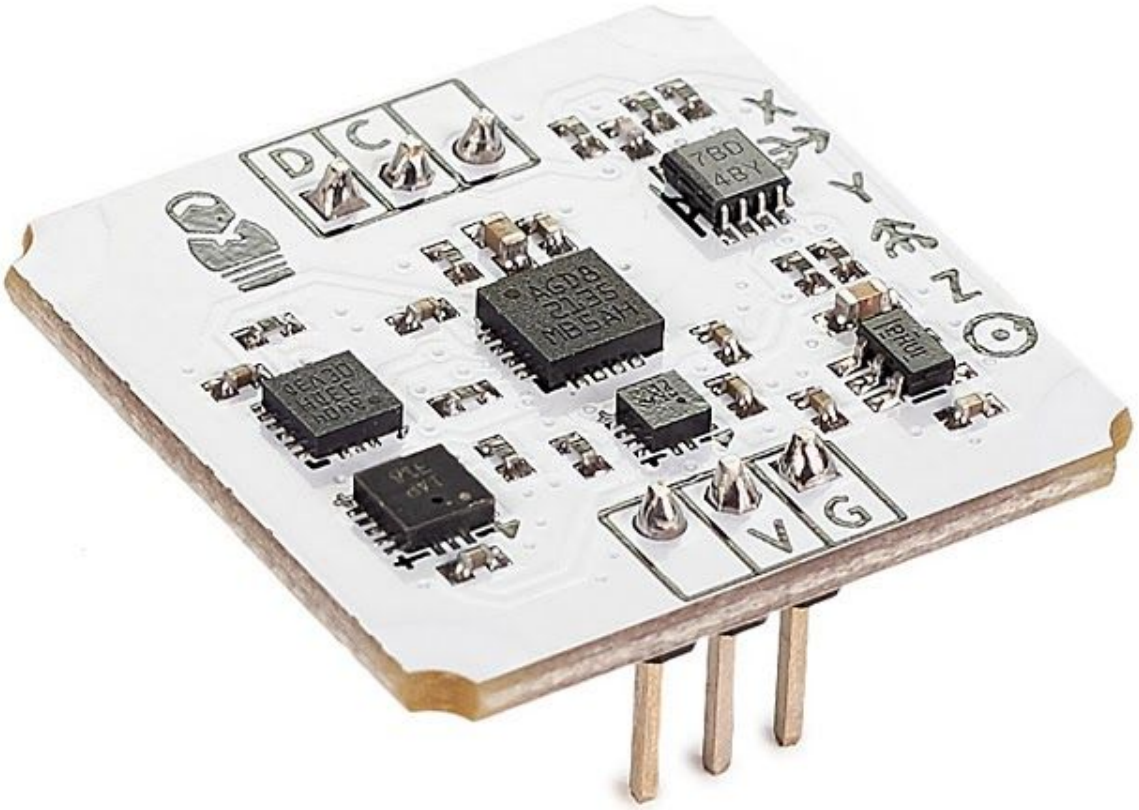


Рисунок 7 – IMU-сенсор на 10 степеней свободы

Для обработки данных с IMU модуля была использована библиотека Troyka-IMU [20]. Данный модуль содержит в себе барометр, акселерометр,

гироскоп и компас. Библиотека преобразовывает выходные значения со всех датчиков в удобные для использования функции. Наиболее удобной является функция определения ориентации в пространстве. Метод расчета заключается в обработке показаний датчиков акселерометра, гироскопа и компаса фильтром Маджвика, который рассчитывает положение объекта в пространстве с помощью кватернионов. За счет алгоритма на основе комплементарного фильтра, который реализует корректировку данных с гироскопа и акселерометра друг другом, обеспечивается точность данных на кратковременном промежутке и на длительном периоде. В свою очередь, использование кватернионов позволяет обойти так называемое складывание рамок (Gimbal lock) [21], но кватернионы менее наглядны, чем привычные углы Эйлера. При этом, большинство сторонних инструментов корректно работают кватернионами, что позволяет не приводить полученные значения к углам Эйлера.

В ходе экспериментов, было обнаружено, что IMU сенсор позволяет с большой точностью отслеживать изменение ориентации, т.е. движение вокруг осей X, Y и Z. Это позволяет с большой точность отслеживать изменение ориентации ладони. Однако, определение изменения координат ладони, т.е. перемещения ладони в пространстве, не удовлетворяет требованиям, т.к. уже через несколько секунд, из-за двойного интегрирования линейного ускорения и зашумленных данных с акселерометра, ошибка в определении координат начинается квадратично увеличиваться с каждым новым измерением [22]. Первоначальной причиной ошибки является, так называемый, дрифт акселерометра. В более масштабных условиях, для его устранения возможно использовать периодическую корректировку с помощью каких-либо дополнительных инструментов. В случае сенсорной перчатки, корректировка должна быть постоянной, т.к. требуется большая точность на малых расстояниях

перемещения. Итоговым решением для трекинга перемещений ладони, будут являтся трекеры HTC VIVE, которые позволяют корректно отслеживать перемещение различных частей тела, к которым они прикреплены. IMU модуль будет выступать в качестве модуля, отслеживающего ориентацию ладони.

Так как отслеживание координат исключительно с помощью IMU модуля невозможно, было принято решение отказаться от размещения данных модулей на кончиках пальцев. При этом данное решение не скажется на точности трекинга пальцев, т.к. модуль гибкости FS-L-0095-103-ST позволяет достаточно точно определять степень сгиба пальцев.

Были протестированы вибромоторы, необходимые для симуляции обратной тактильной связи. Они были установлены на кончике каждого пальца в районе подушечки пальца. Вибрация от вибромоторов, в зависимости от частоты, регулируемой с помощью Arduino, была или незаметна, или сильно ощутима. Arduino позволяет плавно или резко изменять силу вибрации, тем самым, достигается симуляция плавного и постепенного или резкого и сильного сжатия предмета.

В ходе тестирования, Bluetooth модуль HC-06, зарекомендовал себя с хорошей стороны. Данный модуль имеет возможность подключаться в режиме slave и master, поддерживает связь без потери данных до 10 метров в прямой видимости. При присутствии различных предметов между модулем и приемником компьютера, связь становится менее стабильной, но данный сценарий использования сенсорной перчатки не планируется, т.к. обычно, VR инструменты находятся в непосредственной близости от ПК, на котором происходит запуск приложений для виртуальной реальности. Микроконтроллер позволяет настраивать модуль HC-06 – изменять пароль для подключения, имя модуля и скорость передачи данных. Корректные

настройки модуля позволяют без потерь передавать всю информацию с микроконтроллера и принимать данные с ПК.

В прототипе была использована li-ion аккумуляторная батарея формата 18650 под наименованием INR18650-25R. Данный аккумулятор позволял поддерживать устройство в рабочем состоянии в течении 3-5 часов, в зависимости от интенсивности использования сенсорной перчатки. Было обнаружено, что при частой симуляции касания с помощью вибромоторов, заряд аккумулятора расходуется быстрее. Это связано с тем, что вибромоторы потребляют довольно большое количество энергии, при их использовании. Остальные компоненты системы расходуют энергию одинаково при любом сценарии использовании, т.к. замеры с модулей гибкости и IMU сенсора происходят постоянно, как и отправка данных по Bluetooth модулю. В конечном итоге, при обычном сценарии использования устройства, с частыми захватами и удержанием предметов, данный аккумулятор обеспечивает около 3 часов беспрерывной работы от одного заряда. Данное время примерно соответствует стандартному среднему времени работы с VR приложением, т.к. при работе с виртуальной реальностью более трех часов подряд, пользователи начинают испытывать чрезмерную усталость глаз, уменьшение концентрации и боль от давящих на голову очков виртуальной реальности.

Дополнительно, в прототип была добавлена плата заряда Li-ion аккумулятора TP4056. Данная плата обеспечивает правильный заряд аккумулятора и защищает его от переразряда и перезаряда.

После испытания всех компонентов, итоговый прототип сенсорной перчатки состоял из следующих компонентов:

- Плата Arduino Mega;
- Bluetooth модуль HC-06;
- Li-ion аккумулятор INR18650-25R;

- Плата заряда Li-ion аккумулятора TP4056;
- Модуль изгиба FS-L-0095-103-ST (в количестве 5 штук);
- Инерциальный модуль на 10 степеней свободы (IMU модуль);
- Вибромоторы (в количестве 5 штук).

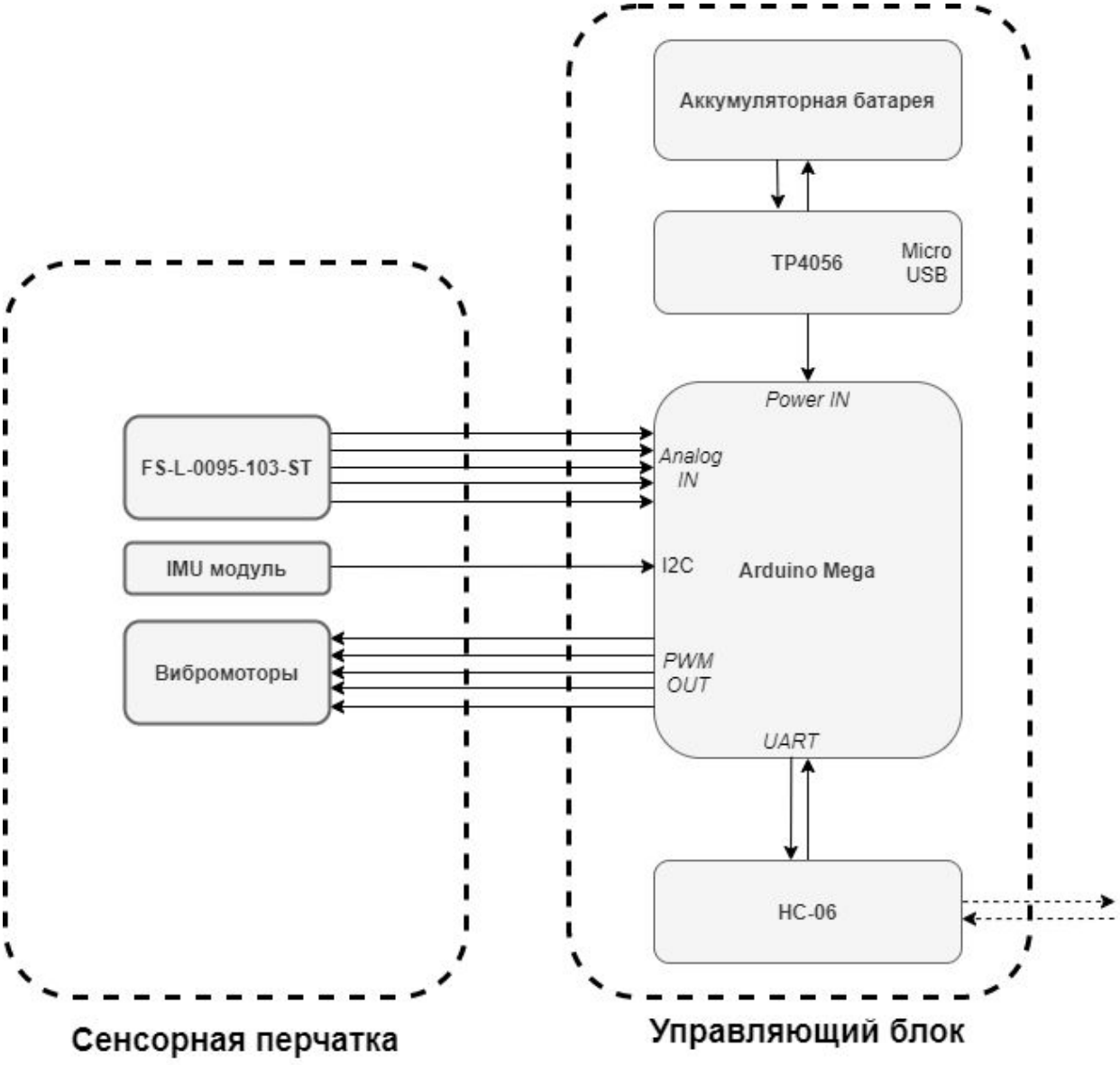


Рисунок 8 – Диаграмма с взаимодействием элементов устройства

Общая картина взаимодействия всех частей сенсорной перчатки представлена на рисунке 8 и выглядит следующим образом. Модули

разработанной сенсорной перчатки постоянно передают данные в Arduino, которая, в свою очередь, посредством bluetooth модуля HC-06 передает данные на ПК. Модули гибкости FS-L-0095-103-ST отслеживают сгибание всех пяти пальцев, а IMU модуль позволяет контролировать ориентацию ладони. При соприкосновении с предметами в виртуальной реальности, вибромоторы начинают вибрировать с разной частотой, которая зависит от того, насколько плотный контакт с предметом имеет пользователь. Если пользователь сжимает предмет с большей силой, то виброотклик становится более заметным. Аккумуляторная батарея питает устройство, а модуль TP4056 отслеживает критический разряд аккумулятора, не давая ему разрядиться полностью. При зарядке аккумулятора, плата TP4056, контролирует процесс заряда, отключая питание при полной зарядке аккумулятора.

Данные, которые Arduino передает по bluetooth могут быть интерпретированы практически любым трехмерным редактором или движком, после небольшой настройки. Данные о сгибании пальцев передаются в градусах, которые отсчитываются относительно плоскости, создаваемой ладонью. Для уменьшения зашумленности данных, шаг измерений равен 5 градусам. Это позволяет корректно отслеживать положение каждого пальца, уменьшая количество неверных значений. Данные об ориентации ладони передаются в кватернионах. Кватернионы широко используются в ПО для моделирования, робототехнике и игровых платформах. Это позволяет корректно обходить проблемы, которые возникают при использовании матриц или углов Эйлера.

В свою очередь Arduino, извне, получает только данные о том, произошло ли соприкосновение какого-либо пальца с предметом и насколько сильно было это соприкосновение: пользователь мог лишь слегка дотронуться до предмета, а мог его сильно сжать. Степень соприкосновения

принимается в виде чисел от 0 до 225, что позволяет широко контролировать степень виброотдачи.

На рисунке 9 схематично отображено расположение модулей на прототипе сенсорной перчатки.

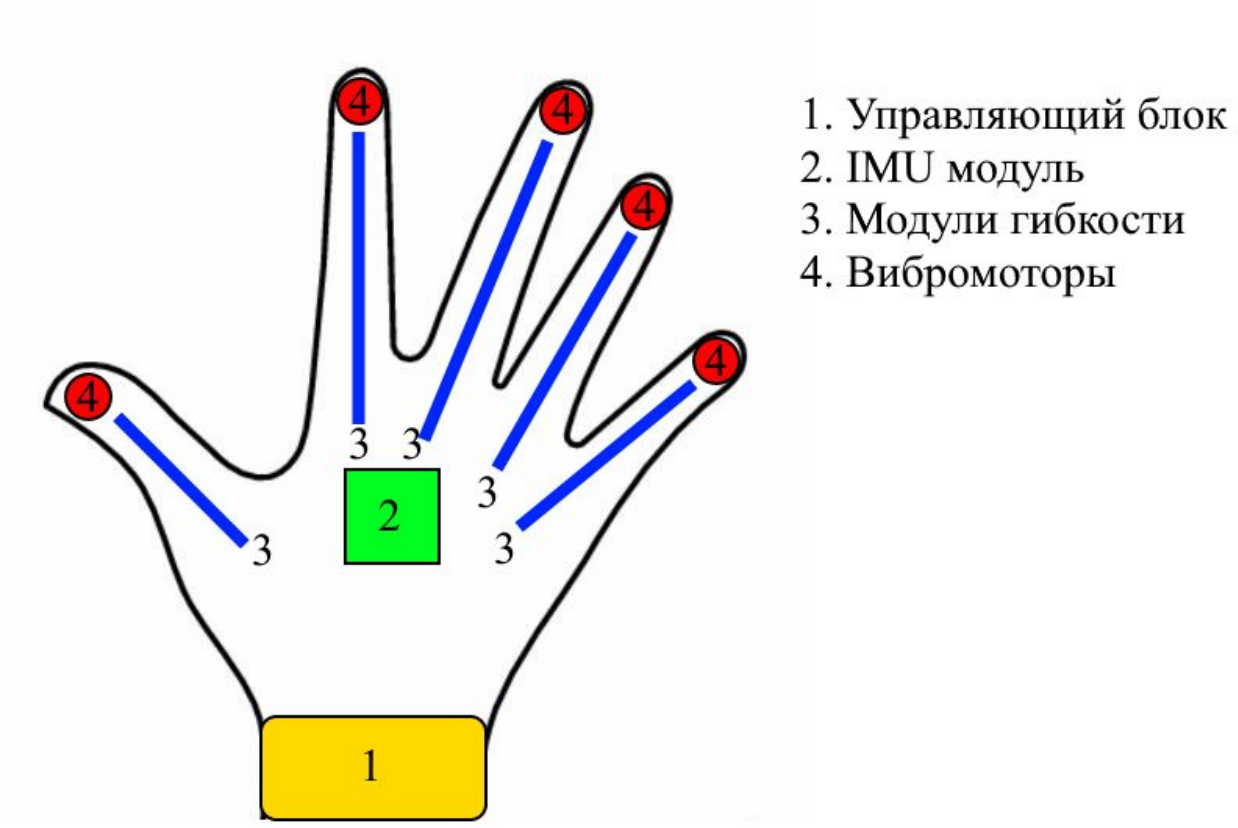


Рисунок 9 – Схематичное изображение расположения модулей

3.2 Прототипирование анимаций в трехмерном пространстве

В ходе проектирования и тестирования перчатки, для визуализации и контроля корректности данных, использовался скетч, написанный на ЯП Processing [23]. Processing – это инструментарий, который позволяет программировать различную анимацию. Данный инструментарий отлично подходит для прототипирования и создания простой анимации в трехмерном пространстве. Тонкая настройка, а также возможность на ходу изменять

параметры, позволяли быстро обнаруживать и решать проблемы, которые возникали в ходе прототипирования и тестирования сенсорной перчатки.

В скетч передавались данные о силе изгиба с резистора изгиба, расположенного на указательном пальце, и кватернионы с модуля IMU, расположенного на обратной стороне ладони. В результате, данные с модулей превращались в анимацию, которая в реальном времени схематично отображает положение руки, ее повороты и сгибание указательного пальца (см.рис. 10).

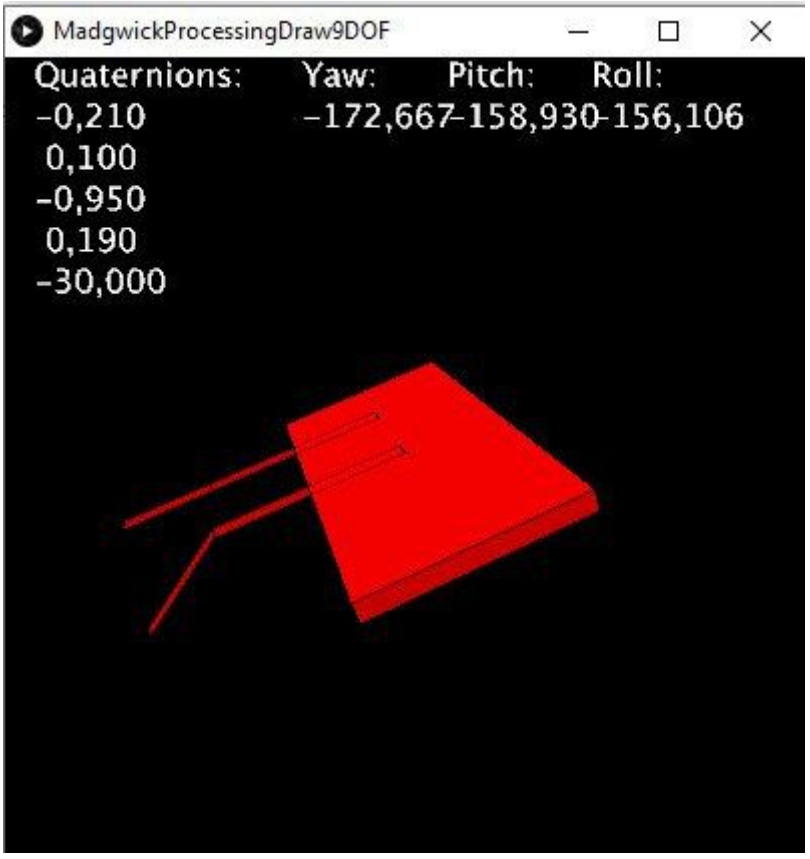


Рисунок 10 – Схематичное отображение положения руки, поворотов и сгибания указательного пальца

3.3 Выводы

В ходе разработки прототипа программно аппаратного комплекса, были протестированы все необходимые модули. Тестирование позволило обнаружить отрицательные стороны предлагаемой концепции, т.к. часть функционала невозможно реализовать в полной мере. При этом, создание

прототипа сенсорной перчатки оказалось успешным. Разработанный прототип позволяет отслеживать ориентацию ладони и контролировать степень сгиба каждого пальца. Использование скетчей на ЯП Processing позволило в ходе тестирования наглядно обрабатывать данные и решать проблемы, обнаруженные в ходе разработки прототипа сенсорной перчатки.

Глава 4. Обсуждение результатов

4.1 Результаты поворота и сгибания пальцев

4.1.1 Поворот ладони

Для отработки поворота ладони использовалась модифицированная библиотека TroykaIMU, позволяющая получать данные с акселерометра, гироскопа и магнитометра. С помощью фильтра Маджвика данные преобразовываются в ориентацию объекта в кватернионах.

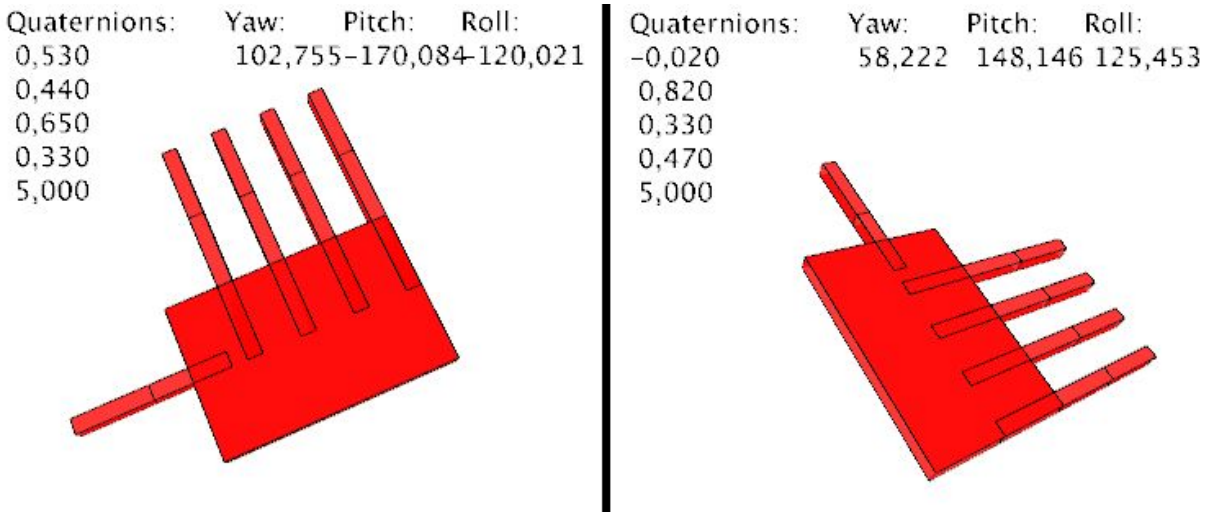


Рисунок 11 – Демонстрация работы поворота ладони

На рисунке 11 продемонстрирован поворот ладони одновременно по осям X, Y и Z. Использование кватернионов позволяет обходить ограничения, которые существуют при использовании углов Эйлера.

4.1.2 Сгибание поочерёдно каждого пальца

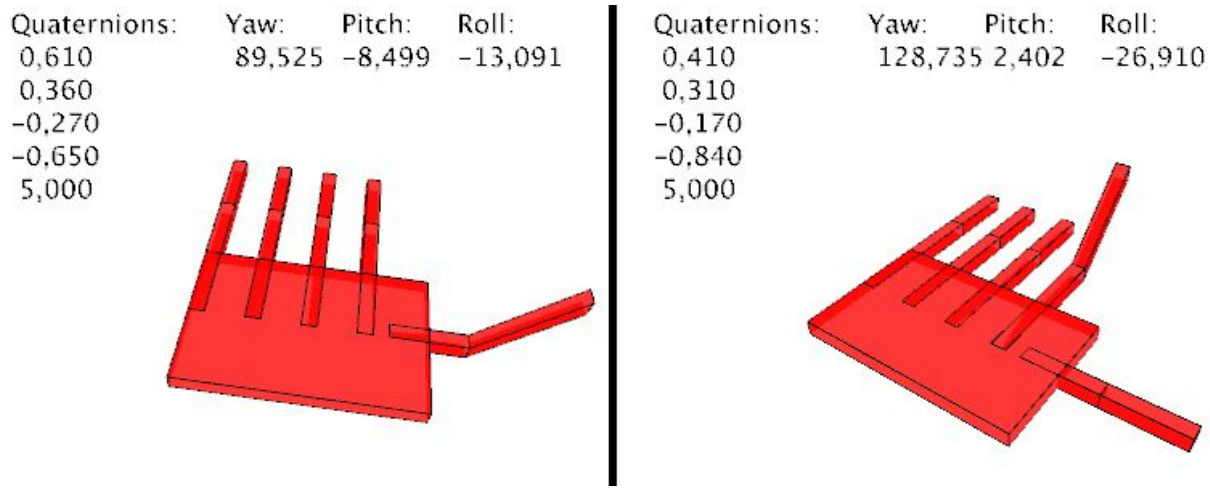


Рисунок 12 – Демонстрация сгибания поочерёдно большого и указательного пальцев

Разработанный аппаратно-программный комплекс корректно считывает сгибание отдельных пальцев поочередно. На рисунке 12 продемонстрирована возможность отдельного сгибания большого и указательных пальцев. Использование отдельного модуля гибкости для каждого пальца позволяет считывать сгибание пальцев независимо друг от друга.

4.1.3 Сгибание комбинаций пальцев

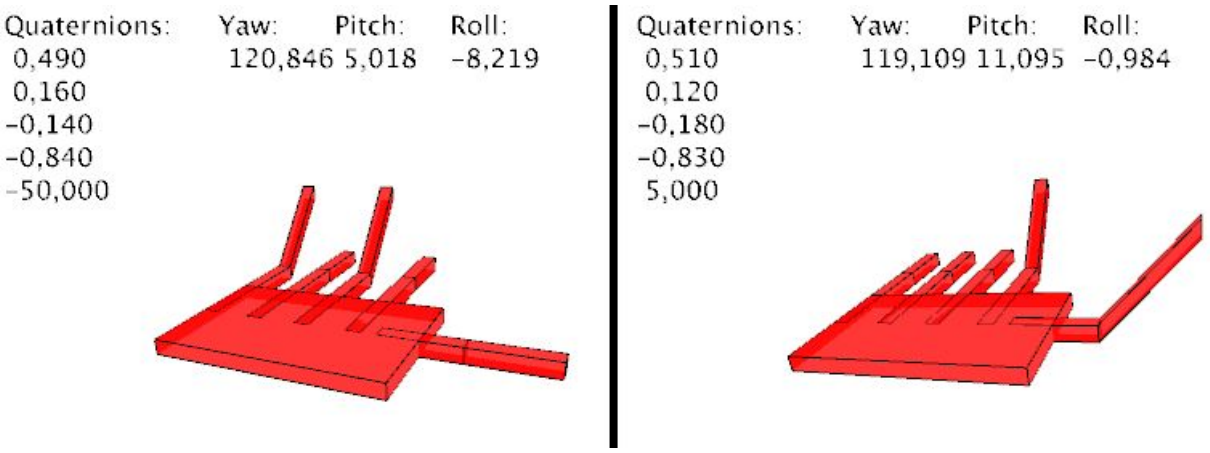


Рисунок 13 – Демонстрация сгибание комбинаций пальцев

На рисунке 13 продемонстрированы сгибания различных комбинаций пальце. Система корректно распознает одновременное сгибание двух и более пальцев.

4.1.4 Комбинирование различных положений и сгибов

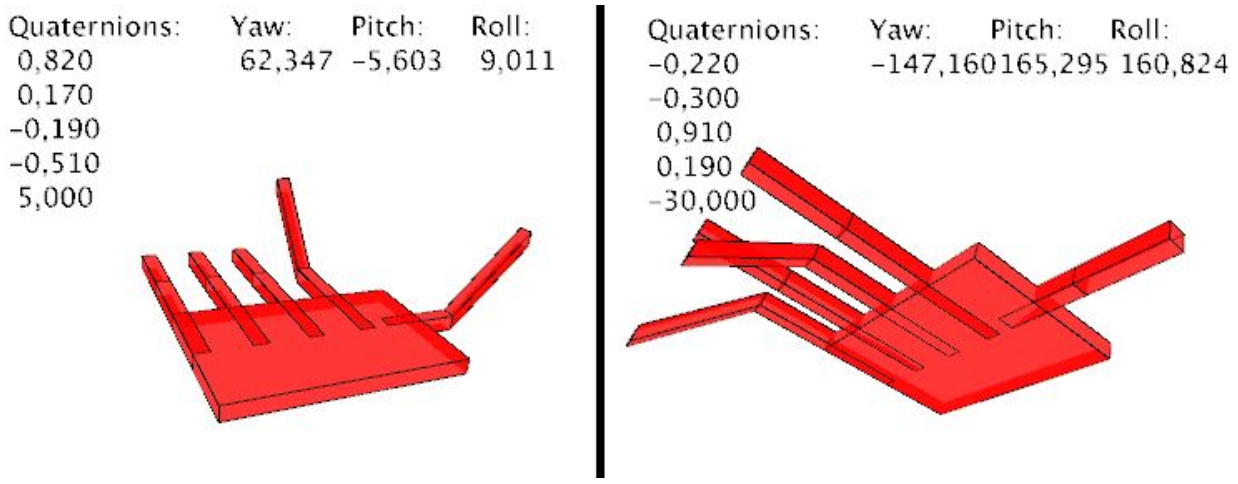


Рисунок 14 – Демонстрация комбинации поворота ладони и сгибания комбинаций пальцев

Прототип сенсорной перчатки корректно распознает различные комбинации поворота ладони и сгибания пальцев. Модули гибкости и IMU модуль независимо друг от друга передают данные об ориентации ладони и сгибе различных пальцев. На рисунке 14 продемонстрированы одновременный поворот и сгибание нескольких пальцев.

4.2 Отказоустойчивость прототипа перчатки

В ходе разработки и тестирования сенсорной перчатки, используемые модули показали высокую физическую надежность. Наиболее физически нагруженными частями устройства, являются модули изгиба FS-L-0095-103-ST. На заверению изготовителя данного модуля, его минимальный срок службы составляет не менее одного миллиона изгибов [24]. При этом, используемым модулям не свойственно накопление программных ошибок. Используемая li-ion аккумуляторная батарея

INR18650-25R имеет срок службы не менее 500 циклов разряда/заряда без потери 90% первоначальной емкости.

4.3 Итоговая стоимость пилотного устройства

Разработанный прототип, в сравнении с прямыми конкурентами, отличается более низкой итоговой стоимостью, не сильно уступая в функциональности. Итоговая стоимость складывается из цены каждого модуля устройства. В дальнейшем, возможно снижение стоимости за счет оптовой закупки необходимых модулей напрямую у производителя и использования другого микроконтроллера, который будет содержать только необходимое количество аналоговых и цифровых входов и выходов. Стоимость компонентов пилотного устройства в российской рознице на июнь 2020-го года показана в таблице 5. Итоговая стоимость устройства - 16240 рублей.

Таблица 5. Цена компонентов пилотного устройства

Плата Arduino Mega	3240 рублей
Bluetooth модуль HC-06	760 рублей
Li-ion аккумулятор INR18650-25R	400 рублей
Плата заряда Li-ion аккумулятора TP4056	100 рублей
Модуль изгиба FS-L-0095-103-ST	1940 рублей * 5 штук
IMU модуль	1290 рублей
Вибромоторы	150 рублей * 5 штук
Итоговая стоимость:	16240 рублей

4.4 Выводы

Созданный прототип сенсорной перчатки позволяет корректно распознавать движения пальцами и изменение ориентации ладони в любых комбинациях. Использование кватернионов является универсальным и удобным решением по отслеживанию ориентации. Движения пальцев имеет полное и независимое отслеживание, что увеличивает возможность применения созданного решения в играх, обучающих пособиях и т.д.

Время для отработки не превышает необходимое для real time взаимодействий. В ходе тестирования не были замечены проблемы с запаздыванием анимации или с задержкой сигнала.

Заключение

В ходе работы был разработан, собран и протестирован первый прототип сенсорной перчатки для симуляции тактильных ощущений. Создание прототипа устройства, заняло достаточно много времени. Были протестированы различные модули и датчики, воплощены несколько вариантов обработчиков данных. Итоговый прототип перчатки поддерживает отслеживания движения пальцев и ориентации ладони, а также симуляцию обратной тактильной связи с помощью вибрации.

В процессе выполнения работы, были решены следующие задачи:

1. Изучены современные решения симуляции обратной тактильной связи в виртуальной реальности присутствующие на рынке.
2. Протестированы технологии, использование которых возможно при создании собственного прототипа аппаратно-программного комплекса обратной связи в VR.
3. Создан прототип комплекса обратной связи в VR.

По предварительным результатам работы над диссертацией был представлен доклад [25] на Итоговой студенческой конференции КФУ 2020 года. Также подготовлена заявка от КФУ на регистрацию программы для ЭВМ и принята к публикации статья [26] в материалах Международного Форума “KAZAN DIGITAL WEEK – 2020”, с рейтингованием в Scopus и индексированием в ВАК.

Демонстрацию функционала разработанного инструмента можно посмотреть на канале Youtube [27], а исходный код доступен в репозитории Высшей школы ИТИС КФУ (ссылка на репозиторий в открытом доступе: http://gititis.kpfu.ru/BuVHasanov/Hand_in_VR.git) и может быть подвергнут экспериментам по развитию.

Список использованных источников

1. Родионов, Г.; Родионов, И. VR-тренажер электромеханика РЖД [Электронный документ] // Tengo Interactive. – 2016. – Режим доступа: https://tengointeractive.ru/electrician_vr, свободный (дата обращения 16.06.2020).
2. Shigapov, M.I; Kugurakova, V.V.; Zykov, E.Yu. Design of Digital Gloves with Feedback for VR [Текст] // IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS 2018). – Proceedings of 2018 IEEE East-West Design and Test Symposium. – 2018. – P. 604-608.
3. TeslaSuit: костюм, который меняет реальность [Электронный документ] // Chip. – 2018. – Режим доступа: https://ichip.ru/teslasuit-kostyum-kotoryjj-menyaet-realnost.html, свободный (дата обращения 16.06.2020).
4. Кугуракова, В.В.; Хафизов, М.Р.; Абрамов, В.Д.; Шараева, Р.А.; Газизов, Р.Р.; Зиннуров, Т.М.; Зинченко, С.В. Программа для обучения аппендэктомии в виртуальной реальности [Текст] / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020613665. Российская Федерация // заявитель и правообладатель Фед. гос. автоном. образоват. учреждение высш. образ. Казанский фед. ун-т. – 2020. – 1 с.
5. VR в психиатрии: когда надо включить воображение [Электронный документ] // DX.media. – 2018. – Режим доступа: https://dx.media/articles/how-it-works/vr-v-psikhiatrii-kogda-nado-vklyuchit-voobrazhenie/ свободный (дата обращения 16.06.2020).
6. Хижникова, А.Е.; Клочков, А.С.; Котов-Смоленский, А.М.; Супонева, Л.А.; Черникова, Л.А. Виртуальная реальность как метод

восстановления двигательной функции руки [Текст] // Клиническая неврология. – 2016. – Том 10. – No.3.

7. Goebl, W.; Palmer, C. Anticipatory motion in piano performance [Текст] // Journal of the Acoustical Society of America. – 2006. – V.120. – No.5. – P.3004.
8. Power glove user guide // El Segundo (CA). – Mattel, Inc. – 2007.
9. Mitobe, K.; Kaiga, T.; Yukawa, T.; Miura, T.; Tamamoto, H.; Rodgers, A.; Yoshimura, N. Development of a motion capture system for a hand using a magnetic three-dimensional position sensor [Текст] // Boston (MA): ACM SIGGRAPH Research posters: Motion capture and editing. – 2006. – P.102.
10. Fifth Dimension Technologies [Электронный документ] // Irvine (CA): 5DT Inc. – Режим доступа: https://5dt.com/5dt-data-glove-ultra/, свободный (дата обращения 16.06.2020).
11. Measurand Shape Advantage [Электронный ресурс] // Fredericton (New Brunswick). – Measurand Inc. – 2007. – Режим доступа: https://www.geotechnics.co.nz/assets/Uploads/Shape-Accel-Array-How-to-guide.pdf, свободный (дата обращения 16.06.2020).
12. Who’s using haptics? // Immersion Corp. – 2010.
13. Vhand Glove // DGTech Engineering Solutions.
14. Humanware S.R.L. [Электронный ресурс] // Humanware. – 1996..–2010. – Режим доступа: http://www.hmw.it/ свободный (дата обращения 16.06.2020).
15. DextaRobotics: Touch the Untouchable [Электронный ресурс] // DextaRobotics. – 2020. – Режим доступа: https://www.dextarobotics.com/ свободный (дата обращения 16.06.2020).
16. Noitom Hi5 [Электронный ресурс] // Noitom. – 2020. – Режим доступа: https://hi5vrglove.com/ свободный (дата обращения 16.06.2020).

17. CaptoGlove: Virtual Reality [Электронный ресурс] // CaptoGlove. – 2020. – Режим доступа: https://www.captoglove.com/ свободный (дата обращения 16.06.2020).
18. Senso: Glove and Suit [Электронный ресурс] // Senso. – 2020. – Режим доступа: https://senso.me/ свободный (дата обращения 16.06.2020).
19. Manus VR [Электронный ресурс] // Manus VR. – 2020. – Режим доступа: https://www.manus-vr.com/ свободный (дата обращения 16.06.2020).
20. Troyka-IMU [Электронный документ] / Arduino library // Amperka.ru. – 2018. – Режим доступа: https://github.com/amperka/Troyka-IMU, свободный (дата обращения 16.06.2020).
21. Басманов, Д. Кручу-верчу, запутать хочу: углы Эйлера и Gimbal lock [Электронный документ] // Хабр. – 2013. – Режим доступа: https://habr.com/ru/post/183116/, свободный (дата обращения 16.06.2020).
22. Сайфуллин, Д. Обзор методов и технологий отслеживания положения для виртуальной реальности [Электронный документ] / Хабр. – 2016. – Режим доступа: https://habr.com/ru/post/397757/, свободный (дата обращения 16.06.2020).
23. Processing [Электронный документ] // Processing foundation. – Режим доступа: https://processing.org/reference/, свободный (дата обращения 16.06.2020).
24. FS-L-0095-103-ST [Электронный документ] / Datasheet // digchip. – 2018. – Режим доступа: https://www.digchip.com/datasheets/download_datasheet.php?id=4057550&part-number=FS-L-0095-103-ST, свободный (дата обращения 16.06.2020).

25. Хасанов, Б.В. Аппаратно-программный комплекс обратной связи в VR [Текст] / Тезисы // Итоговая студенческая конференция КФУ. – Секция “Симуляционные и виртуальные технологии”. – 2020. – 5 с.
26. Хасанов, Б.В., Шигапов, М.Ф., Кугуракова, В.В. Проектирование и разработка аппаратно-программного комплекса симуляции обратной тактильной связи [Текст] // Международный Форум KAZAN DIGITAL WEEK. – 2020. – 5 с. – принята к публикации.
27. Хасанов, Б.В. Демонстрация работы сенсорной перчатки [Электронный документ] / Демонстрационное видео // Youtube. – 2020. – Режим доступа: https://youtu.be/QV0QgoKNUvc, свободный (дата обращения 18.06.2020).

Приложение

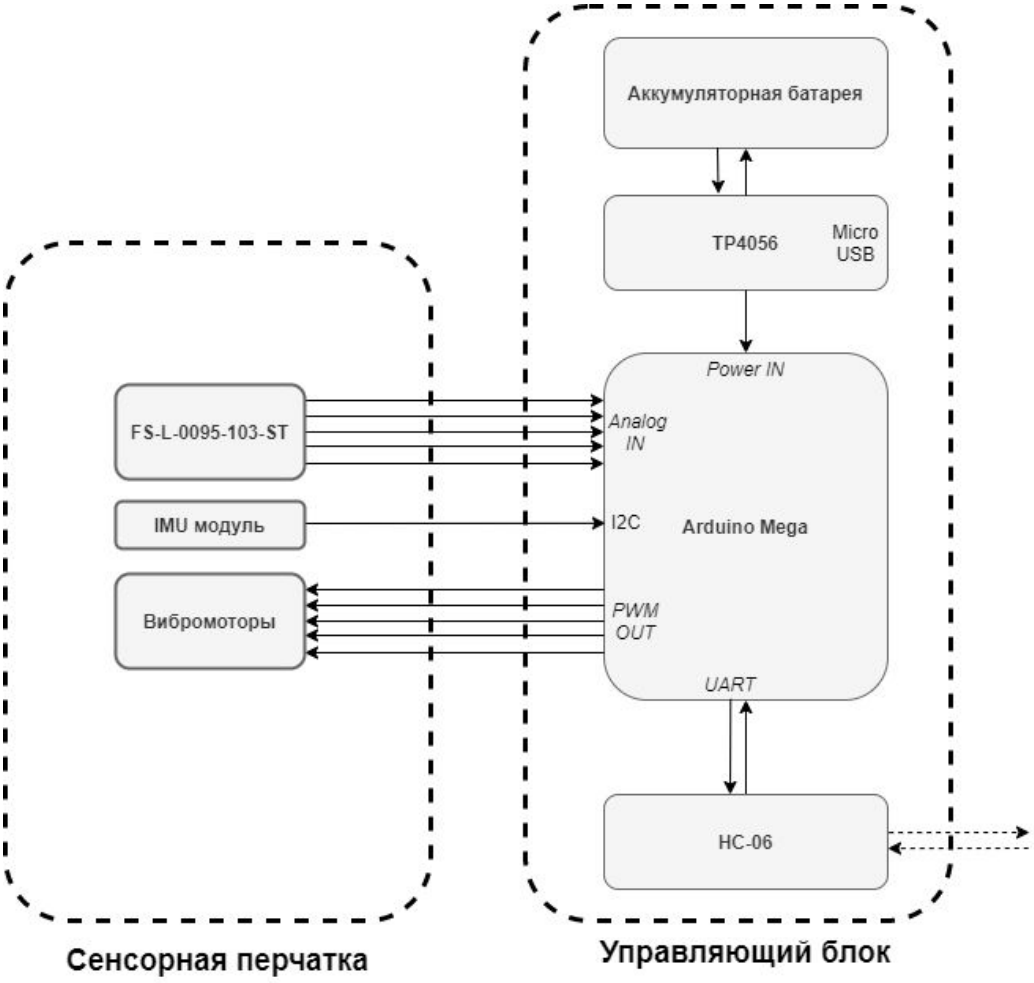
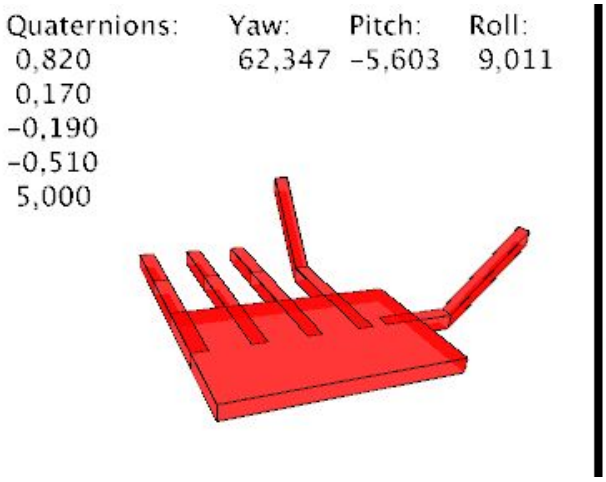
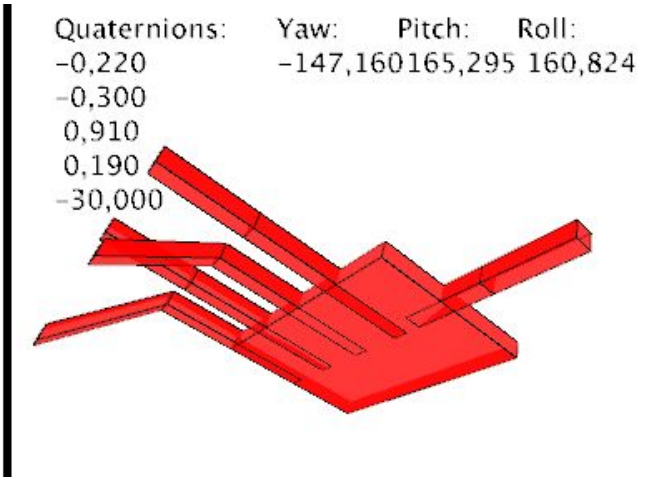
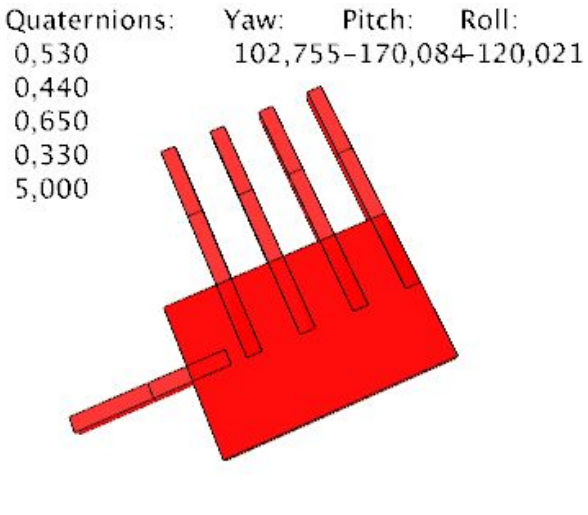
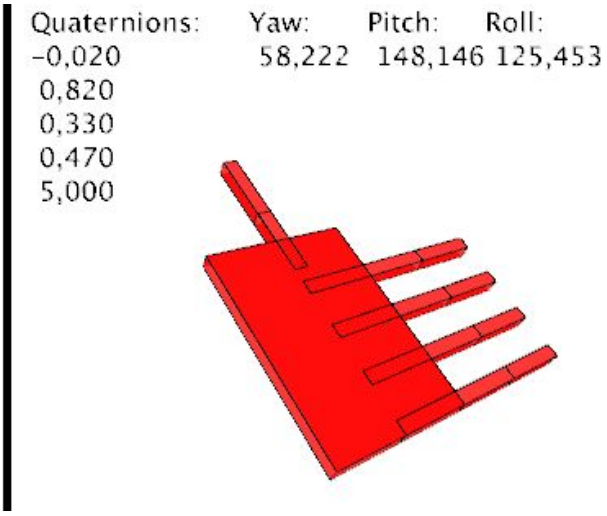
Приложение А. Фрагменты исходных кодов

```
#include <Wire.h>
#include <TroykaIMU.h>
// множитель фильтра
#define BETA 0.22
// создаём объект для фильтра Madgwick
Madgwick filter;
//объект для работы с акселерометром
Accelerometer accel;
//объект для работы с гироскопом
Gyroscope gyro;
//объект для работы с компасом
Compass compass;
// переменные для данных с гироскопа, акселерометра и компаса
float gx, gy, gz, ax, ay, az, mx, my, mz;
int gof=-50;
int izg;
int f;
//углы ориентации
float yaw, pitch, roll;
// переменная для хранения частоты выборок фильтра
float fps = 100;
// калибровочные значения компаса
const double compassCalibrationBias[3] = {
  -73.414,
  -2109.781,
  4204.083
};
const double compassCalibrationMatrix[3][3] = {
  {1.576, 0.057, -0.085},
  {0.097, 1.625, 0.027},
  {-0.038, -0.098, 1.621}
};
void setup()
{
  Serial.begin(115200);
```

```
  // инициализация акселерометра
  accel.begin();
  // инициализация гироскопа
  gyro.begin();
  // инициализация компаса
  compass.begin();
  // калибровка компаса
  compass.calibrateMatrix(compassCalibrationMatrix, compassCalibrationBias);
}

void loop()
{
  //текущее время
  unsigned long startMillis = millis();
  //данные с акселерометра в единицах G
  accel.readGXYZ(&ax, &ay, &az);
  //данные с гироскопа в радианах в секунду
  gyro.readRadPerSecXYZ(&gx, &gy, &gz);
  //данные с компаса в Гауссах
  compass.readCalibrateGaussXYZ(&mx, &my, &mz);
  //коэффициенты фильтра
  filter.setKoeff(fps, BETA);
  //обновление входных данных в фильтре
  filter.update(gx, gy, gz, ax, ay, az, mx, my, mz);

  f=analogRead(1);
  if(f>300){
      izg=5;
    }
  else if((f<300)&&(f>260)){
    izg=-30;
    }
  else{
      izg=-50;
    }
    delay(50);

    f=analogRead(2);
  if(f>300) {
      izg1=5;
```

```
    }
  else if((f<300)&&(f>260)){
    izg1=-30;
    }
  else{
      izg1=-50;
    }
    delay(50);

  if (Serial.available() > 0) {
    int val = Serial.read(); ь
    if (val == 's') {
      float q0, q1, q2, q3;
      filter.readQuaternions(&q0, &q1, &q2, &q3);
      // вывод кватернионов и изгиба в serial-порт
      Serial.print(q0);
      Serial.print(",");
      Serial.print(q1);
      Serial.print(",");
      Serial.print(q2);
      Serial.print(",");
      Serial.print(q3);
      Serial.print(",");
      Serial.println(izg);
    }
  }
  //затраченное время на обработку данных
  unsigned long deltaMillis = millis() - startMillis;
  // частота обработки фильтра
  fps = 1000 / deltaMillis;
}
```

Приложение В. Принципиальная схема устройства



Приложение С. Скриншоты работы устройства