



КОМПЛЕКС СРЕДСТВ НАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УСЛУГ ИММЕРСИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЛЮДЕЙ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

К. А. Кузнецов, М. Д. Леонова, А. С. А Мутханна*

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Адрес для переписки: ammarexpress@gmail.com

Аннотация—Передача иммерсивных технологий в скором времени сможет преобразить человеческую жизнь, позволив реализовать взаимодействия H2M в полной мере и с новым качеством. Люди смогут обезопасить себя от вредных производств, быстрее обучаться, оказывать медицинские услуги высококвалифицированных специалистов в кратчайшие сроки и многое другое. Технология обеспечивает сдвиг парадигмы в сторону беспроводных технологий для обеспечений удаленного управления в реальном времени. В то же время внедрение концепции Тактильного Интернета требует пересмотра принципов построения существующих и перспективных сетей связи. В статье описан эксперимент реализации иммерсивных технологий в сетях связи пятого поколения. В статье было создано микросервисное приложение моделирующее движение кисти человека в пространстве, позволяющее отображать язык жестов. Так же проанализированы пути уменьшения задержек.

Ключевые слова—иммерсивные технологии, интернет вещей (IoT), сети пятого поколения, услуги телеприсутствия, H2M, задержки, робот-аватар, 3D визуализация жестов.

Информация о статье

УДК 378

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 25.11.2022, принята к печати 27.12.2022.

Ссылка для цитирования: Кузнецов К. А., Леонова М. Д., Мутханна А. С. А. Комплекс средств натурного моделирования услуг иммерсивных технологий для людей с ограниченными возможностями // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Том 10. № 4. С. 13–26. DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-4-13-26.



SIMULATION TOOLS FOR IMMERSIVE TECHNOLOGY SERVICES FOR PEOPLE WITH DISABILITIES

K. Kuznetsov, M. Leonova, A. S. Muthanna*

The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

*Corresponding author: ammarexpress@gmail.com

Abstract—The transfer of immersive technologies will soon be able to transform human life, allowing the implementation of H2M interactions to the fullest and with a new quality. People will be able to protect themselves from hazardous industries, learn faster, provide medical services to highly qualified specialists in the shortest possible time, and much more. The technology provides a paradigm shift towards wireless technology for real-time remote control. At the same time, the introduction of the Tactile Internet concept requires a revision of the principles for building existing and future communication networks. The article describes an experiment in the implementation of immersive technologies in fifth generation communication networks. In the article, a microservice application was created that simulates the movement of a human hand in space, which allows displaying sign language. Ways to reduce delays are also analyzed.

Keywords—immersive technologies, Internet of Things (IoT), fifth generation networks, telepresence services, H2M, latency, robot avatar, 3D gesture imaging.

Article info

Article in Russian.

Received 25.11.2022, accepted 27.12.2022.

For citation: Kuznetsov K., Leonova M., Muthanna A. S. Simulation Tools for Immersive Technology Services for People with Disabilities // Telecom IT. 2022. Vol. 10. Iss. 4. pp. 13–26. DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-4-13-26.



Введение

Иммерсивные технологии — это набор различных методов и средств, позволяющих воздействовать на спектр человеческих ощущений или на его часть. В последнее время такие технологии набирают все большую популярность и стремительно входят в обыденную жизнь, так, например, виртуальная реальность (VR) давно знакома многим, дополненная реальность (AR) уже активно применяется в строительстве, машиностроении и других отраслях промышленности [1, 2]. Говоря на языке цифр, человеческое зрение не сильно чувствительно к изменениям, что позволяет с легкостью реализовывать вышеописанные технологии в сетях связи предыдущих поколений, но, переходя к другим органам чувств, картина резко меняется — реакция на тактильные ощущения достигает 1 мс, что накладывает весомые требования к круговой задержке в целях передачи таких ощущений. Сети пятого поколения, а именно сегмент URLLC (*Ultra-Reliable Low Latency Communication*) [3, 4], создается в целях достижения минимально возможных показателей задержки, сохраняя высокую надежность передачи.

В целях реализации иммерсивных технологий предлагается создать систему взаимодействия H2M, которая позволит создавать библиотеки жестов языка глухонемых людей. Стоит отметить, ранее созданные системы были нацелены на считывание и воспроизведение движений на расстоянии в режиме реального времени. Создание библиотек движений позволит автоматизировать ряд технологических и/или иных процессов, а также даст возможность обучать людей различным профессиям или играм, например, игре в гольф, дополнительно появится возможность преобразовывать считанные движения в идеализированные на основании таких библиотек.

Иммерсивные технологии — это неоднозначное направление, не все люди сегодня готовы понять, как возможно будет прикоснуться к человеку, находящемуся далеко? Но так или иначе технология позволяет, в первую очередь, обезопасить сотрудника на опасных производствах. Крупные компании уже проявляют свой интерес в данном направлении¹ [5]. Вдобавок появляются возможности усовершенствования процессов производств. Например, не нужно будет использовать подъемный кран, для установки двигателя в автомобиль, ведь мышцы оператора — это робот. Также появляется возможность уменьшить штат сотрудников за счет возможности использовать высококвалифицированного специалиста в разных точках земного шара.

Все эти моменты интересны не только горячим головам инженеров, но и маркетологам, и специалистам по охране труда, такое сочетание, как правило, служит неизбежным путем достижения цели, а значит совсем скоро это менять нашу жизнь к лучшему.

В области передачи чувств человека существует две основные проблемы: ограничения по круговой задержке, чтобы достичь режима реального времени,

¹ An Introduction to Immersive Technologies // vistaequitypartners.com/insights/an-introduction-to-immersive-technologies (дата обращения 09.01.2022).



и производство сверхбыстрых, точных датчиков и актуаторов. Для решения проблемы с круговой задержкой проводились очень много исследований² [6, 7]. Тактильные ощущение самые требовательные к задержкам из всего спектра человеческих чувств. Их использования в индустриальной среде накладывает обязательства в обеспечении высочайшей надежности, безотказности и безопасности. Сети подвижной связи пятого поколения, по заявленным характеристикам, будут способны предоставить основу для реализации идей передачи полного спектра ощущений человека.

Постановка целей и задач

Исследовать методы реализации иммерсивных технологий в сетях связи пятого поколения. Создать микросервисное приложение моделирующее движение кисти человека в пространстве, позволяющее отображать движениями буквы алфавита языка жестов. Проанализировать пути уменьшения задержек для достижения уровня позволяющего реализовать полный спектр человеческих ощущений, на основе сетей 5G.

Натурное моделирование услуг иммерсивных технологий

Иммерсивные технологии стремятся переносить в пространстве наиболее полный объем человеческий чувств. Но что, если количеству чувств ограничено у самого человека? К сожалению, в мире множество людей с отклонениями по слуху, речи, осязания (тактильные ощущения). Внедряемые все более новые технологии стремятся к уменьшению влияния таких отклонений на полноценную жизнь человека.

Целью эксперимента является создание веб-приложения с микросервисной архитектурой, позволяющего управлять рукой робота и считывать показания "перчатки" в режиме реального времени для воспроизведения и считывания позиций руки соответствующей букве из алфавита языка жестов.

Рука должна позволить показывать, а перчатка считывать буквы на языке жестов, как режиме передачи тактильных ощущений, так и в режиме аватара, повторяя движения при наступлении определенного события.

Алфавит языка жестов состоит из 32 букв – 23 из них символизируются статичными жестами, 9 – динамичными (рис. 1).

² Multi-access Edge Computing (MEC); Framework and Reference Architecture // Standard ETSI GS MEC 003 V3.1.1, 2022.

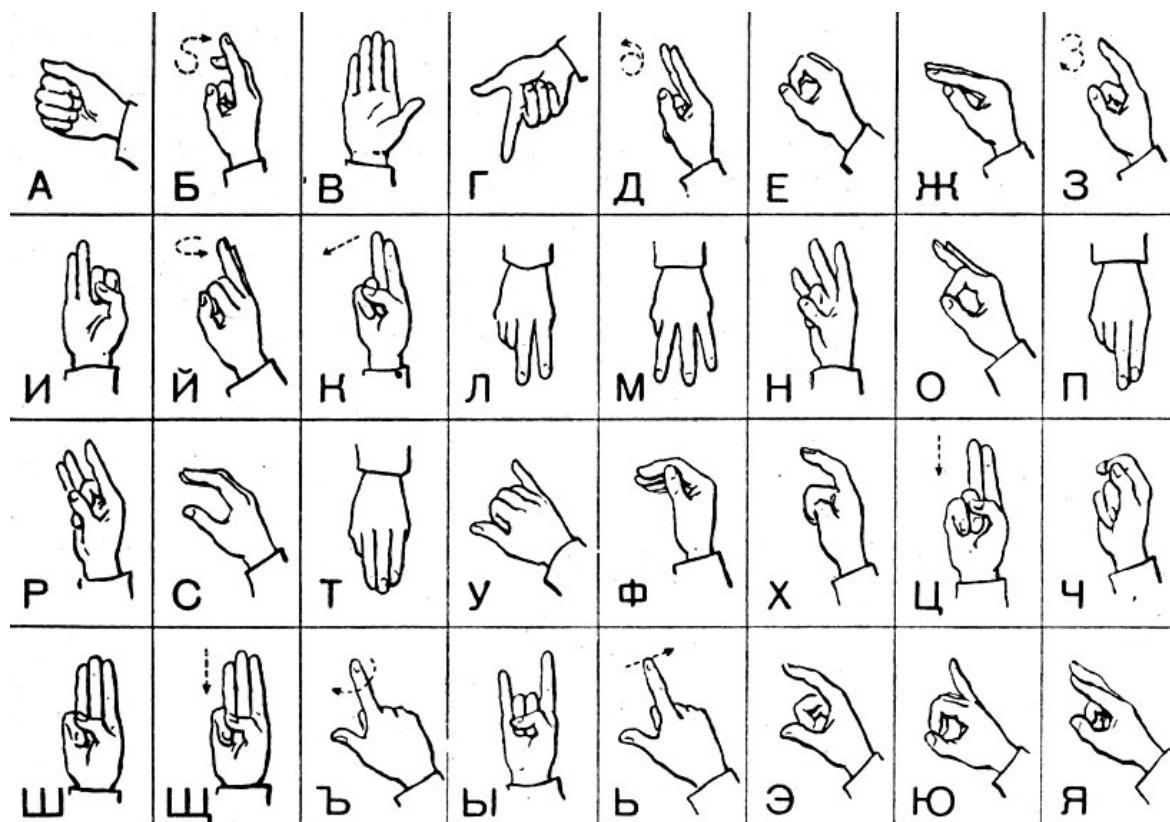


Рис. 1. Алфавит языка жестов

Описание стенда

Визуальное представление всего стенда показано на рис. 2. Основными элементами являются микроконтроллеры ESP-32, плата с гироскопом и акселерометром MPU-6050, Processing и MQTT Брокер для общения между робо-рукой и Processing [8, 9].

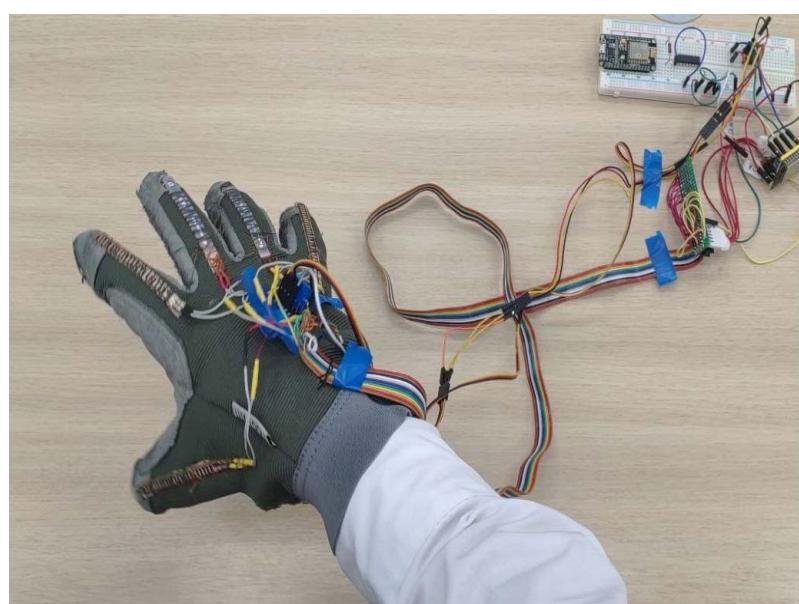


Рис. 2. Стенд с робот перчаткой

ESP-32 – современный микроконтроллер производства Espressif Systems, являющийся последователем всемирно популярной платы ESP8266 (рис. 3). Контроллер часто используется при создании устройств Интернета вещей или иных устройств, взаимодействующих по стандарту Wi-Fi, BLE, LoRa и др.

Основные характеристики:

- Процессор: 32-битный микропроцессор Tensilica Xtensa LX6 2 ядра.
- Тактовая частота: до 240 МГц.
- Производительность: до 600

DMIPS (сопроцессор с ультранизким энергопотреблением: позволяет выполнять преобразования АЦП, вычисления и пороговые значения уровней в состоянии глубокого сна).

- Беспроводное подключение:
 - Wi-Fi: 802.11 b/g/n/e/i (802.11n @ 2,4 ГГц до 150 Мбит/с).
 - Bluetooth: v4.2 BR/EDR и Bluetooth Low Energy (BLE).
- Память:
 - Внутренняя память ПЗУ: 448 Кбит.
 - Для загрузки и основных функций: SRAM: 520 Кбит.
 - Для данных и инструкций RTC fast SRAM: 8 Кбит.
 - Для хранения данных и основного процессора во время загрузки RTC из режима глубокого сна RTC slow SRAM: 8 Кбит.
 - Для доступа к сопроцессору в режиме глубокого сна eFuse: 1 кибит.
 - Встроенная флэш-память:
 - Флэш-память, подключенная внутренне через IO16, IO17, SD_CMD, SD_CLK, SD_DATA_0 и SD_DATA_1 на ESP32-D2WD и ESP32-PICO-D4 0 Мб (микросхемы ESP32-D0WDQ6, ESP32-D0WD и ESP32-S0WD) 2 Мб (микросхема ESP32-D2WD) 4 Мб (SiP-модуль ESP32-PICO-D4).
 - Внешняя флэш-память и SRAM: ESP32 поддерживает до четырех внешних QSPI флэш-памятей и SRAM объемом 16 Мбайт с аппаратным шифрованием на основе AES для защиты программ и данных разработчиков. ESP32 может обращаться к внешней флэш-памяти QSPI и SRAM через высокоскоростной кэш.
 - До 16 Мбайт внешней флэш-памяти отображаются на кодовое пространство процессора, поддерживая 8-, 16- и 32-битный доступ. Поддерживается выполнение кода.
 - До 8 Мбайт внешней флэш-памяти/SRAM отображаются на пространство данных процессора, поддерживая 8-, 16- и 32-битный доступ. Поддерживается чтение данных из флэш-памяти и SRAM. Запись данных поддерживается в SRAM.
 - Периферийный ввод/вывод: богатый периферийный интерфейс с DMA, включающий емкостное сенсорное управление, АЦП (аналого-цифровой преобразователь), ЦАП (цифро-аналоговый преобразователь), I²C (межсетевой инте-



Рис. 3. Микроконтроллер ESP-32



гральный интерфейс), UART (универсальный асинхронный приемник/передатчик), CAN 2.0 (сеть контроллеров), SPI (последовательный периферийный интерфейс), I²S (интегрированный межсетевой интерфейс), RMII (сокращенный медиа-независимый интерфейс), ШИМ (широко-импульсная модуляция) и многое другое.

- Безопасность: поддерживаются все функции безопасности стандарта IEEE 802.11, включая WFA, WPA/WPA2 и WAPI. Безопасная загрузка, флеш-шифрование, 1024-битное OTP, до 768-битного для клиентов. Криптографическое аппаратное ускорение: AES, SHA-2, RSA, криптография эллиптической кривой (ECC), генератор случайных чисел (RNG).

Контроллер обладает встроенными функциями управления ядрами процессора, что позволяет изолировать и существенно ускорять вычислительные процессы. Аналогично своему предшественнику (ESP8266) контроллер в первую очередь является модулем беспроводной связи, но также позволяет производить дополнительные вычисления, что делает его популярной, универсальной SoC-платформой для IoT. Исполняемый код представлен в Приложении № 1.

MPU-6050 – трехосевой гироскоп и акселерометр для отслеживания движения, разработанный с учетом требований к низкому энергопотреблению, низкой стоимости и высокой производительности смартфонов, планшетов и носимых датчиков.

В модуль встроено программное обеспечение InvenSense MotionFusion и калибровка во время выполнения, что позволяет производителям отказаться от дорогостоящего и сложного выбора, квалификации и интеграции дискретных устройств на уровне системы в продукты с поддержкой движения, гарантируя, что алгоритмы слияния датчиков и процедуры калибровки обеспечивают оптимальную производительность для потребителей.

Устройства MPU-6050 объединяют 3-осевой гироскоп и 3-осевой акселерометр на одной кремниевой матрице вместе со встроенным цифровым процессором движения (DMP), который обрабатывает сложные алгоритмы 6-осевого MotionFusion. Устройство может получать доступ к внешним магнитометрам или другим датчикам через вспомогательную ведущую шину I²C, что позволяет устройствам собирать полный набор данных датчиков без вмешательства системного процессора. Устройства предлагаются в корпусе QFN размером 4 × 4 × 0,9 мм.

Для точного отслеживания как быстрых, так и медленных движений, модуль оснащен программируемым пользователем гироскопом с полным диапазоном ± 250 , ± 500 , ± 1000 и ± 2000 °/сек (dps) и программируемым пользователем акселерометром с полным диапазоном ± 2 г, ± 4 г, ± 8 г и ± 16 г. Дополнительные функции включают встроенный датчик температуры и встроенный в микросхему осциллятор с отклонением ± 1 % в диапазоне рабочих температур.

В целях упрощения взаимодействия с микроконтроллером, в проекте используется отладочная плата NodeMCU (рис. 4).

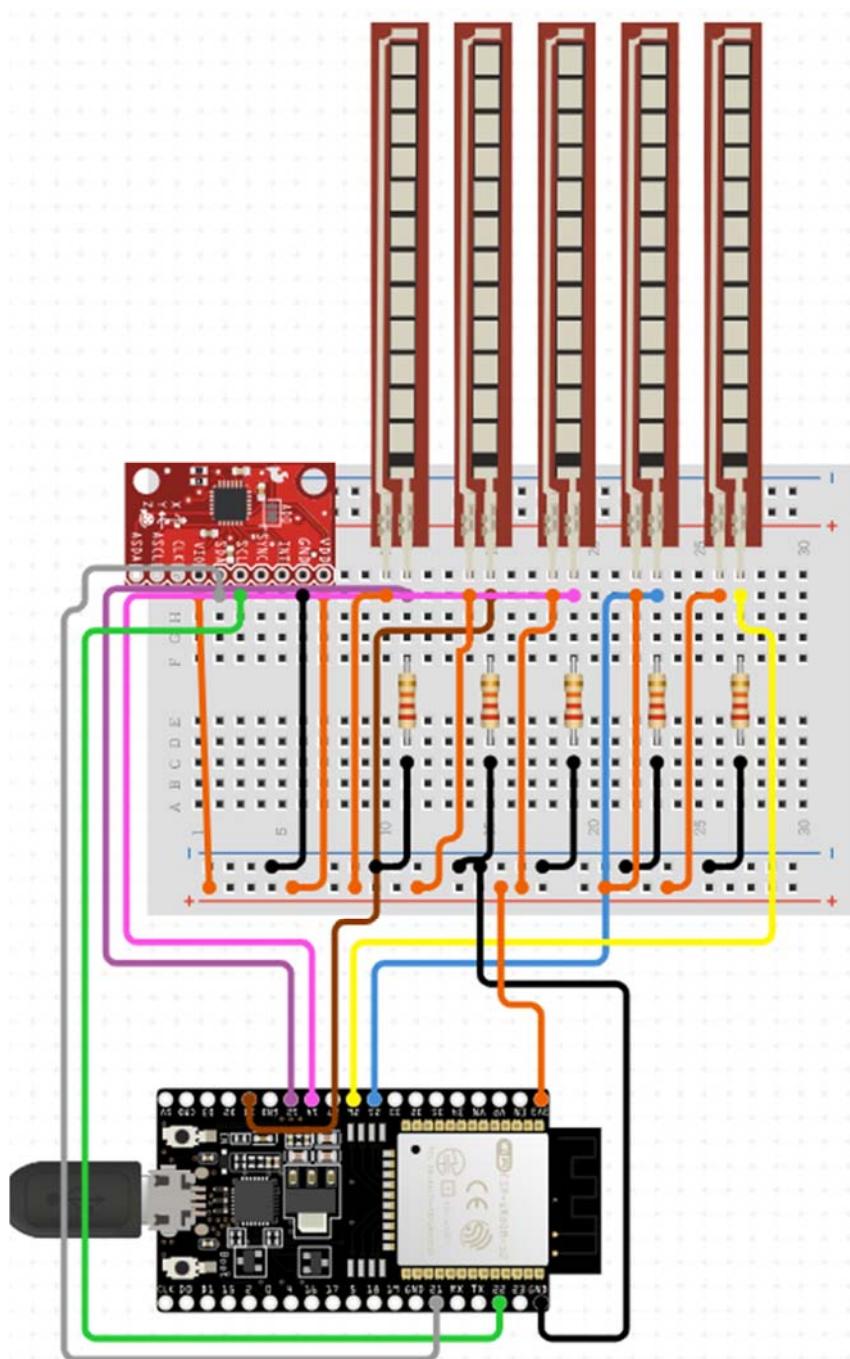


Рис. 4. Схема подключения

Processing – открытый язык программирования, основанный на Java, которые хотят программировать изображения, анимацию и интерфейсы. Программное обеспечение Processing является бесплатным, открытым, кроссплатформенным ПО. Исходный архив включает в себя java-машину, сам интерпретатор, мини-IDE, и несколько десятков примеров. ПО включает инструменты для построения графических примитивов, 3D-объектов, работу со светом, текстом, инструментами трансформации, позволяет импортировать и экспортировать файлы аудио/видео/звуковых форматов, обрабатывать события мыши/клавиатуры, работать со сторонними библиотеками (*OpenGL, PDF, DXF*).



В рамках эксперимента Processing применяется в целях визуализации движений эскиза механизированной руки-робота на языке программирования Java. Разработанная программа является универсальной и позволяет проводить любые эксперименты с использованием трехмерной визуализации, в том числе может быть использована для обучения студентов работе с устройствами IoT и создания новых кейсов применения робо-перчатки (рис. 5).

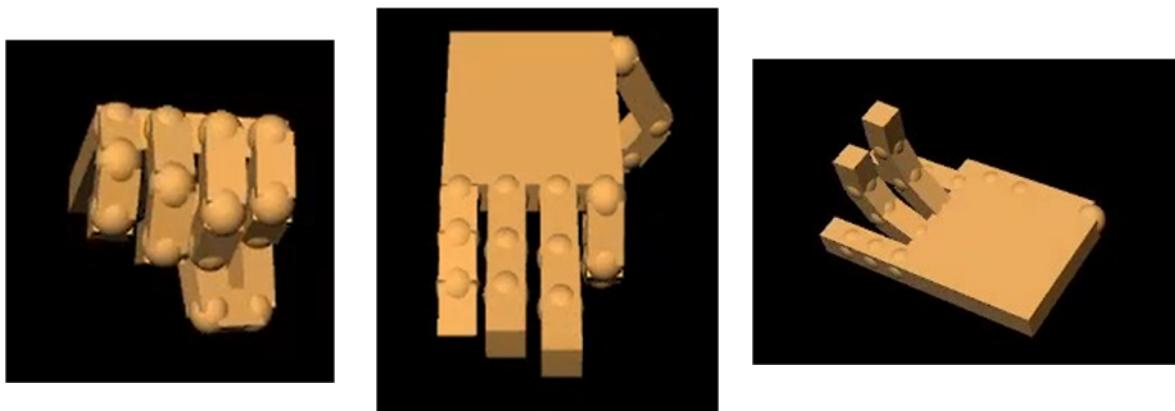


Рис. 5. Processing. 3D – визуализация

MQTT Брокер

EMQX — это брокер сообщений IoT MQTT с открытым исходным кодом, основанный на платформе Erlang/OTP (платформа для разработки в режиме Soft-Realtime, с низкой задержкой и распределением).

Брокер предназначен для массового доступа клиентов и реализует быструю маршрутизацию сообщений между массивными физическими сетевыми устройствами с минимальными задержками. Это одна из самых масштабируемых и надежных платформ обмена сообщениями MQTT для подключения, перемещения и обработки данных в критически важных для бизнеса сценариях эпохи IoT. Позволяет подключать практически любое устройство с помощью открытых стандартных IoT-протоколов MQTT, CoAP и LwM2M. Легко масштабируется до десятков миллионов одновременных MQTT-соединений с помощью кластера EMQX Enterprise.

Схема взаимодействия

В целях проведения анализа уровня задержек, а также исследования методов их сокращения предлагается рассмотреть IoT систему взаимодействия робо-перчатки и ее виртуального аватар, которые описаны выше. В ходе эксперимента предлагается произвести сравнительный анализ трех схем взаимодействия (рис. 6):

1. Все составные части системы располагаются в локальной сети.
2. Робо-перчатка и приложение 3D визуализации располагается локально, а MQTT брокер на удаленной машине в сети Интернет. Взаимодействие производится по Wi-Fi.
3. Робо-перчатка находится в локальной сети, приложение и брокер подвергаются миграции, с использование Docker контейнеров.

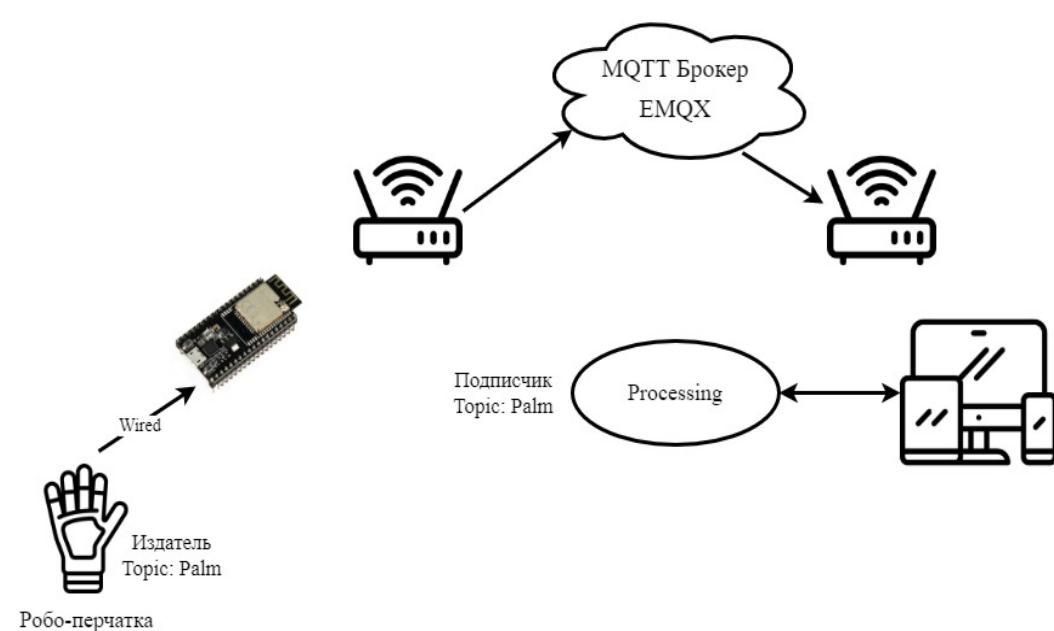


Рис. 6. Общая схема взаимодействия устройств

Вариант № 1

Рассмотрим использование стенда в локальной сети. Для придания большей реалистичности эксперимент проводился в домашней сети Wi-Fi, с подключенными клиентами, не участвующими в эксперименте.

Робо-перчатка подключена к ESP-32, которая в свою очередь осуществляется взаимодействие с MQTT брокером на Wi-Fi. Брокер и приложение, визуализирующее руку-аватара, располагают на одной локальной машине.

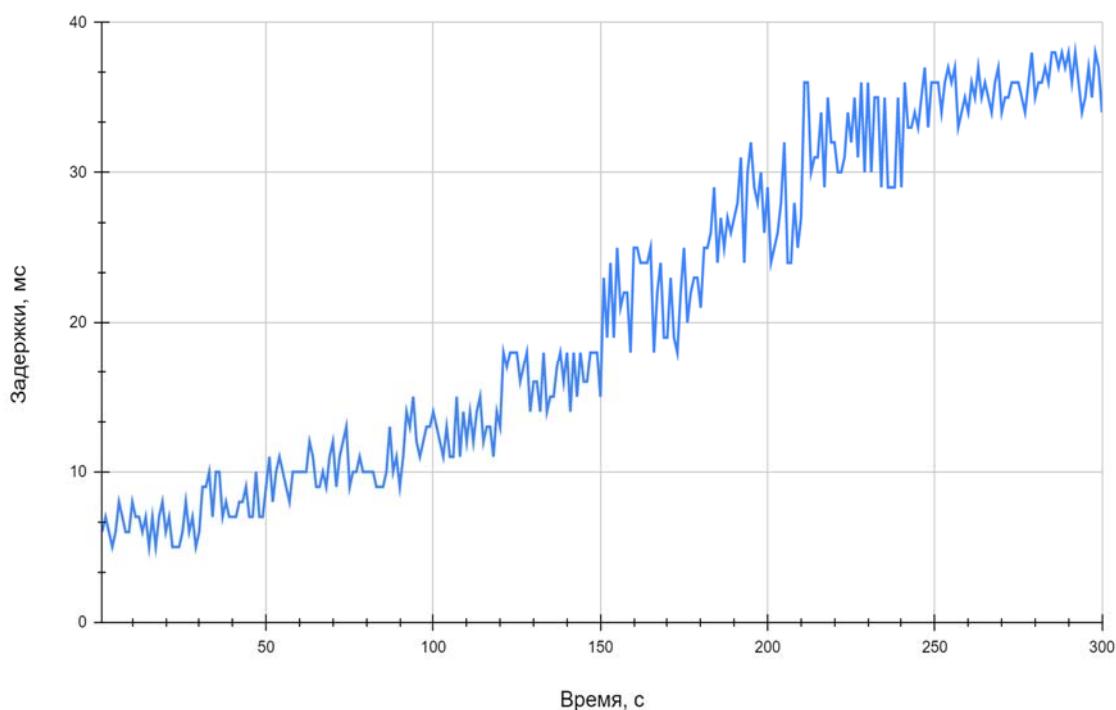


Рис. 7. График распределения задержек для варианта №1



Таким образом, наблюдается негативное влияние возрастающей нагрузки на MQTT брокер по мере его наполнения (рис. 7). В среднем «пороговое» значение количества пакетов достигает 300 000 шт. После перезагрузки сервера (сброса накопленного объема данных) качество работы восстанавливается.

Вариант № 2

Эксперимент проводится при удаленном расположение MQTT Брокера в сети Интернет. Брокер развернут на виртуальных облачных сервера (VPS) с использования контейнера Docker. Остальные устройства стенда располагаются аналогично варианту № 1.

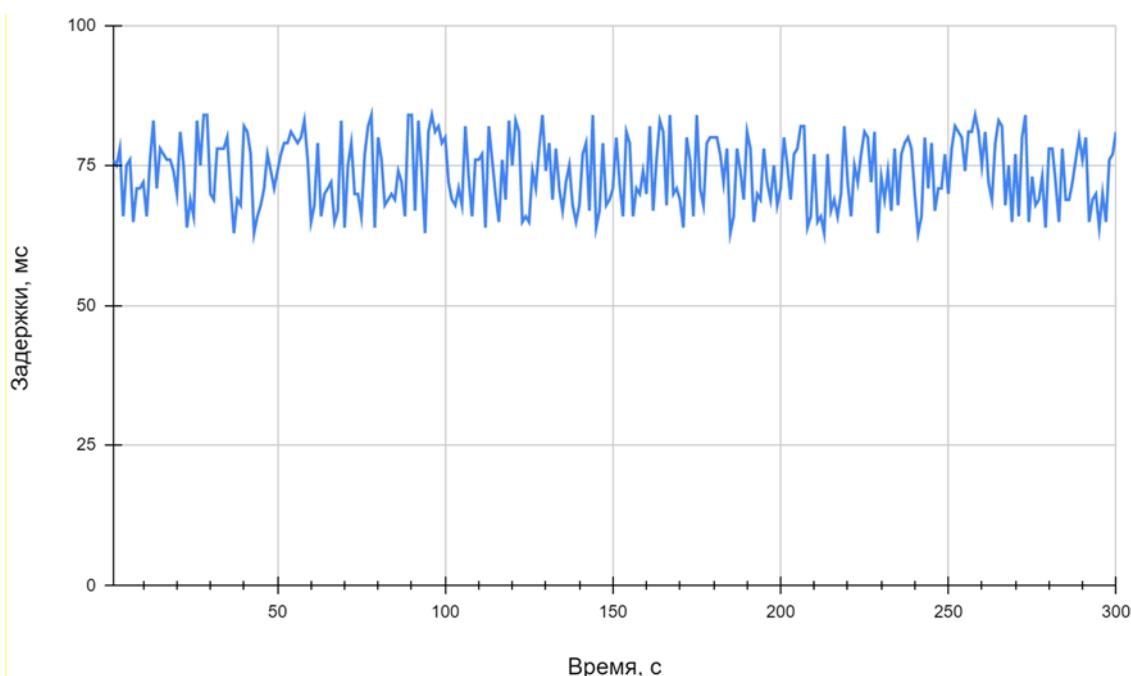


Рис. 8. График распределения задержек для варианта № 2

Учитывая задержки прохождения ICMP пакетов до описанного сервера в размере 50–70 мс, можно сделать вывод о стабилизации работы стенда, за счет разворачивания брокера на отдельной, более производительной ЭВМ (рис. 8).

Таким образом, наиболее существенное влияние оказывают задержки на пути следования пакетов по сети Интернет. В целях их сокращения предлагается мигрировать брокер ближе к абоненту.

Вариант № 3

Рассмотрим способ снижения уровня задержек, на основании данных, полученных в ходе предыдущих экспериментов. Предлагается расположить MQTT брокер в Docker контейнер и произвести его миграцию на оборудования расположенного рядом с оконечным абонентом. Для проведения эксперимента миграем брокер, развернутый ранее на удаленных VPS серверах, на виртуальную машину, находящуюся на расстоянии 2 хопов от оконечного оборудования. Данный метод предполагает использование только встроенного функционала



Docker'a. Управление будет осуществляться с помощью Docker CLI, удаленным облачным хранилищем выступает Docker Hub, за организацию сети, скачивание образа и развертывание контейнера отвечает Docker daemon. Миграция была произведена 10 раз для установления времени переноса сервиса и его стабильности. В среднем время развертывания сервиса составило 1,56 при условии отсутствии предзагруженного образа.

Далее проведен анализ задержек при работе стенда в новой конфигурации. Стоит отметить, что производительность оборудования существенно увеличилась по сравнению с вариантом № 1, так же, как и пропускная способность брокера (рис. 9).

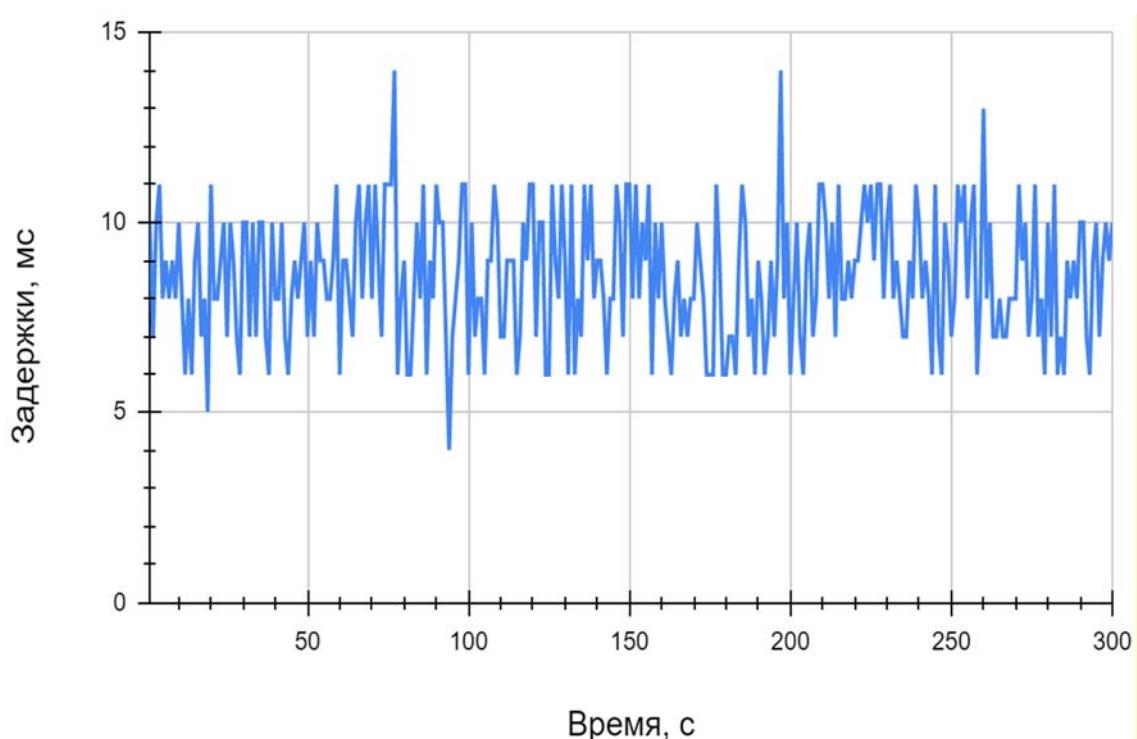


Рис. 9. График распределения задержек для варианта № 3

Задержки прохождения ICMP пакетов между конченым оборудования стенда сократилась до 2–4 мс. Таким образом общая работа стенда укладывается в пределах 10–11 мс задержки, что не позволяет передать тактильные ощущения, но вполне достаточно для выполнения поставленных задач. В сравнение с вариантом № 1 стенда начал функционировать в стабильном состоянии. Дополнительно был произведен эксперимент по работе сервиса в течение двух часов, качество работы стенда осталось неизменным.

Заключение

На сегодняшний день область сетевых технологий расширяется во всех направлениях и требования к Тактильному Интернету, так же, как и к пятому поколению мобильной сети передачи данных, превосходят все из известных физических явлений.



На пути борьбы за достижение поставленных требований, с точки зрения концептуального подхода, возникает еще больше трудностей, связанных с потерями и затуханиями в трактах передачи данных, со временем обработки пакетов на активном сетевом оборудовании, с созданием высокочувствительных датчиков и высокоточных актуаторов с минимальным временем реакции.

Совокупное применение всех описанных методов позволит, как можно ближе, подобраться к решению поставленных задач. Что в скором времени даст возможность массово внедрить иммерсивные технологии в человеческую жизнь, обезопасить ее, ускорить процессы обучения, использовать узкопрофильных специалистов с большей эффективностью и многое другое. Но подобравшись к граням физических исследований, построение сетей перестает быть эволюционным процессом.

Литература

1. Кучеряный А. Е., Бородин А. С., Киричек Р. В. Сети связи 2030 // Электросвязь. 2018. № 11. С. 52–56.
2. Маколкина М. А., Атея А. А., Мутханна А. С. А., Кучеряный А. Е. Метод выгрузки трафика приложений дополненной реальности в многоуровневой системе граничных вычислений // Электросвязь. 2019. № 6. С. 36–42.
3. Paramonov A., Khayyat M., Chistova N., Muthanna A., Elgendi I. A., Koucheryavy A., El-Latif A. and Ahmed A. An Efficient Method for Choosing Digital Cluster Size in Ultralow Latency Networks. Wireless Communications and Mobile Computing 2021 (2021).
4. Атея А. А., Мутханна А. С., Кучеряный А. Е. Интеллектуальное ядро для сетей связи 5G и тактильного интернета на базе программно- конфигурируемых сетей // Электросвязь. 2019. № 3. С. 34–40.
5. Выборнова А. И/ Иммерсивные технологии в телекоммуникациях: обзор и перспективы // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Т. 9. № 3. С. 1–10.
6. Muthanna A. et al. Framework of QoS management for time constraint services with requested network parameters based on SDN/NFV infrastructure // 2018 10th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). IEEE, 2018. pp. 1–6.
7. Khakimov A. et al. IoT-fog based system structure with SDN enabled // Proceedings of the 2nd international conference on future networks and distributed systems. 2018. pp. 1–6.
8. Muthanna M. S. A. et al. Development of intelligent street lighting services model based on LoRa technology // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE, 2018. pp. 90–93.
9. Shi-Wan Lin, Bradford Miller, Jacques Durand, Graham Bleakley. The Industrial Internet of Things Volume G1: Reference Architecture // Industrial Internet Consortium. 2016.

References

1. Кучеряный А. Е., Бородин А. С., Киричек Р. В. Сети связи 2030 // Электросвязь. 2018. № 11. С. 52–56.
2. Маколкина М. А., Атея А. А., Мутханна А. С. А., Кучеряный А. Е. Метод выгрузки трафика приложений дополненной реальности в многоуровневой системе граничных вычислений // Электросвязь. 2019. № 6. С. 36–42.
3. Paramonov A., Khayyat M., Chistova N., Muthanna A., Elgendi I. A., Koucheryavy A., El-Latif A. and Ahmed A. An Efficient Method for Choosing Digital Cluster Size in Ultralow Latency Networks. Wireless Communications and Mobile Computing 2021 (2021).
4. Атея А. А., Мутханна А. С., Кучеряный А. Е. Интеллектуальное ядро для сетей связи 5G и тактильного интернета на базе программно- конфигурируемых сетей // Электросвязь. 2019. № 3. С. 34–40.



5. Выборнова А. И/ Иммерсивные технологии в телекоммуникациях: обзор и перспективы // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Т. 9. № 3. С. 1–10.
6. Muthanna A. et al. Framework of QoS management for time constraint services with requested network parameters based on SDN/NFV infrastructure // 2018 10th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). IEEE, 2018. pp. 1–6.
7. Khakimov A. et al. IoT-fog based system structure with SDN enabled // Proceedings of the 2nd international conference on future networks and distributed systems. 2018. pp. 1–6.
8. Muthanna M. S. A. et al. Development of intelligent street lighting services model based on LoRa technology // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE, 2018. pp. 90–93.
9. Shi-Wan Lin, Bradford Miller, Jacques Durand, Graham Bleakley. The Industrial Internet of Things Volume G1: Reference Architecture // Industrial Internet Consortium. 2016.

Кузнецов Константин Алексеевич

аспирант Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
kuznetsov.sut@gmail.com

Kuznetsov Konstantin A.

Postgraduate, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
kuznetsov.sut@gmail.com

Леонова Мария Дмитриевна

магистрант Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
maria_240600@outlook.com

Leonova Mariya D.

Undergraduate, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
maria_240600@outlook.com

Мутханна Аммар Салех Али

кандидат технических наук, доцент кафедры
Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
ammarexpress@gmail.com

Muthanna Ammar S. A.

PhD, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
ammarexpress@gmail.com