

УДК 004.5

DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-79-89

## Элементы образовательной технологии 4.0 на примере дополненной реальности с использованием аватара антропоморфного стоматологического робота-симулятора\*

**А. А. Байдаров**, кандидат технических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**Р. А. Кокоулин**, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**С. А. Сторожев**, кандидат технических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

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

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

**Н. Б. Асташина**, доктор медицинских наук, профессор, Пермский государственный медицинский университет имени академика Е. А. Вагнера, Пермь, Россия

*В рамках образовательной технологии 4.0 представлено инновационное решение для стоматологического образования – антропоморфный стоматологический симулятор, сочетающий в себе преимущества робототехники, виртуальной и дополненной реальности. Интеграция шестиосевого робота-манипулятора KUKA с виртуальной средой Unity обеспечивает высокую степень реалистичности при моделировании стоматологических процедур. Использование нейронных сетей позволяет объективно оценивать качество выполнения задач студентами, анализируя видеопоток с камер, установленных внутри ротовой полости симулятора. Целью исследования является построение элементов образовательной среды на базе технологии 4.0 на основе геймификации и использования аватаров. Научная новизна исследования заключается в уникальном сочетании промышленного робота, VR/AR технологий и искусственного интеллекта для создания персонализированной и интерактивной обучающей среды. Методика разработки включает создание виртуальной модели челюсти, программирование робота для выполнения точных движений, обучение нейронных сетей на большом объеме данных. Результаты показали, что разработанный симулятор значительно повышает эффективность обучения, сокращает время адаптации студентов и позволяет проводить объективную оценку их навыков. Перспективы развития включают интеграцию с другими медицинскими симуляторами, создание адаптивных учебных программ и применение искусственного интеллекта для более глубокого анализа данных обучения. Примеры, представленные в статье, подтверждают эффективность предложенного подхода и открывают новые перспективы в разработке инновационных обучающих симуляторов для стоматологии. Антропоморфный стоматологический симулятор, представленный в статье, позволяет применять технологии дополненной реальности в обучении стоматологов в дистанционном режиме, а также проводить симуляцию различных заболеваний, что значительно улучшит практическую подготовку преподавателей и студентов к работе с пациентами.*

**Ключевые слова:** образовательная технология 4.0, антропоморфный симулятор, Robo-C, дополненная реальность, робот KUKA.

### Введение

Логическим развитием иммерсивного AR/VR обучения является гибкое использование виртуальных и реальных функций комплекса в различных пропорциях в течение всего процесса обучения – от максимального использования аппаратной составляющей при минимальной доле AR/VR компонентов до практически полностью виртуальной образовательной среды, что особенно важно

в условиях вынужденного перехода к дистанционным технологиям.

Ключевыми современными трендами в области образования являются массовизация (потребность в высшем образовании у всё большего числа людей), использование индивидуальных образовательных траекторий (профилирование и специализация уже недостаточны, для покрытия потребностей современных предприятий/бизнеса нужны единичные кадры), а также

© Байдаров А. А., Кокоулин Р. А., Сторожев С. А., Южаков А. А., Арутюнов С. Д., Асташина Н. Б., 2024

\* Исследование проводилось при финансовой поддержке Пермского научно-образовательного центра «Рациональное недропользование».

обеспечение непрерывного обучения, поскольку цикл развития технологий сократился до сроков менее 5 лет. Соответственно, классическая образовательная программа не может справиться с таким темпом новаций [1, 2].

Реализация перечисленных трендов возможна в рамках концепции MOOC 4.0, сочетающей в себе как классический вариант массового онлайн-образования (традиционные видеоуроки, онлайн-тесты и др.), так и высокоиммерсивное интерактивное образование для малых групп студентов. Отдельно стоит отметить возрастающую долю VR/AR окружений в удаленном образовании. Пилотные проекты зарубежных вузов, таких как Стенфорд (проект Stanford VIRBELA), Оксфорд (проект Oxford NIVE) демонстрируют высокую привлекательность виртуальных окружений для студентов, высокий уровень вовлеченности в образовательный процесс, сравнимый с таковым для очного обучения. Развивается концепция так называемых виртуальных аватаров – виртуальных персонажей, управляемых как студентами, так и преподавателями.

Однако процесс обучения в медицине и инженерии существенно отличается от тех образовательных процессов, которые сегодня имеют виртуальное окружение в процессе дистанционного обучения. Выпускники медицинских вузов должны не только знать и уметь, но и применять и владеть приобретенными навыками, что требует длительной практической работы на аппаратах и оборудовании. Имеющийся опыт

построения первой в России учебной лаборатории сервисной робототехники (рис. 1) в Пермском национальном исследовательском политехническом университете для магистерской online-программы подтвердил, что наиболее перспективной образовательной технологией будущего является высокоиммерсивное интерактивное образование на основе образовательной платформы 4-го поколения с учетом оценки экономической эффективности [3, 4].

По сравнению с классическим подходом к дистанционному образованию в рамках развития предложенной концепции возможна реализация принципиально нового функционала:

- интерактивные материалы с отложенным просмотром;
- персональные ассистенты для интерактивной помощи, обучение преподавателей;
- автоматизация и использование ИИ в процессе обучения;
- использование ИИ для создания методических материалов;
- одновременное использование P2P и традиционного подхода к обучению;
- организация единого механизма доступа к образовательным ресурсам.

**Цель** исследования – построение элементов образовательной среды на базе технологии 4.0 на основе геймификации и использования аватаров.

Вариант решения указанной задачи можно рассмотреть на примере стоматологического медицинского образования.



a



b

Рис. 1. Виртуально-физическая лаборатория «Автономные сервисные роботы»: a – сервисный робот; b – общий вид лаборатории

Fig. 1. Virtual-physical laboratory “Autonomous service robots”: a - service robot; b - general view of the laboratory

### Аватар на основе аппаратно-программного комплекса на базе робота-манипулятора с использованием среды дополненной реальности

Симуляторы в стоматологии играют всё более важную роль в обучении будущих стоматологов и совершенствовании навыков действующих специалистов [5–7]. Они позволяют отрабатывать различные манипуляции в безопасной и контролируемой среде, минимизируя риск ошибок при работе с пациентами. Тем самым они способствуют развитию стоматологического образования и практики, т. е. повышают качество подготовки специалистов, улучшают клинические результаты и обеспечивают безопасность пациентов [8–10]. Например, использование

нейронных сетей для анализа изменений человеческих зубов в челюсти позволяет оценить качество лечения в автоматическом режиме [11].

Особенностью рассматриваемой работы является построение аватаров обучающего и пациента за счет интеграции шестиосевого робота-манипулятора KUKA KR6 R900 [12], управляемого контроллером KUKA KR C4 Compact [13] (рис. 2), в антропоморфный стоматологический симулятор, представленный ранее в статьях «Разработка антропоморфного стоматологического симулятора на базе робота Robo-C» (2023) и «Стоматологический симулятор на базе робототехнического комплекса с интегрированной смарт-челюстью» (2023), с использованием среды дополненной реальности.

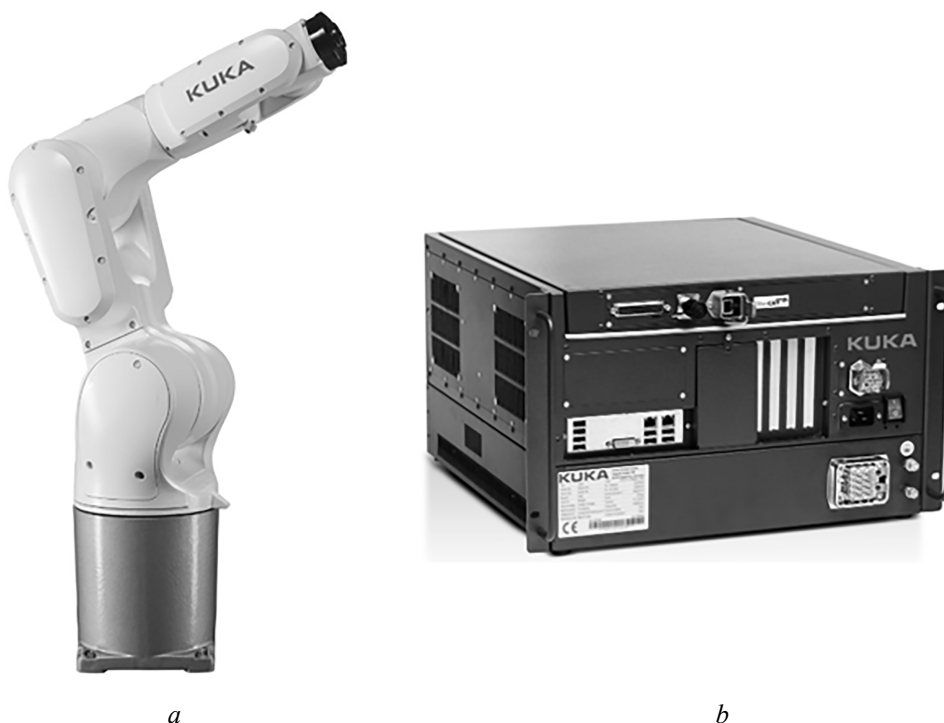


Рис. 2. Аппаратно-программный комплекс на базе робота-манипулятора: *a* – шестиосевой робот-манипулятор KUKA KR6 R900; *b* – контроллер промышленного робота KUKA KR C4 Compact

Fig. 2. Hardware and software complex based on a robot manipulator: *a* - six-axis robot manipulator KUKA KR6 R900; *b* - industrial robot controller KUKA KR C4 Compact

Использование дополненной реальности (AR) в сочетании со шлемом виртуальной реальности (VR-шлем) и манипулятором KUKA открывает новые горизонты в обучении стоматологов. Эта технология предлагает ряд значительных преимуществ, которые способствуют более эффективному и качественному освоению стоматологических навыков. Например, она помогает визуализировать процесс лечения зубов, и при работе с большим количеством получае-

мых параметров симулятора дополненная реальность обеспечивает эффективный поток информации для мониторинга. В данной статье элементы дополненной реальности ориентированы на применение в образовательном процессе.

Алгоритм взаимодействия компонентов аппаратно-программного комплекса на базе робота-манипулятора (аватара) с использованием среды дополненной реальности приведен на рисунке 3 [14].

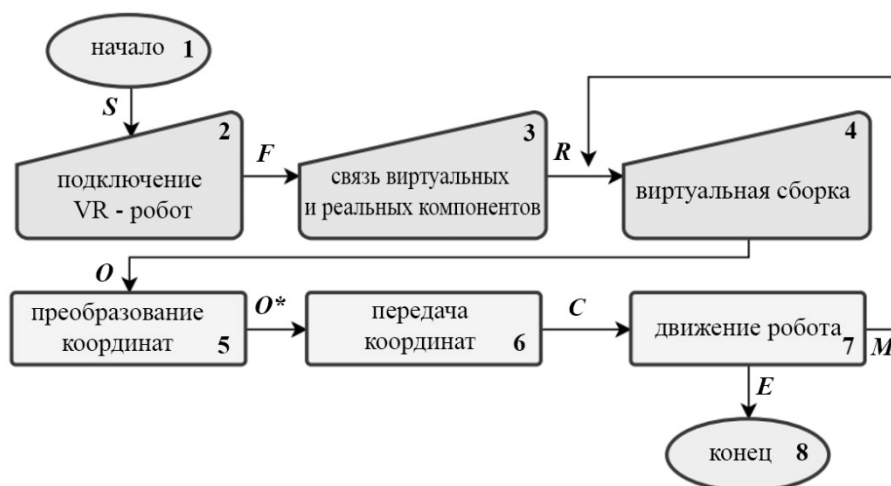


Рис. 3. Блок-схема алгоритма взаимодействия элементов аппаратно-программного комплекса на базе робота-манипулятора с использованием среды дополненной реальности

Fig. 3. Block diagram of the algorithm for interaction of elements of a hardware and software complex based on a robotic manipulator using an augmented reality environment

Функционирование системы осуществляется согласно блок-схеме (см. рис. 3):

#### 1. Начало

Выходные данные: сигнал о начале процесса, параметры подключения к VR-шлему и роботу ( $S$ ).

#### 2. Подключение VR-робота

Выходные данные: установленное соединение между VR-шлемом и роботом, данные о положении и ориентации объектов в виртуальной среде Unity, данные о текущем положении робота ( $F$ ).

#### 3. Связь виртуальных и реальных компонентов

Выходные данные: сопоставление между виртуальными и реальными объектами ( $R$ ).

#### 4. Виртуальная сборка

Выходные данные: новые данные о положении и ориентации виртуальных объектов ( $O$ ).

#### 5. Преобразование координат

Выходные данные: преобразованные координаты, соответствующие системе координат робота ( $O^*$ ).

#### 6. Передача координат

Выходные данные: команды для робота ( $C$ ).

#### 7. Движение робота

Выходные данные: измененное положение робота, действия пользователя в виртуальной среде (например, перемещение виртуальных объектов) ( $M$ ) или сигнал для остановки процесса ( $E$ ).

Антропоморфный стоматологический робот-симулятор с интегрированным аппаратно-программным комплексом на базе робота-манипулятора KUKA приведен на рисунке 4. Данное оборудование является рабочим пространством в реальной среде.



Рис. 4. Рабочее пространство в реальной среде

Fig. 4. Workspace in a real environment

Блок-схема, представленная на рисунке 3, описывает процесс взаимодействия обучающегося с виртуальным роботом KUKA в среде Unity. Обучающийся, используя VR-шлем, может управлять роботом-манипулятором KUKA, осуществляя сборку виртуальных объектов.

#### Пошаговое описание работы

*Начало.* Симуляция начинается с подключения VR-шлема к системе управления роботом-манипулятором KUKA.

*Подключение VR-робота.* Устанавливается связь между обучающимся, надевшим VR-шлем (аватаром обучающегося), и виртуальной моделью робота (аватаром пациента) в среде Unity. Движения головы и рук обучающегося передаются в систему управления роботом. Для этого необходимо установить соответствие между координатными системами VR и робота. Это включает в себя определение начальных положений, осей координат и масштабов. В программе активируется скрипт на языке C#, прикрепленный к 3D-модели бура, расположенного в локации виртуальной реальности. Скрипт собирает положение  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  каждые 20 миллисекунд (время дискретизации системы) и отправляет в программу-посредник на компьютер, на котором развернута виртуальная реальность. Далее программа трансформирует координаты 3D-бура и посредством скрипта на языке Python отправляет их в робот-манипулятор KUKA через внутренний шлюз-драйвер.

*Связь виртуальных и реальных компонентов.* Осуществляется синхронизация между виртуальными объектами в Unity и реальными компонентами робота KUKA. Это позволяет пользователю видеть в VR-шлеме точное положение

виртуальных объектов относительно реального робота.

*Виртуальная сборка (сборка аватаров).* Сборка – процесс объединения всех 3D-, 2D-, аудио- и скриптовых элементов в 1 сцену виртуальной реальности, используемых в сцене виртуального пространства. Реальные компоненты – робот-манипулятор KUKA, антропоморфный стоматологический робот-симулятор. Обучающийся, используя джойстики, которые являются неотъемлемой частью VR-шлема (1 на рис. 5), выполняет сборку виртуальных объектов. Координаты положения джойстиков передаются в систему управления роботом, который имитирует эти движения в реальном мире.

*Преобразование координат.* Координаты, полученные от джойстиков, преобразуются в координаты, понятные для системы управления роботом KUKA. Это необходимо для того, чтобы робот мог точно выполнять команды обучающегося.

*Передача координат.* Преобразованные координаты передаются в систему управления роботом.

*Движение робота.* Робот KUKA выполняет движения, соответствующие полученным координатам, и осуществляет сборку реальных объектов в соответствии с виртуальной моделью.

*Конец.* Цикл повторяется до тех пор, пока обучающийся не завершит свою работу.

На рисунке 5 приведен пример отработки стоматологических навыков в AR-среде с помощью VR-шлема. Обучающийся использует VR-шлем (1, рис. 5, а) и управляет аватаром в среде Unity (2, рис. 5, б) и реальным манипулятором KUKA (3, рис. 5, в), при этом он может находиться в любой точке мира.

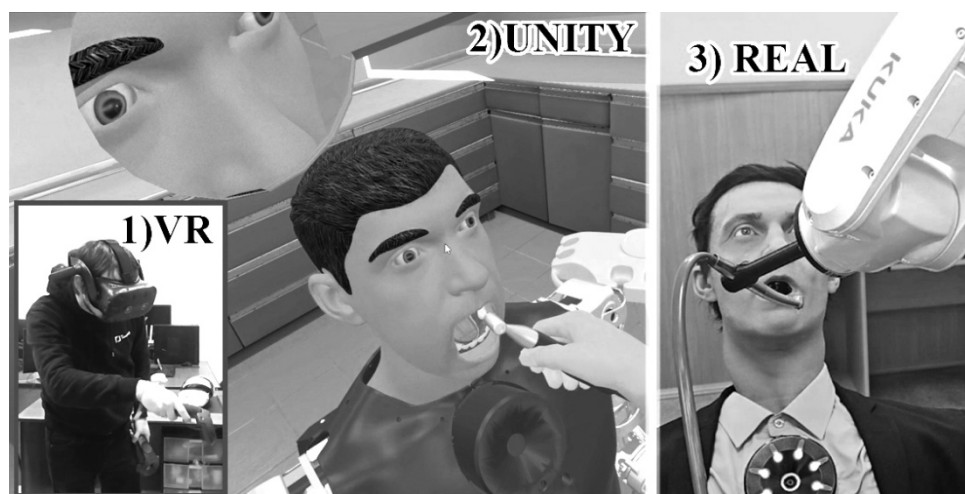


Рис. 5. Процесс отработки стоматологических навыков в AR-среде

Fig. 5. The process of practicing dental skills in an AR environment

### **Ключевые преимущества использования AR-технологии**

#### *Иммерсивное обучение (в виде игры)*

- полное погружение: VR-шлем создает эффект присутствия в виртуальной стоматологической клинике, позволяя студентам ощутить себя на месте настоящего стоматолога;

- реалистичная среда: благодаря высококачественной графике и обратной связи от манипулятора KUKA студенты могут взаимодействовать с виртуальными инструментами и пациентами так же, как в реальной жизни.

#### *Безопасность*

- отсутствие риска для пациентов: студенты могут оттачивать свои навыки на виртуальных пациентах, не подвергая риску реальных людей;

- минимизация ошибок: возможность многократно повторять сложные процедуры и оттачивать движения до автоматизма снижает риск совершения ошибок в реальной клинической практике.

#### *Индивидуальный подход*

- адаптация к уровню подготовки: каждый студент может выбрать для себя оптимальный уровень сложности симуляции, что позволяет учесть индивидуальные особенности и темпы обучения;

- фокусировка на слабых сторонах: симулятор позволяет идентифицировать области, требующие дополнительной практики, и сосредоточиться на их отработке.

#### *Экономическая эффективность*

- снижение затрат на расходные материалы: использование виртуальных моделей значительно сокращает расход стоматологических материалов;

- повышение эффективности обучения: благодаря возможности многократно повторять процедуры, студенты быстрее осваивают необходимые навыки, что сокращает общее время обучения.

#### *Визуализация сложных процессов*

- пошаговое руководство: AR-технологии позволяют визуализировать каждый этап процедуры, что упрощает понимание сложных анатомических структур и клинических протоколов;

- анимации и подсказки: симулятор может предоставлять студентам дополнительные подсказки и визуальные эффекты, помогающие лучше усвоить материал.

#### *Возможность многократного повторения*

- отработка сложных манипуляций: студенты могут бесконечно повторять сложные манипуляции до тех пор, пока не достигнут необходимого уровня мастерства;

- анализ ошибок: симулятор позволяет анализировать ошибки и корректировать движения, что способствует быстрому прогрессу.

Сочетание VR-шлемов и манипуляторов KUKA с технологией дополненной реальности открывает новые возможности для обучения стоматологов. Эта инновационная технология позволяет создать безопасную и эффективную среду для отработки практических навыков, что в конечном итоге повышает качество стоматологической помощи.

Одним из инструментов оценки качества лечения зуба и визуализации процесса лечения в антропоморфном стоматологическом роботесимуляторе являются наличие камер в Smart-челюсти.

### **Оценка работы обучающегося с помощью камер в Smart-челюсти**

Внутри ротовой полости робота установлено 5 камер, информация с которых обрабатывается нейронными сетями для оценивания работы студента и отображается на экране в дополненной реальности. В исследовании [15] использовались шесть сверточных нейронных сетей YOLOv8. Каждая из них была обучена на распознавание определенного набора классов в зависимости от того, какие объекты она должна обнаруживать. Обучение проводилось с учителем в течение 100 эпох. Использование нескольких нейронных сетей обусловлено тем, что в каждом сценарии оцениваются различные параметры.

Для сценария «удаление зуба» оценивается правильность захвата при удалении и правильность самого удаления. При анализе захвата проверяется положение элеватора перед удалением. При анализе удаления оценивается наличие осколков или частей зуба в десне, оставшихся после удаления. Распознавание объектов при захвате и удалении производится с помощью разных нейронных сетей.

Для сценариев «лечение кариеса» и «эндодонтическое лечение» оценивается правильность формы отверстия и его размеры. Распознавание производится в два этапа: первая нейронная сеть распознает зуб, а вторая на этом зубе должна распознать отверстие. Правильность формы отверстия оценивается с помощью нейронной сети. Глубина отверстия оценивается также с помощью нейронной сети, так как этот размер виден на фотографии в искаженном виде. Остальные два размера отверстия оцениваются исходя из их длины в пикселях на изображении. Для этого берутся габаритные размеры отверстия, распознанного на фотографии.

На рисунке 6 они обозначены как  $a$  и  $b$ . Так как камеры расположены параллельно жевательной поверхности зубов, размеры отверстий передаются без искажений. Зная размеры в пикселях,

можно получить размеры отверстий в миллиметрах, предварительно вычислив коэффициент перевода по известному размеру на изображении.

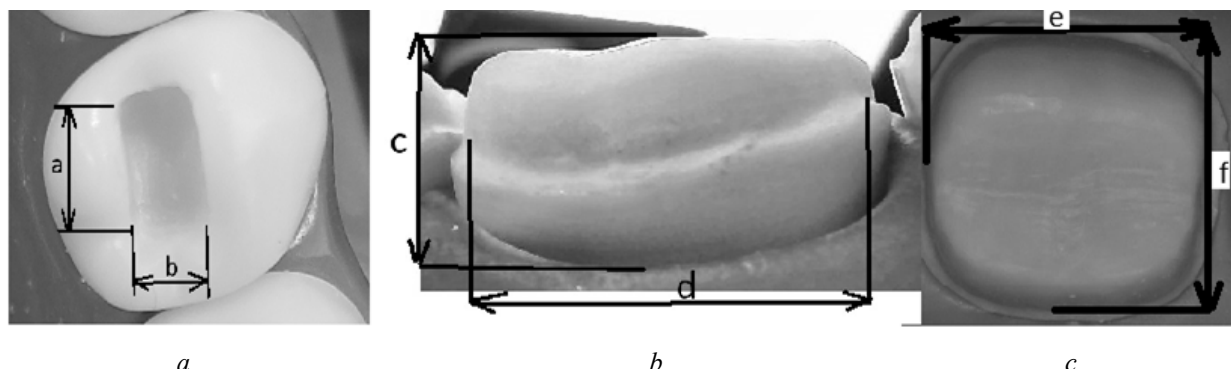


Рис. 6. Искомые размеры на изображениях зубов:  
 $a$  – для сценария «кариес»;  $b$  – для сценария «коронка»;  $c$  – вид сверху

Fig. 6. The required dimensions on the images of teeth:  
 $a$  - for the Caries scenario;  $b$  - for the Crown scenario;  $c$  - top view

Для сценария «протезирование зуба» также оценивается правильность формы зуба и количество снятого материала с каждой из сторон. Для распознавания объектов с каждой из сторон используется отдельная нейронная сеть. Правильность формы зуба оценивается с помощью нейронной сети. Количество материала, снятого со стороны жевательной поверхности, тоже оценивается исходя из габаритного размера распознанного зуба в пикселях. Производится сравнение между изначальной высотой зуба и его высотой после обработки, полученная разность является количеством снятого материала. На рисунке 6 этот размер обозначен как  $c$ . Количество материала, снятого со стороны медиальной поверхности, оценивается исходя из размера распознанного зуба в пикселях. Однако в этом случае этот размер не является габаритным. Мы определяем необходимый размер, находя на обнаруженном зубе две обработанные боковые поверхности и вычислив расстояние между ними. Это расстояние обозначено  $d$  на виде сбоку и  $e$  на виде сверху. Для определения количества материала, снятого с вестибулярной и язычной поверхностей, необходимо этот размер предварительно определить. В отличие от предыдущего случая нейронная сеть не обнаруживает необходимую грань. Для поиска этих граней используется инструмент Canny [16], обнаруживающий контуры на изображении. Получив замкнутый контур, можно рассчитать его периметр с помощью библиотеки Shapely [17, 18]. Вычитая из полученного пери-

метра определенную ранее длину стороны, можно определить длину оставшейся стороны. На рисунке 6 эта сторона обозначена  $f$ .

Итоговая погрешность метода измерения распознанного объекта составляет 95 %, а при измерении – 0,1 мм для границ, определенных нейронной сетью, и 0,2 мм для границ, определенных с помощью алгоритма Canny.

#### Аватар антропоморфного стоматологического робота-симулятора на базе робота Promobot-Ctv.1

Аватар антропоморфного стоматологического робота-симулятора представляет собой виртуальную 3D-модель, максимально точно имитирующую внешний вид и движения пациента (рис. 7). Он используется в среде Unity [19] для создания реалистичных симуляций стоматологических процедур, предназначенных для обучения студентов и повышения квалификации стоматологов. Среда Unity используется как объединяющий компонент. В ней в 3D-пространстве расставляются все элементы с учетом их текстур и анимационных скелетов, добавляются скрипты, которые отвечают за работу различных механик, а также за работу компонентов, переключающих сценарии.

Проектирование сцены и передача видеопотока через камеры реализуется следующим образом: видеопоток с камер и монитора со статистикой отправляется посредством локального соединения по технологии NDI 6 [20] с экрана компьютера-посредника в виртуальную среду.





Рис. 7. Рабочее пространство в среде Unity

Fig. 7. Workspace in Unity environment

#### *Ключевые аспекты аватара*

- анатомическая точность – модель воспроизводит пропорции человеческого тела, в частности области головы и шеи, а также строение зубов и десен;

- движения – аватар способен имитировать широкий спектр движений, характерных для стоматолога во время работы (движения рук, инструментов, мимику лица);

- интерактивность – аватар реагирует на взаимодействие с виртуальными инструментами и пациентом (например, при надавливании на виртуальный зуб, он ломается);

- настройка – система должна позволять настраивать различные параметры аватара, такие как пол, возраст, тип кожи, наличие патологий и др.

#### *Преимущества использования Unity для создания аватара робота-симулятора*

- визуальная реалистичность – Unity предоставляет мощные инструменты для создания высококачественной 3D-графики, что позволяет добиться высокой степени реалистичности аватара;

- физика – встроенный физический движок Unity позволяет моделировать различные физические взаимодействия, такие как деформация кожи, трение инструментов о зубы и др.

- инструменты анимации – Unity предлагает широкий набор инструментов для создания и управления анимацией, что позволяет реализовать сложные движения аватара;

- VR/AR-поддержка – Unity активно поддерживает технологии виртуальной и дополненной

реальности, что открывает новые возможности для обучения и тренировок.

Аватар антропоморфного стоматологического робота-симулятора в Unity представляет собой мощный инструмент для обучения и тренировки стоматологов. Постоянное развитие технологий и появление новых возможностей открывают перед ним широкие перспективы.

Система дополненной реальности, интегрированная с аватаром (см. рис. 7), обеспечивает обратную связь с помощью экрана, расположенного над роботом, где отображается текущий сценарий и параметры реального антропоморфного стоматологического робота-симулятора (температура, давление на зуб и др.). Это позволяет значительно повысить реалистичность обучения и тренировок.

#### **Выводы**

Сочетание передовых технологий, таких как робототехника, виртуальная и дополненная реальность, позволило создать уникальную платформу для обучения и тренировки стоматологов.

Реализован фрагмент образовательной среды на базе технологии 4.0 на основе геймификации и использования аватаров для стоматологического медицинского образования. Предложенное решение включено в процесс подготовки студентов ПГМУ 3-го курса и ординаторов.

Разработан аватар антропоморфного стоматологического симулятора на базе Promobot-Stv.1 с интегрированной манипуляционной рукой KUKA и поддержкой дополненной реальности.



Симулятор представляет собой значительный шаг вперед в области стоматологического образования и является ярким примером применения современных технологий в сфере образования, что способствует развитию стоматологической науки в целом.

Дальнейшие исследования и разработки будут направлены на создание еще более совершенных и функциональных симуляторов для подготовки специалистов нового поколения.

#### Библиографические ссылки

1. *Итинсон К. С.* Робототехника как перспективная линия педагогического процесса в медицинском вузе // *Азимут научных исследований: педагогика и психология*. 2021. Т. 10, № 1(34). С. 135–137. DOI: 10.26140/anip-2021-1001-0033.
2. *Паскова А. А.* Образование 4.0 в эпоху цифровой трансформации: перспективы и возможные пути реализации // *Вестник Майкопского государственного технологического университета*. 2021. Т. 13, № 4. С. 100–106. DOI: 10.47370/2078-1024-2021-13-4-100-106. EDN QPBRUA
3. 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 TGHLJC
4. Стоматологический симулятор на базе робототехнического комплекса с интегрированной смарт-челюстью / С. Д. Арутюнов, А. А. Южаков, Я. Н. Харах [и др.] // *Российский стоматологический журнал*. 2023. Т. 27, № 1. С. 63–70. DOI: 10.17816/dent115139
5. Стоматологический антропоморфный робот. Новая эра в имитации врачебных манипуляций и клинического приема / О. О. Янушевич, А. А. Ташкинов, Н. В. Минаева [и др.] // *Cathedra-Кафедра. Стоматологическое образование*. 2021. № 78. С. 64–67. EDN USYKQC.
6. *Zhang X.L., Luo Z.G., Li M.J.* (2014) Merge-Weighted Dynamic Time Warping for Speech Recognition. *Journal Of Computer Science and Technology*, 2014, vol. 29, is. 6, pp. 1072-1082. DOI: 10.1007/s11390-014-1491-0
7. *Мосина А. А., Соболева О. В.* О возможности использования текстов-примитивов для организации диалога человек – робот // *Перевод, реклама и PR в современной коммуникации*. 2020. Т. 1. С. 51–57. EDN VKEEZI
8. *Гасумова С. Е., Портер Л.* Роботизация социальной сферы // *Социология науки и технологий*. 2019. Т. 10, № 1. С. 79–94. DOI: 10.24411/2079-0910-2019-10006. EDN EWWFHX.
9. *Вронский А. С., Аверков О. С., Байдаров А. А.* Роботы диагносты – новый взгляд на профилактику и профилактические осмотры // *Виртуальные технологии в медицине*. 2020. № 4(26). С. 27–29. EDN AHWTZC.
10. *Дьяченко Е. В.* Симулированный пациент или пациент-робот в обучении врачей профессиональному общению – единство противоположностей // *Виртуальные технологии в медицине*. 2021. № 3 (29). С. 137–138. EDN NCZLYH.
11. *Kokoulin A.N., Kokoulin R.A.* (2022) The Hierarchical Approach for Image Processing in Objects Recognition System: Proc. of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, IEC on Rus 2022, St. Petersburg, 25-28 января 2022 года. St. Petersburg, 2022, pp. 340-344. DOI: 10.1109/EIConRus54750.2022.9755654
12. *Mehrez R., Affes E., Kadri I., Bouslimani Y., Ghribi M., Addouri A.* (2020) Location and Vision Techniques to Control a KUKA KR6 R900 Sixx Robot Arm, 2020: 1st International Conference on Communications, Control Systems and Signal Processing (CCSSP), El Oued, Algeria, 2020, pp. 311-316. DOI: 10.1109/CCSSP49278.2020.9151573
13. *Винник Е. А.* Внедрение и программирование промышленного сварочного робота KUKA в учебный процесс СПО // *Актуальные исследования*. 2023. № 39 (169). Ч.П.С. 46–48 [Электронный ресурс]. URL: <https://apni.ru/article/7074-vnedrenie-i-programmirovanie-promishlennogo> (дата обращения: 06.09.2024).
14. *Blankemeyer Sebastian, Wiemann Rolf, Posniak Lukas, Pregizer Christoph, Raatz Annika* (2018) Intuitive Robot Programming Using Augmented Reality: Proc. CIRP, 76, 155-160. DOI: 10.1016/j.procir.2018.02.028
15. *Кокоулин, А. Н.* Двухступенная схема обнаружения объектов в подсистеме машинного зрения сервисных роботов / А. Н. Кокоулин, А. А. Южаков // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2024. № 49. С. 176–199. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.09
16. Анализ информационного и математического обеспечения для распознавания аффективных состояний человека / А. А. Двойникова, М. В. Маркитантов, Е. В. Рюмина [и др.] // *Информатика и автоматизация*. 2022. Т. 21, № 6. С. 1097–1144. DOI: 10.15622/ia.21.6.2.
17. *Yakovlev S., Kartashov O., Mumrienko A.* (2022) Formalization and solution of the maximum area coverage problem using library Shapely for territory monitoring. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2022, no. 2, pp. 35-48.
18. *Sunitha G.* (2024) Python for Geospatial Data Analysis. *Ethics, Machine Learning and Python in Geospatial Analysis*, IGI Global, 2024, pp. 94-119.
19. *István T., Erdei R., Krakó N., Dávid Péter and Husi G.* (2022) 3D CAD design of KUKA robot arm & integration into AR environment to educational purposes: 2022 IEEE 20th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC). Brasov: Romania, 2022, pp. 590-596. DOI: 10.1109/PEMC51159.2022.9962864

## References

1. Itinson K.S. (2021) [Robotics as a promising line of the pedagogical process in a medical university]. *Azimuth nauchnyh issledovanij: pedagogika i psihologiya*, vol. 10, no. 1, pp. 135-137 (in Russ.). DOI: 10.26140/anip-2021-1001-003
2. Paskova A.A. (2021) [Education 4.0 in the era of digital transformation: prospects and possible ways of implementation]. *Vestnik Majkopskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*, vol. 13, no. 4, pp. 100-106 (in Russ.). DOI: 10.47370/2078-1024-2021-13-4-100-106. EDN QPBRUA
3. 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 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2023-4-13-22. EDN TGHJJC
4. Arutyunov S.D., Yuzhakov A.A., Harah Ya.N. (2023) [Dental simulator based on a robotic complex with an integrated smart jaw]. *Rossijskij stomatologicheskij zhurnal*, vol. 27, no. 1, pp. 63-70 (in Russ.). DOI: 10.17816/dent115139
5. Yanushevich O.O., Tashkinov A.A., Minaeva N.V. (2021) [Dental anthropomorphic robot. A new era in imitation of medical manipulations and clinical reception]. *Cathedra-Kafedra. Stomatologicheskoe obrazovanie*, no. 78, pp. 64-67 (in Russ.).
6. Zhang X.L., Luo Z.G., Li M.J. (2014) Merge-Weighted Dynamic Time Warping for Speech Recognition. *Journal Of Computer Science and Technology*, vol. 29, is. 6, pp. 1072-1082. DOI: 10.1007/s11390-014-1491-0
7. Mosina A.A., Soboleva O.V. (2020) [On the possibility of using primitive texts to organize a dialogue between a person and a robot]. *Perevod, reklamai PR v sovremennoj kommunikacii*, vol. 1, pp. 51-57 (in Russ.).
8. Gasumova S.E., Porter L. (2019) [Robotization of the social sphere]. *Sociologiya nauki i tekhnologii*, vol. 10, no. 1, pp. 79-94 (in Russ.). DOI: 10.24411/2079-0910-2019-10006. EDNEWWFHX.
9. Vronskij A.S., Averkov O.S., Bajdarov A.A. (2020) [Diagnostic robots - a new look at prevention and preventive examinations]. *Virtual'nye tekhnologii v medicine*, no. 4, p. 27-29 (in Russ.).
10. D'yachenko E.V. (2021) [Simulated patient or robot patient in training doctors in professional communication - the unity of opposites]. *Virtual'nyetekhnologii v medicine*, no. 3, pp. 137-138 (in Russ.).
11. Kokoulin A.N., Kokoulin R.A. (2022) The Hierarchical Approach for Image Processing in Objects Recognition System: Proc. of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, IEConRus 2022, St. Petersburg, 25-28 января 2022 года. St. Petersburg, 2022, pp. 340-344. DOI: 10.1109/IEConRus54750.2022.9755654
12. Mehrez R., Affes E., Kadri I., Bouslimani Y., Ghribi M., Addouri A. (2020) Location and Vision Techniques to Control a KUKA KR6 R900 Sixx Robot Arm, 2020: 1st International Conference on Communications, Control Systems and Signal Processing (CCSSP), El Oued, Algeria, 2020, pp. 311-316. DOI: 10.1109/CCSSP49278.2020.9151573
13. Vinnik E.A. (2023) [Implementation and programming of industrial welding robot KUKA in the educational process of secondary vocational education]. *Aktual'nye issledovaniya*, no. 39, part 1, pp. 46-48 (in Russ.). Available at: <https://apni.ru/article/7074-vnedrenie-i-programmirovanie-promishlennogo> (accessed: 06.09.2024).
14. Blankemeyer Sebastian, Wiemann Rolf, Posniak Lukas, Pregizer Christoph, Raatz Annika (2018) Intuitive Robot Programming Using Augmented Reality: Proc. CIRP, 76, 155-160. DOI: 10.1016/j.procir.2018.02.028
15. Kokoulin A.N., Yuzhakov A.A. (2024) [Two-stage object detection scheme in computer vision systems of service robots]. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, no. 49, pp. 176-199 (in Russ.). DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.09
16. Dvojnjkova A.A., Markitantov M.V., Ryumina E.V. (2022) [Analysis of information and mathematical support for recognizing human affective states]. *Informatika i avtomatizaciya*, vol. 21, no. 6, pp. 1097-1144 (in Russ.). DOI: 10.15622/ia.21.6.2
17. Yakovlev S., Kartashov O., Mumrienko A. (2022) Formalization and solution of the maximum area coverage problem using library Shapely for territory monitoring. *Radioelectronic and Computer Systems*, no. 2, pp. 35-48.
18. Sunitha G. (2024) Python for Geospatial Data Analysis. Ethics, Machine Learning and Python in Geospatial Analysis, IGI Global, 2024, pp. 94-119.
19. István T., Erdei R., Krakó N., Dávid Péter and Husi G. (2022) 3D CAD design of KUKA robot arm & integration into AR environment to educational purposes: 2022 IEEE 20th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC). Brasov: Romania, 2022, pp. 590-596. DOI: 10.1109/PEMC51159.2022.9962864

## Elements of Educational Technology 4.0 on the Example of Augmented Reality Using an Avatar of an Anthropomorphic Dental Robot Simulator

A.A. Baidarov, PhD in Engineering, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

R.A. Kokoulin, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

S.A. Storozhev, PhD in Engineering, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

A.A. Yuzhakov, DSc in Engineering, Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

S.D. Arutyunov, DSc in Medicine, Professor, The Russian University of Medicine, Moscow, Russia

N.B. Astashina, DSc in Medicine, Professor, Perm State Medical University named after Academician E. A. Wagner, Perm, Russia

*This paper presents an innovative solution for dental education within the framework of Industry 4.0: an anthropomorphic dental simulator combining the advantages of robotics, virtual reality (VR), and augmented reality (AR). The integration of a six-axis KUKA robotic arm with the Unity virtual environment provides a high degree of realism in simulating dental procedures. The use of neural networks allows for objective assessment of student performance by analyzing video streams from cameras inside the simulator's oral cavity. The research aims to build educational environment elements based on Industry 4.0 technology, utilizing gamification and avatars. The novelty of this research lies in the unique combination of an industrial robot, VR/AR technologies, and artificial intelligence to create a personalized and interactive learning environment. The development methodology involved creating a virtual jaw model, programming the robot for precise movements, and training neural networks on a large dataset. Results demonstrated that the developed simulator significantly improves learning efficiency, reduces student adaptation time, and allows for objective assessment of their skills. Future development includes integration with other medical simulators, the creation of adaptive learning programs, and the application of artificial intelligence for deeper analysis of learning data. The examples presented in this paper confirm the effectiveness of the proposed approach and open new perspectives in the development of innovative training simulators for dentistry. The anthropomorphic dental simulator presented allows for the application of augmented reality in remote dental education and the simulation of various diseases, significantly improving the practical training of both instructors and students for working with patients.*

**Keywords:** educational technology 4.0, anthropomorphic simulator, Robo-C, augmented reality, KUKA robot.

Получено 11.10.2024

### Образец цитирования

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

### For Citation

Baidarov A.A., Kokoulin R.A., Storozhev S.A., Yuzhakov A.A., Arutyunov S.D., Astashina N.B. (2024) [Elements of Educational Technology 4.0 on the Example of Augmented Reality Using an Avatar of an Anthropomorphic Dental Robot Simulator]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 4, pp. 79-89 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-79-89