

Всероссийский научно-технологический конкурс

“Большие вызовы”

Система дистанционного управления персональным компьютером при помощи движения глаз для интеграции детей с ограниченными возможностями в систему умного класса.

Участница:

Вольвач Дарья Олеговна,
МБОУ «Лицей №3», 9 класс

Научный руководитель:

Дуда Антон Васильевич,

Преподаватель ЦДНТТ

"Наследники Ползунова"

Аннотация

Целью проекта является разработка системы дистанционного управления персональным компьютером при помощи движения глаз для интеграции детей с ограниченными возможностями в систему умного класса.

Практической ценностью проекта является система, позволяющая улучшить социализацию детей с парализацией рук или их отсутствием, решив проблему обучения вместе с другими школьниками. Идея заключается в управлении персональным компьютером при помощи движения глаз. Потребителями данной системы станут дети с частичной или полной парализацией рук, а заказчиками – школы и образовательные центры.

Для достижения цели были поставлены задачи проекта: выбор и доработка алгоритма распознавания зрачка и его движения, разработка приложения для набора при помощи движения глаз, разработка приложения для изучения основ математики, создание устройства для захвата и передачи видеопотока.

При выполнении работы использованы такие методы: тестирование, конструирование, моделирование; и технологии: Python, OpenCV2, Raspberry PI.

Глава 1. Обзор литературы

1. Существующие системы и обзор их характеристик.

В современном обществе все большее внимание уделяется обучению подрастающего поколения – появляются умные школы, оснащенные новыми технологиями. Классы в таких школах тоже меняются. Все больше внедряется технология activity learning classroom [1], позволяющая детям лучше погружаться в учебную деятельность, при этом социализируя их. Проблема заключается в отсутствии возможности интеграции детей с ограниченными возможностями в общую среду. Дети с отсутствием рук или полной парализацией верхней части тела не имеют возможности обучаться вместе с остальными детьми, что сильно влияет на их социализацию. Для их интеграции понадобятся дополнительные устройства для взаимодействия с персональным компьютером.

При анализе компаний, по созданию систем умного класса, представленных на рынке, выяснилось, что спектр выпускаемых товаров не содержит подобных устройств. Были проанализированы следующие компании-поставщики частей умного класса: Prestigo [2], Eins AI [3] и SMART Technologies [4]. Компании-гиганты, такие как Samsung [5], HP [6] также заинтересованы в области образования – они также производят такую продукцию, однако не специализируются на ней, но решающих проблему устройств не производят.

На сегодняшний момент на рынке уже представлены решения проблемы дистанционного управления при помощи движения глаз, однако лишь некоторые устройства имеют нужное для умного класса качество – портативность. Именно оно нужно для работы с интерактивными досками в большом классе, чтобы ребенок мог взаимодействовать с доской на расстоянии, например, сидя за партой.

Все устройства приведены в таблице сравнения и выявления преимуществ (рис. 1). Из нее видно, что недостатком данных устройств является невозможность интеграции их в систему умного класса из-за отсутствия программного обеспечения для умного класса и высокой стоимости.

Итог анализа: нужно разработать портативное устройство средней ценовой категории и ПО для работы с ПК.

2. Виды микроконтроллеров и микрокомпьютеров и сравнение их характеристик.

Для создания портативного устройства было проведено сравнение характеристик микроконтроллеров Arduino и Raspberry Pi, и микрокомпьютеров NVIDIA Jetson Nano, ASUS Tinker Board и Intel NUC(рис. 2). Ни один микроконтроллер Arduino не позволял исполнять нужные команды и не имел возможности работать с языком python. Микрокомпьютеры имеют высокую стоимость и необоснованно с вычислительной точки зрения. Итогом сравнения стал выбор платы Raspberry Pi, а именно модели B+, так как она обладает большими возможностями и средней ценой, поддерживает язык Python, который был выбран для написания программного обеспечения из-за обширности сфер применений, большого количества библиотек и вычислительной мощности.

3. Выбор алгоритма и библиотек алгоритмов машинного зрения для Python и их сравнение.

Технологии Eye tracker основываются на решении нескольких задач – определение глаза и определения зрачка относительно глаза.

На данный момент существуют доступные алгоритмы определения положения глаза.

В открытом доступе находится огромное множество алгоритмов, которые можно разбить на несколько групп:

1. Определение глаза относительно лица, используя «предсказатель» лиц библиотеки OpenCV2. В открытом доступе были найдены проекты, использующие данную технологию по распознаванию всего лица [7], моргания [8] и границ глаза [9]. Однако этот метод является неэффективным в том случае, когда камера захватывает лишь часть лица. Такая технология хорошо подходит для непортативных устройств, однако не подходит для переносных решений.

2. Определение глаза с помощью каскадов Хаара, использующие встроенные в OpenCV2 классификаторы лица и глаз. Классификатор формируется на примитивах Хаара путём расчёта значений признаков. Для обучения на вход классификатора сначала подаётся набор «правильных» изображений с предварительно выделенной областью на изображении, дальше происходит перебор примитивов и расчёт значения признака. В интернете также есть проекты такой направленности. Например обучающая статья о работе с классификаторами OpenCV2 [10] и графическое приложение свободного доступа [11]. Такой подход является менее точным. Классификатор часто ошибается, что не позволяет использовать только его. Классификатор часто ошибается, что не позволяет использовать только его.

3. Определение зрачка относительно глаза, используя цветовые преобразования и кадрирование. Его суть заключается в нескольких преобразованиях. Цветное изображение преобразуется к серому, затем, с помощью порогового значения отбрасываются светлые участки изображения. Остается только темный участок. Такой подход очень распространен в любом проекте, для которого нужно выделить яркий контрастный объект на определенном участке фотографии. Зрачок и белок сильно различаются по цвету даже у людей со светлыми цветами глаз, что позволяет использовать его для поиска зрачка в любых случаях.

Глава 2. Создание системы дистанционного управления персональным компьютером при помощи движения глаз.

1. План создания системы

1) Создание программного обеспечения для устройства

А) Использование алгоритмов cv2 для захвата видеопотока с видеокамеры

Б) Создание алгоритма определения координат зрачка в пространстве

- В) Создание алгоритма передачи координат зрачка с портативного устройства на персональный компьютер
- 2) Создание программного обеспечения для персонального компьютера
 - А) Создание алгоритма получения координат
 - Б) Создание общего алгоритма выбора
 - В) Создание подсветки и курсора
 - Г) Создание приложения набора текста
 - Д) Создание приложения для изучения основ математики
- 3) Тестирование ПО для ПК
- 4) Создание электрической схемы
 - А) Анализ составляющих и их приобретение
 - Б) Сборка схемы
- 5) Создание 3D модели портативного устройства
 - А) Изменение готовой модели деталей формата .stl
 - Б) Подготовка 3D принтера к печати
 - В) Печать деталей
- 6) Сборка системы
- 7) Тестирование системы с различным освещением и выявление ошибок в ПО
 - А) Тестирование системы с дневным освещением
 - Б) Тестирование системы с дополнительным освещением
- 8) Консультации со специалистами из АГМУ по вопросам безопасного использования системы и снижения зрительной нагрузки.
 - А) Поиск и анализ исследований влияния инфракрасного излучения на человеческий глаз.
- 9) Исправление ошибок ПО
- 10) Заключительное тестирование

2. Ход работы

1) Создание программного обеспечения для устройства [12]

А) Использование алгоритмов cv2 для захвата видеопотока с видеокамеры

Данный алгоритм является первым и самым значимым для работы проекта. Первым шагом является импорт cv2. С помощью готовых функций создаётся последовательность команд, а именно – включение и “прогревание” камеры, получение массива изображений (видеопотока).

Б) Создание алгоритма распознавания зрачка в пространстве

Полученное изображение проходит несколько этапов обработки. Изначально оно размывается при помощи фильтра Гаусса, для снижения возможности идентификации посторонних шумов. Следующим шагом является преобразование изображения к серому цвету при помощи фильтра COLOR_BGR2GRAY(рис. 3). Этот шаг необходим для цветового однообразия и является связующим звеном между начальным и итоговым шагами. Завершающим шагом алгоритма является преобразование изображения к двум цветам – чёрному и белому, при помощи фильтра cv.threshold и ее аргумента THRESH_BINARY. Это преобразование помогает отделить черные участки нашего глаза от любых других. Задавая пороговое значение разделения – мы настраиваем точность преобразования. Это позволяет работать с разными цветами глаз. Сортируя все участки изображения, алгоритм выбирает самый большой – зрачок, отбрасывая при этом ресницы или брови, попавшие в кадр. С помощью встроенных функций определяется центр зрачка в двух координатах и две дополнительные переменные – ширина и высота выделенного объекта (рис. 4).

В) Создание алгоритма передачи координат зрачка с портативного устройства на персональный компьютер

Для создания алгоритма передачи координат зрачка с портативного устройства на персональный компьютер было принято решение сделать небольшой веб-сервер. Проведя анализ возможных решений, был выбран уже готовый веб-сервер - Apache HTTP-сервер. Следующим шагом была замена файла «index.html» на «index.php». Файл «index.php» обрабатывается в цикле на протяжении выполнения алгоритма распознавания меняет данные, обновляя страницу. На странице есть только 4 числа – координаты зрачка (x, y, h, w).

2) Создание программного обеспечения для персонального компьютера [12]

А) Создание алгоритма получения координат

Raspberry PI и компьютер должны быть подключены в одну сеть. С помощью библиотеки requests происходит получение html страницы. Используя библиотеку BeautifulSoup алгоритм производит парсинг страницы, тем самым выделяя координаты.

Б) Создание общего алгоритма выбора

Экран соотношением 2 к 1 делится на 9 секций, расположенных по всей площади изображения. Каждая ячейка также имеет соотношение 2 к 1. Каждую 0,01 секунды приложение принимает координаты зрачка и если взгляд человека был устремлен на одну ячейку в течение 0,2 секунды – происходит ее выбор. Количество кадров - 20 кадров в секунду. Первоначально время выбора одной ячейки было 0,1 сек. и 1 секунда для передачи координат. Количество кадров при первом тестировании – 10 кадров в секунду.

В) Создание подсветки и курсора

Экран уже разделен на секции, каждую из которых обозначается в коде вручную. На этапе отрисовки можно поменять цвет данной ячейки на цвет подсветки. Для этого хранится массив цветов - для каждой ячейки по ее порядковому номеру. При выборе одной из ячеек происходит

обновление массива. Новая ячейка приобретает цвет подсветки, а прошлая, которую можно определить по флагу, приобретает стандартный цвет. Так же, остаток от деления на постоянную величину изменения каждой координаты сглаживает рваное перемещение курсора. Сам курсор представлен перемещающимся кругом без заливки цвета подсветки.

Г) Создание приложения набора текста

Приложение создавалось для первого тестирования алгоритма распознавания, поэтому мало оптимизированно. Весь алфавит был разбит на группы - «страницы». На каждой странице располагалось 5 букв, для конечных групп были добавлены знаки препинания. Кроме отображения символов страниц также использовались управляющие символы – «закрыть», «вперед на страницу» и «назад на страницу» (рис. 5). Выражение сохранялось в файл и могло использоваться как обычный текстовый файл в дальнейшем. Этот этап стал значимым для проверки работы алгоритма и понимания удобства интерфейса.

Д) Создание приложения для изучения основ математики

Для создания интерактивной системы обучения (рис. 6) была создано ранговое деление на несколько уровней сложности: easy, medium и hard. Выбор сложности влияет на диапазон чисел в предлагаемых выражениях. На следующей странице пользователю предлагается выбрать математическое действие: умножение, деление, сумма, разность или тест (набор всех действий). Пользователь также может настроить для себя количество вопросов - 20, 40 и 100.

3) Тестирование ПО для ПК

Для проведения данного этапа из конструктора LEGO MINDSTORMS был собран прототип очков. В специальном углублении крепилась камера. Тестирование проводилось при помощи постороннего человека (рис. 7). Были выявлены ошибки в коде, которые приводили к аварийному

закрытию программы, также пользователь пожаловался на непонятный интерфейс и долгое время удержания взгляда.

4) Создание электронной схемы

А) Анализ составляющих и их приобретение

Составляющими являются камера A4 TECH USB 2.0 PC Camera J, wifi модуль, Raspberry PI model B+. Проводится закупка wifi модуля.

Б) Сборка схемы(рис. 8)

5) Создание 3D модели портативного устройства

А) Моделирование проходило в программе Kompas-3D. Модель была разработана на основе готового макета очков, который был дополнен креплением для установки на очки видеокамеры и видоизменен для минимизации объёма(рис. 9). Вместе с макетом очков был разработан макет корпуса для Raspberry Pi.

Б) Подготовка 3D принтера к печати

В) Печать деталей (рис. 10)

6) Сборка схемы

7) Тестирование системы с различным освещением и выявление ошибок в ПО

А) Тестирование системы с дневным освещением

Во время проведения испытаний, было выявлено, что работающая система ведет себя по-разному в зависимости от времени суток. Было решено приобрести небольшой инфракрасный датчик для освещения глаза, для выполнения этого шага, нужна консультация специалиста.

Б) Тестирование системы с дополнительным освещением

При использовании дополнительных источников обычного освещения улучшений выявлено не было. Работа алгоритма все еще зависела от дневного освещения.

8) Консультации со специалистами из АГМУ по вопросам безопасного использования системы и снижения зрительной нагрузки.

А) Поиск и анализ исследований влияния инфракрасного излучения(ИК) на человеческий глаз

Специалист посоветовал нам исследование Дэвида Х. Слайни [13].

Так же в устройстве tobii Eye Tracker 4с использовались волны длиной 850нм [14]. В интернете было найдено несколько статей на тему инфракрасного излучения. Например, статья о влиянии ИК излучения на организм человека [15] и статья о работе ИК камер [16]. Исследование ИК в фотографировании [17] и описание датчиков для ночного видения [18]. В книге «Магнитотерапия. Теоретические основы и практическое применение» описана линейка устройств «СНАГ». Длина волн «СНАГ 852» и «СНАГ 855» достигает $850 \pm \text{нм}$. [19]. Однозначного решения по поводу ИК освещения не было принято. Нужны консультации с более компетентными специалистами.

9) Заключительное тестирование

В ходе заключительного тестирования (рис. 11-12) не было выявлено ошибок в программном обеспечении. Интерфейс был интуитивно понятен пользователю. Система работала исправно.

Глава 3. Подведение итогов

1. Итог тестирования системы

Система является рабочей и практичной, такой способ управления эффективен.

2. Перспектива развития проекта

В дальнейшем планируется создание дополнительных ресурсов для работы с ПК, улучшение точности и оптимизация алгоритма, уменьшение массы и объема переносимого устройства для повышения удобства использования. Добавление возможностей работать через веб-сервисы. Выход на международный рынок. Создание дополнительных приложений узкой направленности для работы, добавление автоматической калибровки.

Выводы:

1. Создана система дистанционного управления персональным компьютером для людей с ограниченными возможностями при помощи движения глаз.
2. Разработана система обучения математики для людей с ограниченными возможностями, обучающимися в младшей школе.
3. Создано приложение для набора текста.
4. Выявлена необходимость в дополнительном (ИК) освещении.

Список использованной литературы

- 1 – Active Learning Classrooms [Электронный ресурс]
<https://www.saltise.ca/innovations/active-learning-classrooms/> (дата обращения: 09.02.2020)
- 2 – MultiBoard [Электронный ресурс] <https://multiboard.prestigio.ru/> (дата обращения: 13.02.2020)
- 3 – Your Classroom. Reinvented. [Электронный ресурс] <https://www.eins.ai/> (дата обращения: 13.02.2020)
- 4 – Create inspiring classroom experiences [Электронный ресурс]
<https://www.smarttech.com/> (дата обращения: 14.02.2020)
- 5 – Комплексные аудиторные занятия [Электронный ресурс]
<https://www.samsung.com/ru/business/education-solutions/> (дата обращения: 14.02.2020)
- 6 – Sustainable Impact [Электронный ресурс] https://www8.hp.com/us/en/hp-information/global-citizenship/society/qualityeducation.html?jumpid=reg_r1002_usen_c-001_title_r0004 (дата обращения: 14.02.2020)
- 7 – Нестеров П. Сегментация лица на селфи без нейросетей [Электронный ресурс] <https://habr.com/ru/company/ods/blog/336594/> (дата обращения: 20.02.2020)
- 8 – Олексюк А. Как мы спасали глаза с OpenCV [Электронный ресурс]
<https://habr.com/ru/company/eyedoc/blog/215771/> (дата обращения: 22.02.2020)
- 9 – Роузброк. A Eye blink detection with OpenCV, Python, and dlib [Электронный ресурс] <https://www.pyimagesearch.com/2017/04/24/eye-blink-detection-opencv-python-dlib/> (дата обращения: 26.02.2020)
- 10 – Вингейт Д. Face and Eye Detection using OpenCV and Python (cv2) [Электронный ресурс] <https://www.engineeringbigdata.com/face-and-eye-detection-using-opencv-and-python-cv2/> (дата обращения: 26.02.2020)

11 – Eye-blink-detector[Электронный ресурс] <https://github.com/dilawar/eye-blink-detector> (дата обращения: 10.02.2020)

12 – GitHub-репозиторий проекта [Электронный ресурс] https://github.com/Kim-KimSenpai/big_challenges (дата обращения: 09.04.2020)

13 – Слайны Х. Д. [Электронный ресурс]

<http://base.safework.ru/iloenc?doc&nd=857100220&nh=1> (дата обращения: 20.02.2020)

14 – Tobii Eye Tracker 4C [Электронный ресурс] <https://gaming.tobii.com/tobii-eye-tracker-4c/> (дата обращения: 20.02.2020)

15 – КАК РАБОТАЮТ ИК-КАМЕРЫ? [Электронный ресурс]

<https://www.hitsec.ru/article/ir-kamera.htm> (дата обращения: 15.02.2020)

16 – Инфракрасное излучение: влияние на организм человека [Электронный ресурс] <http://05.rospotrebnadzor.ru/371/->

[/asset_publisher/m7XL/content/%D0%B8%D0%BD%D1%84%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B5-](http://05.rospotrebnadzor.ru/asset_publisher/m7XL/content/%D0%B8%D0%BD%D1%84%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B5-%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%3A-%D0%B2%D0%BB%D0%B8%D1%8F%D0%BD%D0%B8%D0%B5-%D0%BD%D0%B0-%D0%BE%D1%80%D0%B3%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%BC-%D1%87%D0%B5%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D0%BA%D0%B0)

[/asset_publisher/m7XL/content/%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%3A-](http://05.rospotrebnadzor.ru/asset_publisher/m7XL/content/%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%3A-%D0%B2%D0%BB%D0%B8%D1%8F%D0%BD%D0%B8%D0%B5-%D0%BD%D0%B0-%D0%BE%D1%80%D0%B3%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%BC-%D1%87%D0%B5%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D0%BA%D0%B0)

[/asset_publisher/m7XL/content/%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%3A-](http://05.rospotrebnadzor.ru/asset_publisher/m7XL/content/%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%3A-%D0%B2%D0%BB%D0%B8%D1%8F%D0%BD%D0%B8%D0%B5-%D0%BD%D0%B0-%D0%BE%D1%80%D0%B3%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%BC-%D1%87%D0%B5%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D0%BA%D0%B0)

[/asset_publisher/m7XL/content/%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%3A-](http://05.rospotrebnadzor.ru/asset_publisher/m7XL/content/%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%3A-%D0%B2%D0%BB%D0%B8%D1%8F%D0%BD%D0%B8%D0%B5-%D0%BD%D0%B0-%D0%BE%D1%80%D0%B3%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%BC-%D1%87%D0%B5%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D0%BA%D0%B0)

[/asset_publisher/m7XL/content/%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%3A-](http://05.rospotrebnadzor.ru/asset_publisher/m7XL/content/%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%3A-%D0%B2%D0%BB%D0%B8%D1%8F%D0%BD%D0%B8%D0%B5-%D0%BD%D0%B0-%D0%BE%D1%80%D0%B3%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%BC-%D1%87%D0%B5%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D0%BA%D0%B0)

[/asset_publisher/m7XL/content/%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%3A-](http://05.rospotrebnadzor.ru/asset_publisher/m7XL/content/%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%3A-%D0%B2%D0%BB%D0%B8%D1%8F%D0%BD%D0%B8%D0%B5-%D0%BD%D0%B0-%D0%BE%D1%80%D0%B3%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%BC-%D1%87%D0%B5%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D0%BA%D0%B0)

17 – Пятьдесят оттенков инфракрасного [Электронный ресурс]

<https://habr.com/ru/post/221649/> (дата обращения: 27.02.2020)

18 – Сысоева С. Датчики. Актуальные технологии и применения датчиков

автомобильных систем активной безопасности. Часть 7. Активные ИК системы:

лидары, системы ночного видения, 3d - камеры [Электронный ресурс] <https://kit->

e.ru/articles/sensor/2007_4_19.php (дата обращения: 25.02.2020)

19 – Улащик В., Плетнев А., Войченко Н., Плетнев С. Магнитотерапия.

Теоретические основы и практическое применение/ Улащик В., Плетнев А., Войченко Н., Плетнев С. – Минск: Беларуская Навука, 2015. – 379 с.

20 – Teaching in an Active Learning Classroom (ALC) [Электронный ресурс]

<https://cei.umn.edu/teaching-active-learning-classroom-alc> (дата обращения: 09.02.2020)

21 – Python 3.8.2 documentation [Электронный ресурс] <https://docs.python.org/3/> (дата обращения: 27.02.2020)

22 – OpenCV 2.4.13.7 documentation [Электронный ресурс]

<https://docs.opencv.org/2.4/> (дата обращения: 27.02.2020)

23 – Шпаргалка по OpenCV — Python [Электронный ресурс]

<https://tproger.ru/translations/opencv-python-guide/> - краткое содержание функций opencv2 (дата обращения: 27.02.2020)

24 – Trained model files for dlib example programs [Электронный ресурс]

<https://github.com/davisking/dlib-models> - документация библиотеки dlib (дата обращения: 27.02.2020)

Приложение 1

Аналог	Портативность	Софт для умного класса	Цена, ₹	Целевая группа
Eye Tracker 4C	Нет	Недостаток	14500	Геймеры
TM5 mini	Нет	Недостаток	258000	Люди с ограниченными возможностями
Tobii Pro Glasses 2	Есть	Недостаток	600000 - 1800000	Исследователи, маркетологи, ученые, статисты
Pupil Invisible	Есть	Недостаток	332363/380888	
Pupil Core	Есть	Недостаток, открытый исходный код	127405	
Продукты компании Argus Science	Есть	Недостаток	Нет в свободном доступе	

рис. 1

Микроконтролер	Функционал	Кол-во ядер	Цена, ₹
Arduino	микроконтроллер	1	890
Raspberry Pi	микрокомпьютер	4	3999
NVIDIA Jetson Nano	микрокомпьютер	4	9990
ASUS Tinker Board	микрокомпьютер	4	4512
Intel NUC	микрокомпьютер	4	7160

рис. 2



рис. 3

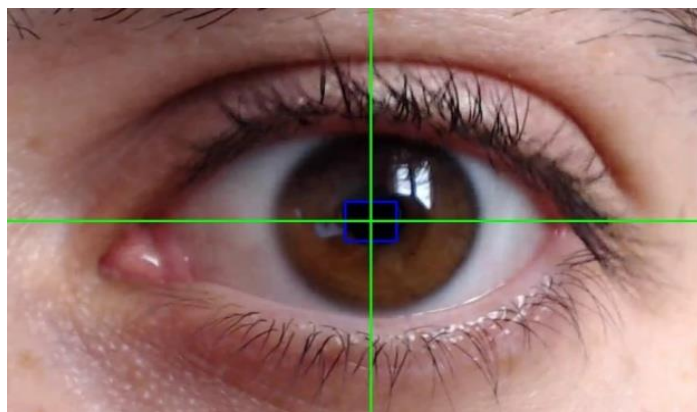


рис. 4

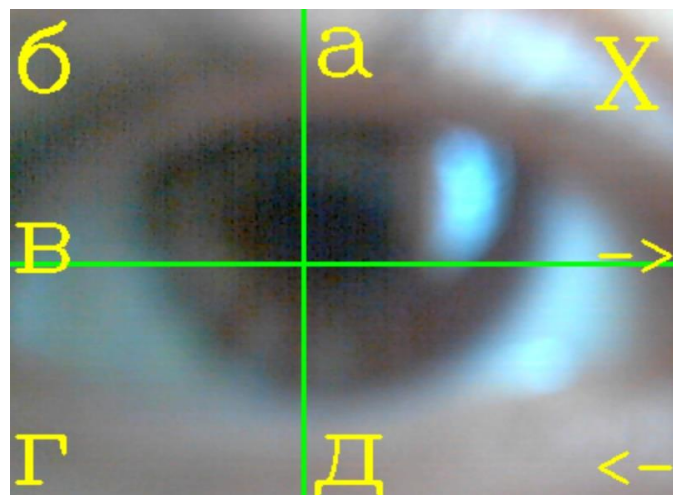


рис. 5

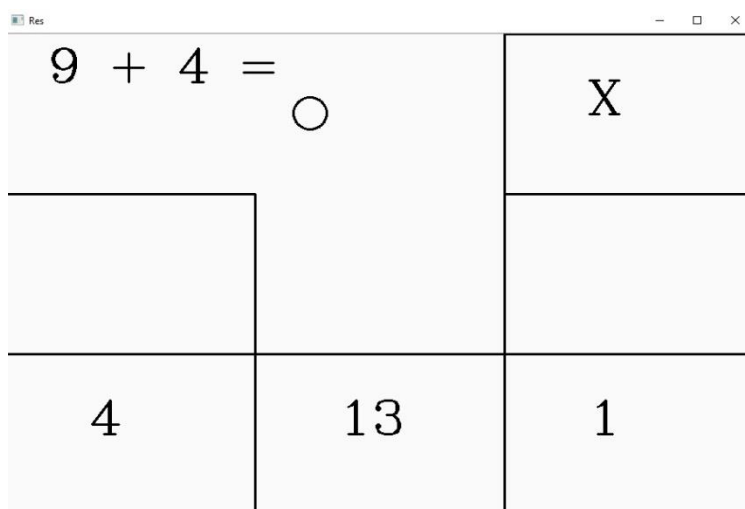


рис. 6



рис. 7

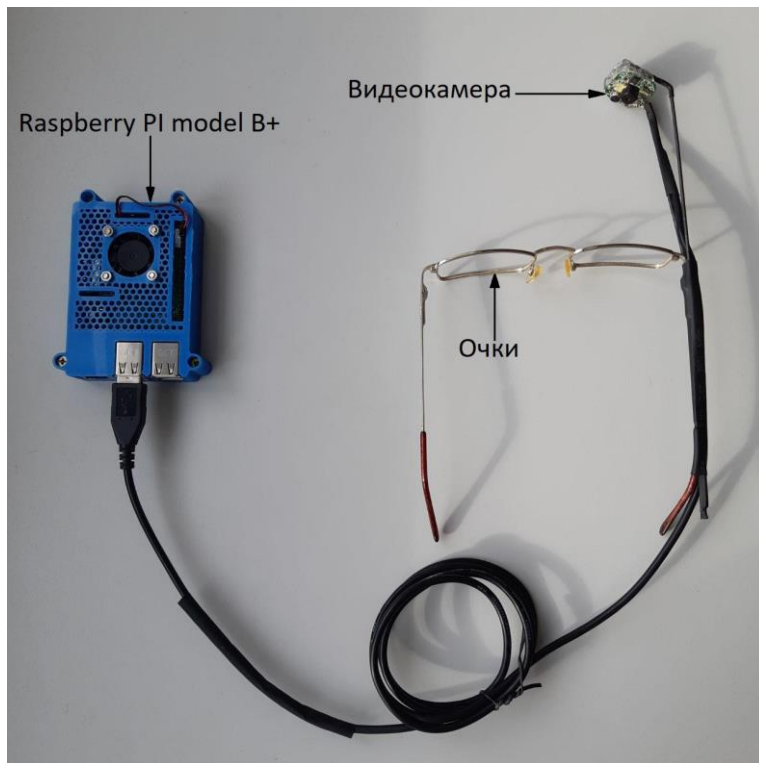


рис. 8



рис. 9



рис. 10

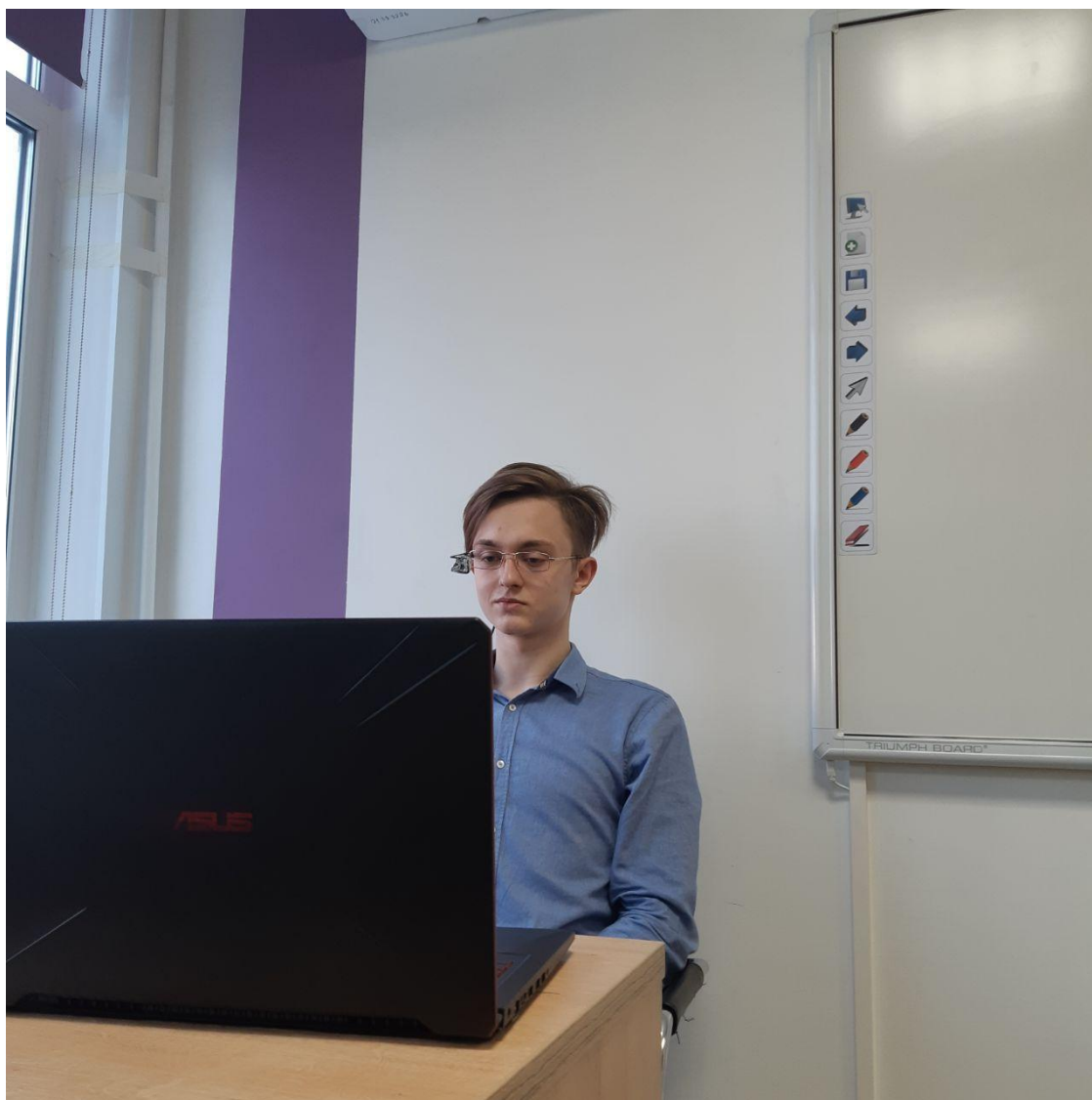


рис. 11

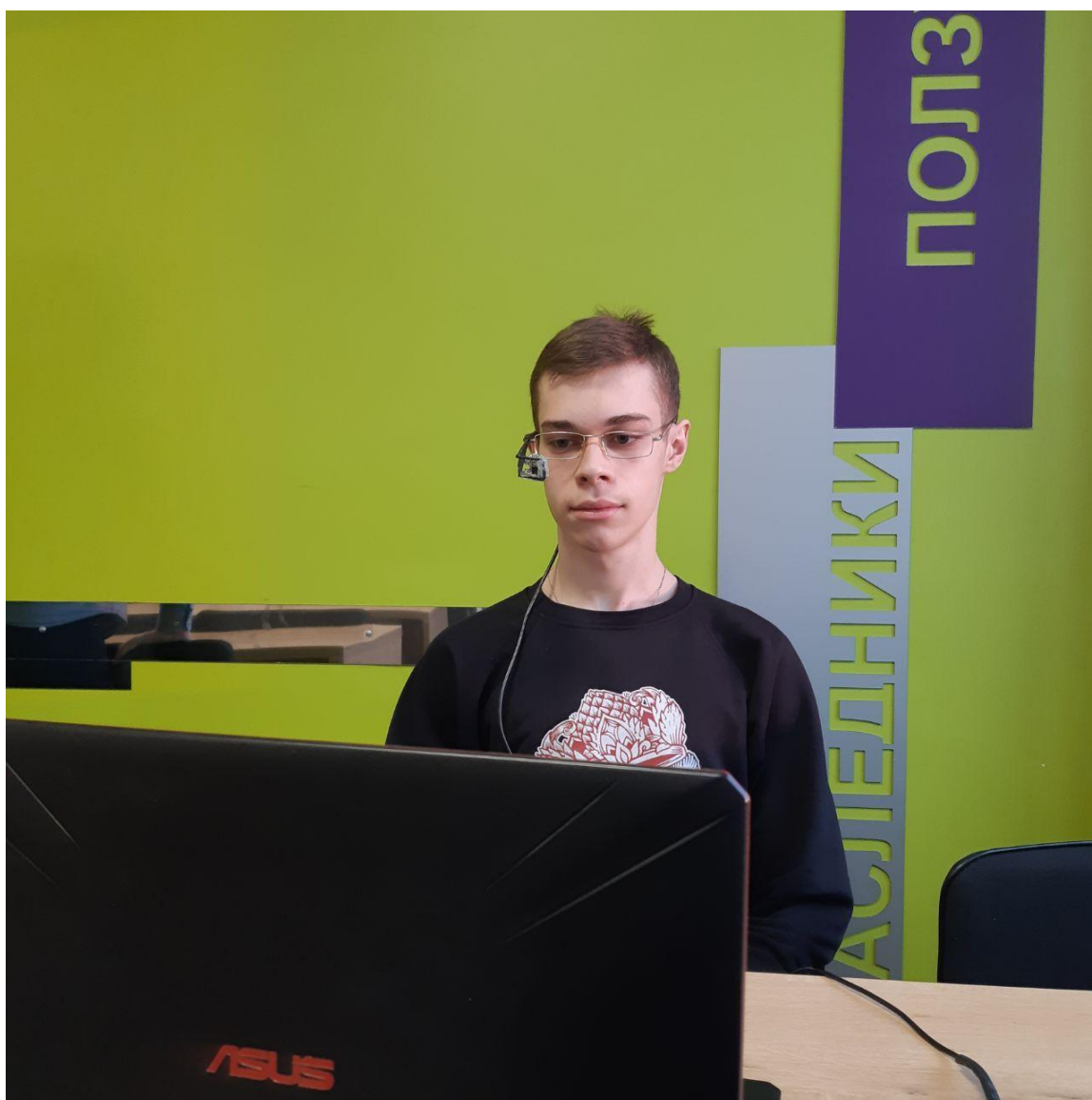


рис. 12