

УДК 004.5

DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-4-11

Создание системы прямого взаимодействия между VR-тренажером отработки коммуникативных и практических навыков врачей-стоматологов и роботом KUKA KR-6

А. А. Южаков, доктор технических наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

С. Г. Расторгуев, ООО «ТЕН.ЛАБ», Иннополис, Россия

Д. В. Бондарев, ООО «ТЕН.ЛАБ», Пермь, Россия

А. Н. Полещук, ООО «ТЕН.ЛАБ», Иннополис, Россия

С. Д. Арутюнов, доктор медицинских наук, профессор, Российский университет медицины, Москва, Россия

А. В. Дешев, Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

В работе представлена инновационная система, которая позволяет напрямую связывать виртуальную среду, созданную с помощью игрового движка Unity, с промышленным роботом-манипулятором KUKA KR-6 на примере тренажера антропоморфного робота для студентов, обучающихся на стоматологических специальностях. Преимущество новой архитектуры заключается в том, что она исключает необходимость применения промежуточных программных решений. Команды управления и координаты передаются напрямую с контроллеров VR-шлема на реальный объект (робот + манипулятор) без привлечения сторонних драйверов и программных мостов. Для реализации взаимодействия был создан специальный сокет-сервер на языке программирования C#. Благодаря этому удалось добиться высокой точности позиционирования (погрешность составляет менее 1 мм) и минимизировать задержки при передаче данных через локальную сеть. Чтобы сделать обучение более реалистичным, система обеспечивает двусторонний обмен данными между реальным положением робота-пациента, манипулятором и виртуальным пространством. Три трекера HTC ViveTracker отслеживают координаты физического объекта (робот + манипулятор), которые затем автоматически переносятся в виртуальную сцену Unity. Таким образом, достигается полное соответствие между реальным и виртуальным пациентами. Испытания системы показали ее стабильность и возможность интеграции в уже существующую образовательную VR-платформу. Это позволит студентам отрабатывать коммуникативные и практические навыки, необходимые для выполнения стоматологических процедур. Разработанное решение открывает новые перспективы для использования виртуальной и смешанной реальности в медицинском образовании. Потенциально оно может быть адаптировано и для других сфер профессиональной подготовки.

Ключевые слова: VR-технологии, Unity, тренажер для стоматологов, KUKA KR-6, сервер на C#, виртуальная симуляция, трекеры HTC Vive.

Введение

В настоящее время прогресс в сфере технологий виртуальной и дополненной реальности (VR/AR) заметно трансформирует подходы к профессиональному обучению в медицинской сфере. В частности, в стоматологическом образовании всё более важную роль играют специализированные симуляторы, которые дают возможность совершенствовать сложные практические и коммуникативные умения без какого-либо риска для пациентов. Однако многие из существующих VR-систем работают в изолированной виртуальной среде и не предусматривают интеграции с реальными роботизированными устройствами, что не позволяет в полной мере развивать у обучающихся пространственное мышление и моторную память [1]. Ранее уже предпринимались попытки создать интерактивные обучающие системы. Например, на платформе Unity была разработана система для отработки навыков врачей-стоматологов [2]. Она преду-

сматривала наличие виртуального пациента, детально проработанный сценарий взаимодействия и механизмы обратной связи. Однако связь между виртуальной средой и реальными устройствами реализуется через стороннее ПО RoboDK Bridge, что приводит к определенным задержкам и зависимости от дополнительных драйверов [3–5].

В предлагаемой разработке реализовано более совершенное решение. Создана система, которая обеспечивает непосредственное взаимодействие между VR-средой, роботом-пациентом и роботом-манипулятором KUKA KR-6 [6–8]. Основа системы – собственный сокет-сервер, написанный на языке C#. Он позволяет осуществлять двусторонний обмен координатами и командами через локальную сеть. Кроме того, реализован механизм, который передает информацию о положении робота-пациента обратно в VR-сцену. Для этого используются данные от трех трекеров HTC ViveTracker. Благодаря этому достигается высокая степень соответствия между физиче-

ским и виртуальным миром. В результате действия обучающегося в виртуальной реальности гармонично синхронизируются с движениями реального робота, что создает эффект «смешанной» реальности и открывает новые горизонты для иммерсивного обучения [9–11].

Целью исследования является создание системы прямого взаимодействия между VR-тренажером и роботом KUKA KR-6.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Точность передачи координат и ориентации от контроллеров VR к роботу.
2. Стабильность соединения и время отклика при двустороннем обмене.
3. Эффективность обратной синхронизации положения пациента.
4. Применимость системы в образовательной среде.

Материалы и методы

Разработка программно-аппаратного комплекса прямого взаимодействия между VR-средой, роботом-пациентом и роботом KUKA KR-6 выполнялась на основе ранее созданного интерактивного стоматологического тренажера, реализованного в среде Unity 3D (версия 2022.3.7f1) [12–14]. Базовый симулятор включал виртуальную сцену стоматологического кабинета, аватара пациента и набор инструментов, с помощью которых обучающийся выполнял сценарий лечения хронического фиброзного пульпита. Новая версия тренажера была расширена функционалом прямой связи с реальным промышленным роботом и возможностью зеркалирования положения пациента из физического мира в виртуальную среду.

Архитектура комплекса основана на трех программных модулях (рис. 1).

На рисунке 2 приведен скриншот из виртуальной реальности.

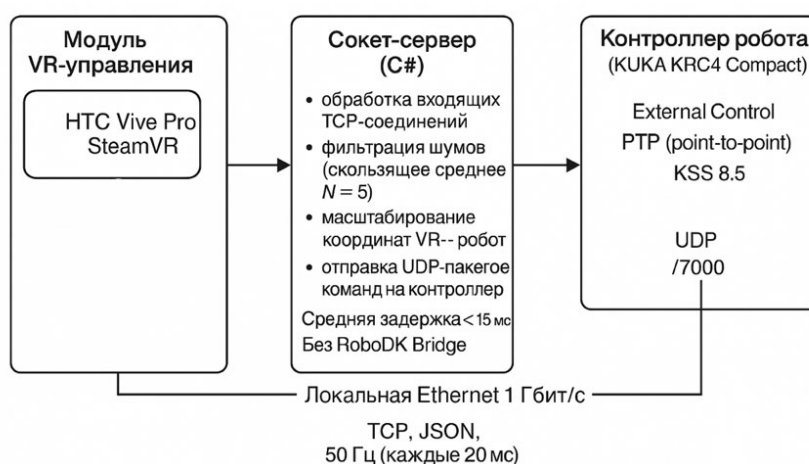


Рис. 1. Архитектура комплекса

Fig. 1. Architecture of the complex

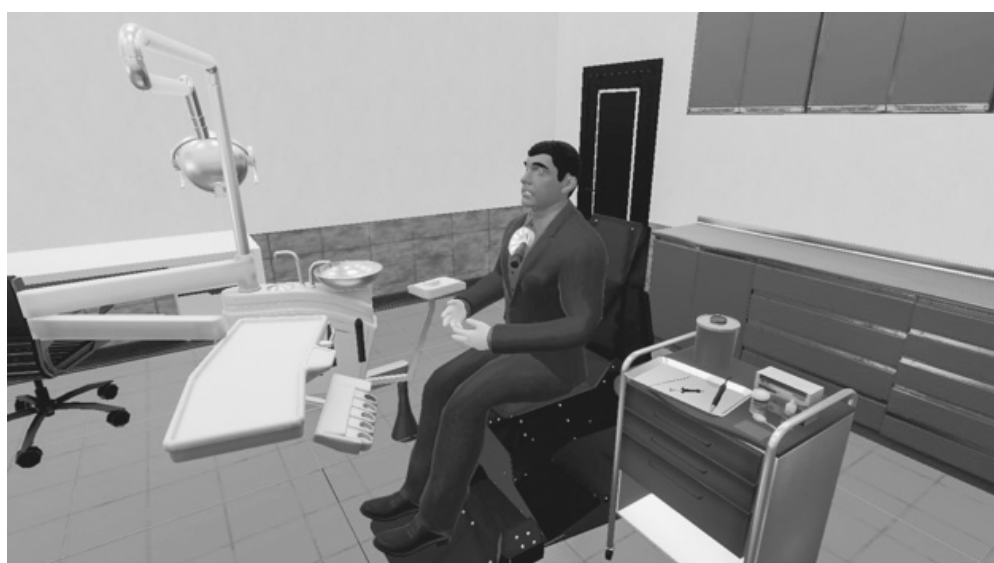


Рис. 2. VR-пространство, подготовленное к совмещению с реальным

Fig. 2. VR space prepared for integration with the real world

Программно-аппаратный комплекс прямого взаимодействия между VR-средой, роботом-пациентом и роборукой KUKA KR-6

Архитектура системы

Логическая структура обмена данными включает три ключевых уровня [15–17].

1. Уровень VR-управления (Unity):

- захватывает движения контроллеров VR-шлема (HTC Vive Pro);
- вычисляет положение инструмента и ориентацию манипуляции в координатах сцены;
- отправляет данные в сокет-сервер в виде сериализованного пакета JSON.

2. Уровень сетевого взаимодействия (C# Socket Server):

- принимает координаты и ориентационные данные от Unity;
- применяет фильтрацию и масштабирование (с учетом ограничений KUKA);
- преобразует данные в команды для контроллера KUKA KRC4;
- передает команды через UDP-протокол с минимальной задержкой.

3. Уровень управления роботом (KUKA Controller):

- принимает пакеты от C#-сервера и выполняет их в режиме External Control;
- перемещает манипулятор в указанные координаты с плавным интерполированием;
- передает обратно в Unity информацию о текущем положении (через трекеры и внутренние датчики).

Алгоритм функционирования

Работа системы реализована как непрерывный цикл передачи данных между виртуальной и реальной средой (рис. 3).

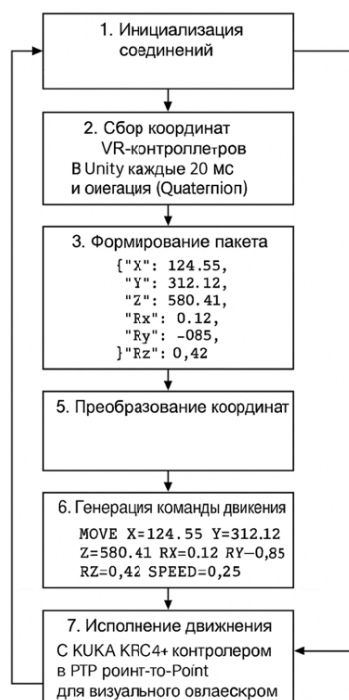


Рис. 3. Алгоритмическое описание

Fig. 3. Algorithmic description

1. Инициализация соединений:

- Unity устанавливает TCP-соединение с сокет-сервером на локальной машине;
- сервер ожидает подключения контроллера робота через UDP.

2. Сбор координат VR-контроллеров:

- в Unity каждую 20 мс происходит считывание положения (X , Y , Z) и ориентации (Quaternion) активных VR-контроллеров.

3. Формирование пакета:

- данные преобразуются в JSON-структуру

```
{ "X": 124.55, "Y": 312.12, "Z": 580.41,  
  "Rx": 0.12, "Ry": -0.85, "Rz": 0.42 }
```

Эти данные описывают положение инструмента в виртуальной среде Unity.

4. Передача на сервер:

- Unity отправляет пакет по TCP-сокету в C#-приложение (порт 8001);
- сервер декодирует пакет, применяет нормализацию и фильтрацию.

5. Преобразование координат:

- координаты из системы Unity (метры, ось Y вверх) конвертируются в систему KUKA (миллиметры, ось Z вверх) с учетом смещения и ориентации робота: $X_r = 1000X_v$; $Y_r = 1000Z_v$; $Z_r = 1000Y_v$.

6. Генерация команды движения:

- на основе полученных координат сервер формирует строку:

$MOVE\ X = 124.55\ Y = 312.12\ Z = 580.41R$

$X = 0.12\ RY = -0.85\ RZ = 0.42\ SPEED = 0.25$

- команда отправляется на контроллер робота по UDP (порт 7000).

7. Исполнение движения:

- контроллер KUKA KRC4 выполняет перемещение в режиме PTP (Point-to-Point) с внутренним сглаживанием траектории.

8. Параллельно осуществляется передача данных от HTC ViveTracker обратно в Unity для визуального обновления положения робота-пациента.

Особенности реализации

- минимизация задержек: использование UDP для передачи управляющих команд позволило сократить время отклика системы до 10...15 мс при стандартной загрузке сети;

- безопасность управления – добавлены защитные ограничения: фильтрация диапазона координат, автоматическая остановка при потере соединения, логирование команд;

- плавность движений: для устранения рывков используется интерполяция координат и усреднение по пяти последним точкам;

- визуальная обратная связь: трекеры HTC ViveTracker передают координаты пациента в Unity каждые 15 мс, обеспечивая визуальное совпадение движений реального и виртуального робота [18, 19].

Результаты интеграции

После внедрения прямого соединения с KUKA KR-6 система показала значительное снижение

времени отклика (до 0,015 с против 0,08 с при использовании RoboDK Bridge). При этом точность позиционирования конца робота при манипуляциях в пределах 100×100×100 мм составила менее 1 мм, что полностью удовлетворяет требованиям для стоматологических обучающих симуляторов.

Перенос положения робота-пациента в VR-среду

Для достижения максимальной реалистичности обучения и ощущения присутствия обучающегося в рабочем пространстве стоматологического кабинета реализован механизм двустороннего обмена данными между реальной и виртуальной системой. Этот механизм обеспечивает синхронное соответствие положения и ориентации робота-пациента в физическом пространстве и его виртуального аналога в сцене Unity [20, 21].

Принцип работы системы обратного отображения

1. Реализация функции переноса положения основана на использовании трех трекеров HTC ViveTracker 3.0, закрепленных на корпусе антропоморфного робота-пациента:

- трекер T1 закреплен в области головы пациента и определяет ориентацию черепа относительно оси Y;
- трекер T2 установлен на грудной клетке, задает продольное положение корпуса;
- трекер T3 расположен в нижней части корпуса (в районе таза), фиксирует повороты и наклоны туловища.

2. Каждый трекер формирует поток данных о положении (X , Y , Z) и ориентации (кватернион), которые передаются в Unity через стандартный драйвер SteamVRInput System с частотой 60 Гц.

3. На основании трех пространственных векторов формируется матрица преобразования, описывающая положение тела пациента в системе координат сцены VR. Эта матрица обновляется в реальном времени и используется для позиционирования виртуальной модели пациента.

Калибровка системы координат

Поскольку физическая и виртуальная сцены не имеют единой абсолютной системы координат, на этапе инициализации проводится ручная калибровка.

Процедура выполняется следующим образом.

1. Робот-пациент устанавливается в исходное (нейтральное) положение.

2. В Unity активируется режим калибровки, при котором пользователь визуально совмещает виртуальные маркеры (реперные точки) с положением трекеров T1–T3.

3. Сохраняются параметры смещения и масштабирования, формирующие калибровочную матрицу M_{cal} .

4. При каждом последующем запуске симулятора виртуальные координаты пациента пересчитываются по формуле $P_{vr} = M_{cal}P_{real}$, где P_{real} – координаты, полученные от трекеров; P_{vr} – координаты виртуальной модели в сцене Unity.

После выполнения калибровки система автоматически поддерживает согласованность движений между реальным роботом и его виртуальной копией.

Алгоритм синхронизации и фильтрации данных

1. Поточковые данные от трекеров HTC ViveTracker содержат незначительные флуктуации из-за вибраций и системных шумов. Для их устранения используется фильтр скользящего среднего с окном из пяти

$$P_f(t) = \frac{1}{5} \sum_{i=0}^4 P(t-i).$$

2. После фильтрации координаты объединяются в единую модель положения пациента, включающую:

- центральную точку $C = (T1 + T2 + T3)/3$;
- ориентацию, вычисляемую методом наименьших квадратов между векторами T1–T3;
- угловые параметры (pitch, yaw, roll) для плавного отображения наклонов туловища.

Полученные параметры передаются в модуль Patient Controller в Unity, где осуществляется обновление позы 3D-модели пациента через стандартную систему анимации HumanoidRig [3].

Визуализация и взаимодействие в VR-сцене

После включения синхронизации обучающийся, находясь в VR-шлеме, видит пациента, положение и движения которого полностью совпадают с положением реального антропоморфного робота. При этом любые перемещения или наклоны физического пациента мгновенно отражаются в VR-среде.

Кроме того, для обеспечения дополнительной наглядности в сцене активируется VR-оверлей с параметрами телеметрии (положение трекеров, углы наклона, расстояние до инструмента). Это позволяет преподавателю в режиме реального времени отслеживать точность манипуляций и корректировать действия обучающегося.

Технические характеристики и результаты испытаний

В ходе тестовых измерений были получены результаты синхронизации между реальным и виртуальным пациентом (таблица 1).

Таблица 1. Результаты синхронизации между реальным и виртуальным пациентом

Table 1. Synchronization results between a real and a virtual patient

Параметр	Среднее значение	Отклонение
Частота обновления координат	60 Гц	±2 Гц
Время отклика	18 мс	±3 мс
Средняя погрешность совмещения позиций	0,9 мм	±0,2 мм
Угловая погрешность ориентации	0,4 гр	±0,1 гр

Погрешность менее 1 мм подтверждает корректность калибровки и эффективность фильтрации. Таким образом, даже при длительном сеансе (30...40 мин) наблюдается устойчивая работа системы без накопления систематического дрейфа.

Практическое значение

Создание модуля обратной синхронизации позволило значительно расширить функциональность VR-тренажера. Теперь преподаватель или наблюдатель может управлять реальным роботом-пациентом, а обучающийся в VR видит все движения в интерактивной сцене с полной пространственной синхронизацией.

Такое решение открывает следующие возможности:

- проведение удаленных практических занятий, где VR-обучающийся взаимодействует с физическим роботом в лаборатории;
- внедрение дистанционных лабораторных практикумов по стоматологии и хирургическим манипуляциям;
- интеграция системы с аналитическими модулями ИИ для автоматической оценки траекторий и углов работы инструментов.

Полученные результаты и их обсуждение

Разработанная система прямого взаимодействия между VR-средой, роботом-пациентом и роборукой KUKA KR-6 была протестирована в условиях лаборатории Пермского национального исследовательского политехнического университета. Испытания проводились на учебном стенде, включающем VR-тренажер Unity, робота-пациента, роборуку KUKA KR-6, контроллер KRC4 и трекары HTC ViveTracker.

Ранее реализованная версия тренажера использовала программный мост RoboDK Bridge, обеспечивающий обмен данными между Unity и контроллером KUKA через промежуточные драйверы. Это решение требовало установки стороннего ПО, использовало многослойную маршрутизацию данных и имело суммарную задержку порядка 70...80 мс.

В предлагаемой версии взаимодействие осуществляется напрямую через локальную сеть с помощью собственного C#-сокета-сервера, что позволило существенно повысить производительность и стабильность системы (табл. 2).

Таблица 2. Показатели сравнения двух версий системы
Table 2. Indicators for comparing two versions of the system

Показатель	Предыдущая версия (RoboDK Bridge)	Новая версия (C# Socket Server)
Средняя задержка передачи	70...80 мс	10...15 мс
Погрешность позиционирования конца робота	2,5...3 мм	< 1 мм
Частота обновления данных	20 Гц	50 Гц
Зависимость от стороннего ПО	Высокая	Отсутствует
Устойчивость соединения	Средняя	Высокая

Сокращение задержки более чем в 5 раз обеспечило естественное соответствие движений VR-контроллеров и манипулятора, а также значительно

улучшило тактильное восприятие при работе с виртуальными инструментами.

Оценка точности позиционирования

Для проверки точности передачи координат была проведена серия из пяти испытаний, в ходе которых фиксировалось фактическое положение фиксатора манипулятора относительно заданной виртуальной траектории. Измерения выполнялись с помощью лазерного дальномера и эталонной шкалы.

Результаты показали, что средняя погрешность позиционирования составила 0,87 мм, а максимальное отклонение не превышало 1,3 мм. Это значение находится в пределах допустимого диапазона для стоматологических манипуляторов, где точность менее 2 мм считается высокой.

Кроме того, при циклических движениях робота с частотой обновления 50 Гц не наблюдалось накопления систематического дрейфа, что подтверждает корректную работу алгоритмов фильтрации и интерполяции координат.

Анализ времени отклика и плавности управления

Среднее время отклика от момента движения контроллера VR до начала перемещения манипулятора составило 11...15 мс, что сопоставимо с порогом восприятия человека (≈ 20 мс). Это обеспечило ощущение непрерывности движений и позволило выполнять стоматологические манипуляции без визуальных задержек.

Визуальное сглаживание обеспечивается интерполяцией координат между последовательными пакетами данных, что особенно важно при выполнении микродвижений в пределах 1...2 мм.

При нагрузочном тесте продолжительностью 30 мин система продемонстрировала стабильную работу без разрывов соединения и пропусков кадров.

Эффективность двусторонней синхронизации

Модуль переноса положения пациента на основе трекаров HTC Vive Tracker показал высокую устойчивость к внешним помехам. Средняя угловая погрешность ориентации виртуального пациента относительно реального составила $0,4 \pm 0,1$ гр, а линейное расхождение – 0,9 мм.

Такая точность позволила достичь эффекта полного совпадения позиций пациента в виртуальной и реальной среде. Обучающийся, находясь в VR-шлеме, воспринимает физические движения робота-пациента как действия виртуального аватара, что создает естественный эффект присутствия и «реальной» работы с пациентом.

Образовательные преимущества и практическая применимость

Интеграция реального манипулятора KUKA в VR-тренажер открыла новые возможности для обучения стоматологов:

- формирование моторных навыков – студенты получают тактильную и визуальную обратную связь, аналогичную реальной процедуре лечения;
- отработка коммуникативных сценариев – виртуальный пациент реагирует на действия пользователя и команды преподавателя, что помогает разви-

вать врачебную этику и взаимодействие с пациентом;

- повышение безопасности обучения – все манипуляции выполняются в виртуальной среде без риска для человека;

- возможность дистанционного обучения – система позволяет преподавателю управлять реальным роботом, а обучающийся может находиться в другом месте, подключившись через VR-шлем.

Таким образом, проект объединяет преимущества инженерных систем реального времени и VR-образования, реализуя принципы технологий Образование 4.0.

Обсуждение результатов

С точки зрения технической реализации, предложенная архитектура продемонстрировала:

- надежность передачи данных при частоте 50 Гц;
- линейную зависимость времени отклика от нагрузки сети (при загрузке до 30 %);
- отсутствие деградации точности при длительных циклах.

С точки зрения образовательной эффективности использование системы в пилотной группе (5 студентов-ординаторов) позволило зафиксировать улучшение показателей точности движений при выполнении виртуальных процедур на 12 % по сравнению с обучением только в VR-среде.

Таким образом, созданный комплекс подтвердил свою состоятельность как инструмент интеграции реальной робототехники и виртуальной стоматологической подготовки.

Выводы

Разработана и экспериментально апробирована система прямого взаимодействия между VR-тренажером для отработки коммуникативных и практических навыков по выполнению лечебных процедур врачей-стоматологов роботом-пациентом и промышленным роботом-манипулятором KUKA KR-6.

Поставленные цели и задачи достигнуты.

Главным результатом исследования стало создание единой программно-аппаратной среды, объединяющей виртуальную симуляцию, реальный робототехнический комплекс и систему пространственного слежения на базе HTC ViveTracker. Это позволило достичь синхронного взаимодействия между виртуальными и физическими объектами без использования промежуточных драйверов или стороннего ПО.

Кроме того, достигнуты следующие результаты.

1. Разработана архитектура прямого обмена данными между Unity и KUKA KR-6 с использованием собственного сокет-сервера на C#, обеспечивающего передачу координат и ориентации в реальном времени. Средняя задержка передачи составила 10...15 мс, что в пять раз меньше, чем при использовании стандартных решений типа RoboDK Bridge.

2. Реализована система обратной синхронизации положения робота-пациента с помощью трех трекеров HTC ViveTracker. Обеспечена точность пространственного совмещения менее 1 мм и угловая погрешность не более 0,4 гр, что гарантирует совпадение реального и виртуального положений.

3. Проведено тестирование стабильности системы, подтвердившее устойчивую работу при длительных сеансах (до 40 мин) и отсутствие накопления систематического дрейфа координат.

4. Достигнута высокая образовательная и практическая ценность: обучающиеся получают возможность отрабатывать действия с реальными роботизированными устройствами в безопасной виртуальной среде, что формирует устойчивые моторные и когнитивные навыки, повышает вовлеченность и качество подготовки.

Таким образом, разработанный VR-тренажер представляет собой инновационный инструмент, объединяющий технологии виртуальной реальности, робототехники и имитационного обучения, соответствующий концепции Образование 4.0.

Дальнейшие исследования планируется направить:

- на интеграцию модуля искусственного интеллекта для автоматической оценки действий обучающегося по параметрам траектории и давления инструмента;
- внедрение биомеханических датчиков для регистрации усилий и обратной тактильной связи;
- реализацию мультиагентной VR-среды, где преподаватель и несколько студентов могут одновременно взаимодействовать с роботом-пациентом в одном виртуальном пространстве;
- создание облачного интерфейса удаленного доступа, позволяющего использовать систему в дистанционном формате.

Предложенный подход демонстрирует, что объединение технологий VR, сетевого программирования и промышленной робототехники может стать основой для создания нового поколения учебных симуляторов не только в стоматологии, но и в других областях медицинского и инженерного образования.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании комплексных образовательных платформ, включающих роботов, устройства дополненной реальности и интеллектуальные модули анализа действий обучающихся.

Библиографические ссылки

1. Разработка антропоморфного стоматологического симулятора на базе робота Robo-C / А. А. Южаков, С. Д. Арутюнов, Н. Б. Асташина, А. А. Байдаров, И. И. Безукладников, С. А. Сторожев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 4. С. 13–22. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-4-13-22 EDN TGHLCJ
2. Элементы образовательной технологии 4.0 на примере дополненной реальности с использованием аватара антропоморфного стоматологического робота-симулятора / А. А. Байдаров, Р. А. Кокоулин, С. А. Сторожев, А. А. Южаков, С. Д. Арутюнов, Н. Б. Асташина // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 4. С. 79–89. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-79-89 EDN JLLMQQ
3. Стоматологический симулятор на базе робототехнического комплекса с интегрированной смарт-челюстью / С. Д. Арутюнов, А. А. Южаков, Я. Н. Харах, И. И. Безукладников, А. А. Байдаров, Н. Б. Асташина // Российский

стоматологический журнал. 2023. Т. 27, № 1. С. 63–70. DOI: 10.17816/dent115139 EDN LMGDRW

4. Кокоулин А. Н., Южаков А. А. Двухступенная схема обнаружения объектов в подсистеме машинного зрения сервисных роботов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2024. № 49. С. 176–199. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.09 EDN AWCULA

5. Особенности использования нейронных сетей для анализа изменений свойств объектов / С. Д. Арутюнов, Н. Б. Асташина, А. А. Байдаров, И. И. Безукладников, А. Н. Кокоулин, Р. А. Кокоулин, С. А. Сторожев, А. А. Южаков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2024. № 51. С. 201–220. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.3.11 EDN LYKMAV

6. Blankemeyer S., Wiemann R., Posniak L., Pregizer Ch., Raatz A. (2018). Intuitive Robot Programming Using Augmented Reality. *Procedia CIRP*, 76, 155–160. DOI: 10.1016/j.procir.2018.02.028

7. Liu Guoliang & Sun Wenlei & Li Pinwen (2024). Motion capture and AR based programming by demonstration for industrial robots using handheld teaching device. *Scientific Reports*, 14. DOI: 10.1038/s41598-024-73747-4

8. Yang W., Xiao Q., & Zhang Y. (2023). HAR2bot: a human-centered augmented reality robot programming method with the awareness of cognitive load. *Journal of Intelligent Manufacturing*. DOI: 10.1007/s10845-023-02096-2

9. István T., Erdei R., Krakó N., Dávid P., Husi G. (2022). 3D CAD design of KUKA robot arm & integration into AR environment to educational purposes. *PEMC 2022*, 590-596. DOI: 10.1109/PEMC51159.2022.9962864

10. Mulero-Pérez D., Zambrano-Serrano B., Ruiz Zúñiga E., Fernandez-Vega M., & Garcia-Rodriguez J. (2025). Enhancing Robotics Education Through XR Simulation: Insights from the X-RAPT Training Framework. *Applied Sciences*, 15, 10020. DOI: 10.3390/app151810020

11. Erdei T.I., Krakó R., Husi G. (2022). Design of a Digital Twin Training Centre for an Industrial Robot Arm. *Applied Sciences*, 12, 8862. DOI: 10.3390/app12178862

12. Саенко А. А., Габов В. С. Создание виртуального рабочего пространства // Информационные технологии XXI века : сборник научных трудов. Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2023. С. 168–171. EDN ZHTUHY

13. Разработка профориентационной VR-игры на платформе UNITY / Е. С. Сергеев, А. Е. Сухова, И. С. Максимов, Н. А. Сенаторов // Научное обозрение. Технические науки. 2021. № 2. С. 38–42. EDN NWCETA

14. Wang K., Ding L., Dailami F., Matthews J. (2025). A Contemporary Review of Collaborative Robotics Employed in Manufacturing Finishing Operations: Recent Progress and Future Directions. *Machines*, 13(9), 772. DOI: 10.3390/machines13090772

15. Gerget O. (2022). Software Library for KUKA Iiwa Robot to Improve the Efficiency of Human-Robot Interaction in Robotic Medical Applications. In: *Interactive Collaborative Robotics*. ICR 2022: Lecture Notes in Computer Science, vol. 13719. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-23609-9_25

16. Burghardt A., Szybick, D., Gierlak P., Kurc K., Pietruś P., Cygan R. (2020). Programming of Industrial Robots Using Virtual Reality and Digital Twins. *Applied Sciences*, 10(2), 486. DOI: 10.3390/app10020486

17. Dogangun Fatih, Bahar Serdar, Yildirim Yigit, Temir Bora, Ugur Emre, Dogan Mustafa (2024). RAMP: Robotic Augmented Reality for Machine Programming and Automation. DOI: 10.48550/arXiv.2410.13412

18. Merker S., Pastel S., Bürger D., Schwadtke A., Witte K. (2023). Measurement Accuracy of the HTC VIVE Tracker 3.0 Compared to Vicon System for Generating Valid Positional Feedback in Virtual Reality. *Sensors*, 23(17), 7371. DOI: 10.3390/s23177371

19. Weber Mitchell, Hartl Roman, Zäh Michael, Lee Jihyun (2023). Dynamic Pose Tracking Accuracy Improvement via Fusing HTC Vive Trackers and Inertia Measurement Units. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. DOI: 24.10.1007/s12541-023-00891-8

20. Tseng Juin-Ling, Chu Chiawei (2018). Interaction Design in Virtual Reality Game Using Arduino Sensors. DOI: 10.5772/intechopen.71016

21. Angra Sheena, Sharma Bhanu, Sharma Avinash (2022). Analysis of Virtual Reality and Augmented Reality SDK's and Game Engines: A Comparison, pp. 1681–1684. DOI: 10.1109/ICECAA55415.2022.9936111

References

1. Yuzhakov A.A., Arutyunov S.D., Astashina N.B., Baidarov A.A., Bezukladnikov I.I., Storozhev S.A. (2023) [Development of an anthropomorphic dental simulator based on the Robo-C robot]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 26, no. 4, pp. 13-22. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-4-13-22 EDN TGHLCJ (in Russ.).

2. Baidarov A.A., Kokoulin R.A., Storozhev S.A. (2024) [Elements of educational technology 4.0 in augmented reality using an avatar of an anthropomorphic dental robot simulator]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 4, pp. 79-89. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-79-89 EDN JLLMQQ (in Russ.).

3. Arutyunov S.D., Yuzhakov A.A., Harah Ya.N. (2023) [Dental simulator based on a robotic complex with an integrated smart jaw]. *Rossiyskiy stomatologicheskij zhurnal*, vol. 27, no. 1, pp. 63-70. DOI: 10.17816/dent115139 (in Russ.).

4. Kokoulin A.N., Yuzhakov A.A. (2024) [A two-stage object detection scheme in the machine vision subsystem of service robots]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informacionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*, no. 49, pp. 176-199. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.09 EDN AWCULA (in Russ.).

5. Arutyunov S.D., Astashina N.B., Baidarov A.A. (2024) [Features of using neural networks to analyze changes in the properties of objects]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informacionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*, no. 51, pp. 201-220. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.3.11 EDN LYKMAV (in Russ.).

6. Blankemeyer S., Wiemann R., Posniak L., Pregizer Ch., Raatz A. (2018) Intuitive Robot Programming Using Augmented Reality. *Procedia CIRP*, 76, 155-160. DOI: 10.1016/j.procir.2018.02.028

7. Liu Guoliang & Sun Wenlei & Li Pinwen (2024) Motion capture and AR based programming by demonstration for industrial robots using handheld teaching device. *Scientific Reports*, 14. DOI: 10.1038/s41598-024-73747-4

8. Yang W., Xiao Q., & Zhang Y. (2023) HAR2bot: a human-centered augmented reality robot programming method with the awareness of cognitive load. *Journal of Intelligent Manufacturing*. DOI: 10.1007/s10845-023-02096-2

9. István T., Erdei R., Krakó N., Dávid P., Husi G. (2022) 3D CAD design of KUKA robot arm & integration into AR environment to educational purposes. *PEMC*, pp. 590-596. DOI: 10.1109/PEMC51159.2022.9962864
10. Mulero-Pérez D., Zambrano-Serrano B., Ruiz Zúñiga E., Fernandez-Vega M., Garcia-Rodriguez J. (2025). Enhancing Robotics Education Through XR Simulation: Insights from the X-RAPT Training Framework. *Applied Sciences*, 15, 10020. DOI: 10.3390/app151810020
11. Erdei T. I., Krakó R., Husi G. (2022) Design of a Digital Twin Training Centre for an Industrial Robot Arm. *Applied Sciences*, 12, 8862. DOI: 10.3390/app12178862
12. Saenko A.A., Gabov V.S. (2023) *Informacionnye tekhnologii XXI veka: sbornik nauchnyh trudov* [Creating a virtual workspace]. Khabarovsk: Pacific National University Publ., 2023, pp. 168-171 (in Russ.).
13. Sergeev E.S., Sukhova A.E., Maksimov I.S., Senatorov N.A. (2021) [Development of a career guidance VR game on the UNITY platform]. *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki*, no. 2, pp. 38-42 (in Russ.).
14. Wang K., Ding L., Dailami F., Matthews J. (2025) A Contemporary Review of Collaborative Robotics Employed in Manufacturing Finishing Operations: Recent Progress and Future Directions. *Machines*, 13(9), 772. DOI: 10.3390/machines13090772
15. Gerget O. (2022) Software Library for KUKA Iiwa Robot to Improve the Efficiency of Human-Robot Interaction in Robotic Medical Applications: Interactive Collaborative Robotics. *ICR 2022: Lecture Notes in Computer Science*, vol. 13719. Springer: Cham, 2022. DOI: 10.1007/978-3-031-23609-9_25
16. Burghardt A., Szybicki D., Gierlak P., Kurc K., Pietrus P., Cygan R. (2020) Programming of Industrial Robots Using Virtual Reality and Digital Twins. *Applied Sciences*, 10(2), 486. DOI: 10.3390/app10020486
17. Dogangun Fatih, Bahar Serdar, Yildirim Yigit, Temir Bora, Ugur Emre, Dogan Mustafa (2024) RAMPA: Robotic Augmented Reality for Machine Programming and Automation. DOI: 10.48550/arXiv.2410.13412
18. Merker S., Pastel S., Bürger D., Schwadtke A., Witte K. (2023) Measurement Accuracy of the HTC VIVE Tracker 3.0 Compared to Vicon System for Generating Valid Positional Feedback in Virtual Reality. *Sensors*, 23(17), 7371. DOI: 10.3390/s23177371
19. Weber Mitchell, Hartl Roman, Zäh Michael, Lee Ji-hyun (2023) Dynamic Pose Tracking Accuracy Improvement via Fusing HTC Vive Trackers and Inertia Measurement Units. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. DOI: 24. 10.1007/s12541-023-00891-8
20. Tseng Juin-Ling, Chu Chiawei (2018) Interaction Design in Virtual Reality Game Using Arduino Sensors. DOI: 10.5772/intechopen.71016
21. Angra Sheena, Sharma Bhanu, Sharma Avinash (2022) Analysis of Virtual Reality and Augmented Reality SDK's and Game Engines: *A Comparison*, pp. 1681-1684. DOI: 10.1109/ICECAA55415.2022.9936111

Creation of a System for Direct Interaction between a VR Simulator for Communication and Practical Skill Training of Dentists and the KUKA KR-6 Robotic Arm

A.A. Yuzhakov, DSc in Engineering, Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
 S.G. Rastorguev, TEN.LAB LLC, Innopolis, Russia
 D.V. Bondarev, TEN.LAB LLC, Perm, Russia
 A.N. Poleshchuk, TEN.LAB LLC, Innopolis, Russia
 S.D. Arutyunov, Doctor of Medicine, Professor, Russian University of Medicine, Moscow, Russia
 A.V. Deshev, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov, Nalchik, Russia

This publication describes an innovative system that directly links a virtual environment created with the Unity game engine to a KUKA KR-6 industrial robotic manipulator. The solution is intended for use in dental education. The key advantage of the new architecture is that it eliminates the need for intermediate software layers: control commands and coordinates are transmitted directly from VR headset controllers to the real robot, without third-party drivers or software bridges. To implement the interaction, a dedicated socket server was developed in C#. This approach achieves high positioning accuracy (error less than 1 millimeter) and minimizes data-transfer latency over the local network. To make training more realistic, the system enables bi-directional data exchange between the real position of the robot "patient" and the virtual space. Three HTC Vive Trackers capture the coordinates of the physical object, which are then automatically mirrored in the Unity virtual scene, ensuring full correspondence between the real and virtual patients. System trials demonstrated stability and the feasibility of integrating the solution into an existing educational VR platform. This will allow students to master the communication and practical skills required for treating chronic fibrous pulpitis. The proposed solution opens new prospects for the use of virtual and mixed reality in medical education and can potentially be adapted to other professional training domains.

Keywords: VR technologies, Unity, dental training simulator, KUKA KR-6, C# socket server, virtual simulation, HTC Vive trackers.

Получено 16.10.2025

Образец цитирования

Создание системы прямого взаимодействия между VR-тренажером отработки коммуникативных и практических навыков врачей-стоматологов и роборукой KUKA KR-6 / А. А. Южаков, С. Г. Расторгуев, Д. В. Бондарев, А. Н. Полещук, С. Д. Арутюнов, А. В. Дешев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 4. С. 4–11. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-4-11

For Citation

Yuzhakov A.A., Rastorguev S.G., Bondarev D.V., Poleshchuk A.N., Arutyunov S.D., Deshev A.V. (2025) [Creation of a System for Direct Interaction between a VR Simulator for Communication and Practical Skill Training of Dentists and the KUKA KR-6 Robotic Arm]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 4, pp. 4-11. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-4-11 (in Russ.).